

Univerzitet u Beogradu  
Građevinski fakultet

Željko Cvijetinović

RAZVOJ METODOLOGIJE I TEHNOLOŠKIH  
POSTUPAKA ZA FORMIRANJE DIGITALNOG  
MODELA TERENA ZA TERITORIJU DRŽAVE

Doktorska disertacija

Beograd, jun 2005.



id = 512261266



PA 18650

Univerzitet u Beogradu  
Građevinski fakultet

Željko Cvijetinović

**RAZVOJ METODOLOGIJE I TEHNOLOŠKIH  
POSTUPAKA ZA FORMIRANJE DIGITALNOG  
MODELA TERENA ZA TERITORIJU DRŽAVE**

Doktorska disertacija

Beograd, jun 2005.



**Mentor:**

Prof. Dr Dragan Mihajlović, dipl. inž. geod., Građevinski fakultet Beograd

**Članovi komisije:**

Prof. dr Dušan Joksić, dipl. inž. geod., Građevinski fakultet Beograd

Prof. dr Dragan Mihajlović, dipl. inž. geod., Građevinski fakultet Beograd

Prof. dr Vojislav Milovanović, dipl. inž. geod., Građevinski fakultet Beograd

Prof. dr Vesna Jevremović, dipl. mat., Matematički fakultet Beograd





# Razvoj metodologije i tehnoloških postupaka za formiranje digitalog modela terena za teritoriju države

## Rezime

Predmet proučavanja su metodologija i tehnološki postupci potrebni za izradu nacionalnog DMT-a. Tačnost i detaljnost ovog DMT-a treba da odgovara podlogama srednjih razmera (1:5000 – 1:50000). U istraživanju se pošlo od analize svih savremenih metoda i tehnika za masovno prikupljanje podataka i izradu DMT-a. Cilj je bio da se omogući razvoj optimalne metodologije u smislu kvaliteta, ekonomičnosti i efikasnosti. Predstavljen je trenutni status naučnih istraživanja kao i dometi ovih metoda i tehnika.

Istraživanje je obuhvatilo i analizu savremenih metoda i postupaka za formiranje DMT-a, tj. za rekonstrukciju površi terena na osnovu visinskih podataka dobijenih iz različitih izvora. Posebno su analizirani postupci za formiranje DMT-a korišćenjem ulaznih podataka u vidu izohipsi. Proučavani su numerički postupci, algoritmi i softver za vernu rekonstrukciju površi terena na osnovu podataka dobijenih digitalizacijom postojećih podloga i razvijena su originalna rešenja. Razvijeni softver omogućava formiranje DMT-a korišćenjem izohipsi, ali i podataka iz svih drugih izvora. Razvoj je zasnovan na konceptu koji podrazumeva formiranje mreže nepravilnih trouglova – TIN i primenu Bézier-ovih trougaonih površinskih zakrpa. Posebna pažnja posvećena je respektovanju implicitnih informacija o površi terena koje su sadržane u podacima datim u formi izohipsi. Razvijeni su i implementirani algoritmi i numerički postupci za ocenu normala površi u svim tačkama sa poznatim visinama, kao i postupci za automatsku detekciju i ekstrakciju strukturnih linija terena na osnovu izohipsi. Softver omogućava efikasno rukovanje velikom količinom prikupljenih podataka i njihovu kvalitetnu verifikaciju. Ovo je i potvrđeno kroz brojne eksperimente i praktične primene sa korišćenjem realnih podataka.

Rezultati eksperimenata su pokazali da je kvalitet rekonstrukcije površi terena iz izohipsi koji se ostvaruje korišćenjem razvijenih postupaka i softvera bolji, ili bar jednako dobar, u odnosu na kvalitet koji se može postići korišćenjem skupog komercijalnog softvera. Obrada velike količine podataka omogućila je objektivnu ocenu efikasnosti i kvaliteta različitih numeričkih postupaka implementiranih u okviru softvera. Uočeni su problemi koji se mogu javiti kod modeliranja pojedinih formi terena i gde se javljaju neopravdano velike greške rekonstruisane površi terena. U tim slučajevima, pored korišćenja posebno razvijenih numeričkih postupaka, predlaže se i unošenje dodatnih informacija.

Izvršena je obimna analiza kvaliteta podataka raspoloživih na postojećim podlogama, a posebno podataka sa vojnotopografskih karata razmere 1:25000. Za kontrolu su korišćeni podaci dobijeni iz različitih izvora kao što su: digitalizacija Osnovne državne karte razmere 1:5000, prikupljanje DMT podataka u okviru projekata ortofotoprodukcije i digitalnog kartiranja u razmeri 1:5000, podaci državnog premera i tačke poligonskih mreža. Ova analiza je pokazala da su podaci dobijeni sa vojnotopografskih podloga razmere 1:25000 po svome kvalitetu sasvim zadovoljavajući i u okviru očekivane tačnosti. Ovaj kvalitet može se obezbediti pod pretpostavkom da se detaljnom verifikacijom iz podataka odstrane greške koje su posledica primarnog kartiranja i naknadne digitalizacije podataka. Utvrđeno je da je kvalitet DMT podataka, ne samo onih prikupljenih sa karata razmere 1:25000, već i onih korišćenih za kontrolu, znatno niži u predelima obraslim šumom.

Razvijena je i predložena metodologija formiranja nacionalnog DMT-a. Metodologija podrazumeva prevođenje svih relevantnih podataka sa vojnotopografskih karata razmere 1:25000 u digitalni oblik i primenu razvijenih numeričkih postupaka i softvera za formiranje DMT-a. Naglašen je značaj kvalitetne verifikacije i obrade prikupljenih podataka. Ukazano je na probleme i moguća rešenja koja se odnose na utvrđivanje i otklanjanje deformacija, kao i georeferenciranje pojedinih oleata vojnotopografske karte. Metodologija verifikacije i formiranja DMT-a je razvijena sa posebnim vođenjem računa o problemima i rešenjima vezanim za obradu velike količine podataka. Proučavana su i moguća rešenja za arhiviranje i održavanje nacionalnog DMT-a. Preporučeno je pristup po kome se verifikuju, arhiviraju i održavaju primarni podaci visinske predstave terena, dok se DMT formira po potrebi.

**Ključne reči:** DMT za teritoriju države, prikupljanje i verifikacija podataka, rekonstrukcija površi, izohipse, TIN, interpolacija, Bézier trougaone zakrpe, ekstrakcija skeleta terena, kvalitet DMT podataka



# Development of the methodology and technological procedures for the formation of country-wide DTM

## Abstract

Methodology and technological procedures required for the formation of country-wide DTM has been the subject of the study. Accuracy and level of detail of the DTM should correspond to maps in middle scales (1:5000 – 1:50000). The research started with analyses of all modern methods and techniques for mass DTM data acquisition. The objective was to provide development of optimal methodology in terms of quality, economy and efficiency. Current status of the research in this area and potentials of all available methods and techniques have been presented.

Research also included analyses of all modern methods and procedures for building DTM, i.e. for terrain surface reconstruction using height data from different sources. Procedures for building DTM using contour data have been especially analyzed. Numerical procedures, algorithms and software for correct reconstruction of terrain surface by using data acquired by digitization of existing maps have been studied and original solutions have been developed. Software that has been developed enables formation of DTM by using contours, but also data from all other sources. Development has been based on the concept of making triangular irregular network – TIN and on using Bézier triangular surface patches. Special attention is dedicated to the problem of respecting all implicit information about terrain surface that are contained within contour data. Procedures for estimation of surface normals at all points with given heights and procedures for automatic detection and extraction of structure (skeleton) lines of terrain from contours have been developed and implemented within software. The software enables efficient handling of large quantity of collected data and high quality data verification, and all of this has been verified through numerous experiments and real applications in practice.

The results of experiments have showed that the quality of terrain surface reconstruction from contours using the developed procedures and the software is better, or at least as good as the quality achieved by using some expensive commercial software. Processing of large quantity of data provided objective estimation of efficiency and quality of different numerical procedures implemented within the software. Some problems that might appear when specific terrain forms are being modeled, resulting in extremely large and unjustified errors in terrain surface reconstruction, have been noticed. In these cases, in addition to application of especially developed numerical procedures, supply of additional information is suggested.

Extensive analysis of quality of data available on existing maps, especially of data contained on military topographic maps in scale 1:25000 has been made. Control data is obtained from different sources such as: digitization of State Base Map in scale 1:5000, DTM data collected within projects of orthophoto production and digital mapping in scale 1:5000, data from state survey and points of geodetic networks. This analysis has shown that data obtained from military topographic maps in scale 1:25000 are quite satisfying in terms of quality and within expected accuracy limits. This quality can be achieved providing that detailed data verification is carried out and that all errors originating from previous data mapping and subsequent data digitization are eliminated. It has been noticed that quality of DTM data is significantly lower in wooded areas, and this is not the case just for the data obtained from maps in 1:25000 scale, but for the control data as well.

Methodology for the formation of country-wide DTM has been developed and proposed. The methodology assumes conversion of all relevant data from military topographic maps in scale 1:25000 into digital form, and application of the developed numerical procedures and software for DTM creation. The importance of high quality verification of the data has been emphasized. Problems and possible solutions related to the determination and elimination of map distortions, and to the procedures of georeferencing of certain layers of military topographic maps are pointed out. The Methodology has been developed with special attention being dedicated to the problems and solutions related to processing large data volumes. Solutions for archiving and maintenance of country-wide DTM have been studied also. Approach based on verification, archiving and maintenance of primary DTM data, whereas DTM is built as needed, is suggested as the preferred one.

**Keywords:** country-wide DTM, DTM data acquisition and verification, surface reconstruction, contours, TIN, interpolation, Bézier triangular patches, terrain skeleton extraction, DTM data quality



# S A D R Ž A J

<b>1</b>	<b>UVOD</b>	<b>1</b>
1.1	Predmet istraživanja	1
1.2	Cilj istraživanja	2
1.3	Polazne pretpostavke i trenutni status istraživanja	3
1.4	Pregled sadržaja rada	6
<b>2</b>	<b>SAVREMENE METODE PRIKUPLJANJA I IZVORI PODATAKA ZA DIGITALNO MODELIRANJE TERENA</b>	<b>9</b>
2.1	Fotogrametrija	10
2.1.1	Aerofotogrametrijsko snimanje terena	10
2.1.2	Satelitske misije	12
2.1.3	Prikupljanje podataka DMT-a sa fotogrametrijskih snimaka	12
2.1.3.1	Strategije prikupljanja reprezentativnog uzorka podataka za opisivanje površi terena	13
2.1.3.2	Analitički i analogni fotogrametrijski instrumenti	14
2.1.3.3	Digitalni fotogrametrijski sistemi	14
2.1.4	Obrada podataka	16
2.1.5	Kvalitet podataka, efikasnost i ekonomičnost	17
2.2	Lasersko skeniranje iz vazduha - LIDAR	20
2.2.1	Snimanje terena laserom iz aviona	21
2.2.2	Obrada podataka	24
2.2.3	Kvalitet podataka, efikasnost i ekonomičnost	27
2.3	Radarsko snimanje	30
2.3.1	SAR	30
2.3.2	InSAR (IFSAR)	32
2.3.3	Satelitske misije	34
2.3.4	Snimanje InSAR sistemom iz aviona	35
2.3.5	Obrada podataka	36
2.3.6	Kvalitet podataka, efikasnost i ekonomičnost	36
2.4	Digitalizacija podataka sa postojećih podloga	37
2.4.1	Digitalizacija postojećih podloga	38
2.4.2	Obrada podataka	40
2.4.3	Kvalitet podataka, efikasnost i ekonomičnost	43
2.5	Zaključna razmatranja	45
<b>3</b>	<b>FORMIRANJE I ANALIZA DMT-a</b>	<b>47</b>
3.1	Struktura i organizacija DMT-a	49
3.1.1	DMT u formi grida (rastera)	51
3.1.2	DMT na osnovu TIN-a	54
3.1.3	DMT sa hibridnom strukturom podataka	58
3.2	Formiranje grid DMT-a	58
3.2.1	Metode interpolacije korišćenjem pokretnih površi	59
3.2.2	Geostatističke metode	61
3.2.2.1	Kvantifikacija prostorne strukture površi	64
3.2.2.2	Predikcija	66
3.2.3	Metod konačnih elemenata	68
3.2.4	Metode sa varijacionim pristupom	70
3.2.5	Multikvadratne funkcije	74
3.2.6	Modeliranje površi terena korišćenjem grid DMT-a	74
3.3	Formiranje TIN DMT-a	76
3.3.1	Formiranje TIN-a	77
3.3.1.1	Algoritmi za konstruisanje Delaunay-jeve triangulacije	79
3.3.1.2	Obavezne linije TIN-a	84



3.3.1.3	Profinjavanje TIN-a .....	86
3.3.2	Modeliranje površi terena na osnovu TIN-a .....	90
3.3.2.1	Filtriranje podataka .....	91
3.3.2.2	Proračun normala i izvoda površi terena u čvorovima TIN-a .....	93
3.3.2.3	Modeliranje DMT-a trougaonim površinskim zakrpama .....	96
3.3.2.3.1	Kontinualnost trougaonih površinskih zakrpa .....	97
3.3.2.3.2	Proračun parametara Bézier-ovih trougaonih zakrpa .....	101
3.3.2.4	Sukcesivno deljenje i profinjavanje TIN-a .....	110
<b>3.4</b>	<b>Formiranje DMT-a na osnovu digitalizovanih izohipsi .....</b>	<b>112</b>
3.4.1	Specijalne metode formiranja DMT-a na osnovu izohipsi .....	113
3.4.1.1	Interpolacija po pravcu najvećeg pada terena .....	114
3.4.1.2	Metode sa rasterskim pristupom .....	116
3.4.1.3	Metod konačnih razlika sa uslovom odvodnjavanja .....	117
3.4.2	Otkrivanje strukturnih linija terena i njihovo korišćenje za formiranje DMT-a .....	118
3.4.2.1	Postupci bazirani na TIN DMT-u .....	119
3.4.2.1.1	Vektorske analize .....	120
3.4.2.1.2	Rasterske analize .....	130
3.4.2.2	Postupci bazirani na grid DMT-u .....	130
<b>3.5</b>	<b>Analize DMT-a .....</b>	<b>131</b>
3.5.1	3D vizuelizacija DMT-a .....	132
3.5.2	Verifikacija DMT-a .....	138
3.5.2.1	Vizuelna verifikacija .....	138
3.5.2.2	Verifikacija korišćenjem analitičkih metoda .....	139
<b>3.6</b>	<b>Zaključna razmatranja .....</b>	<b>140</b>
<b>4</b>	<b>RAZVOJ NUMERIČKIH POSTUPAKA I SOFTVERA ZA FORMIRANJE I VERIFIKACIJU DMT-a. 143</b>	
<b>4.1</b>	<b>Polazne pretpostavke i osnovna koncepcija .....</b>	<b>143</b>
<b>4.2</b>	<b>Softversko okruženje za razvoj .....</b>	<b>144</b>
4.2.1	MapSoft .....	145
4.2.2	Surflng .....	146
<b>4.3</b>	<b>Formiranje TIN-a .....</b>	<b>147</b>
4.3.1	Respektovanje obaveznih linija .....	151
4.3.2	Profinjavanje TIN-a .....	152
<b>4.4</b>	<b>Modeliranje površi terena korišćenjem TIN-a .....</b>	<b>154</b>
4.4.1	Računanje normala i izvoda površi u tačkama TIN-a .....	154
4.4.1.1	Normale i izvodi u rasutima tačkama terena .....	155
4.4.1.2	Normale i izvodi u tačkama lokalnog ekstremuma površi terena .....	156
4.4.1.3	Normale i izvodi u tačkama strukturnih i prelomnih linija terena .....	156
4.4.1.4	Normale i izvodi u tačkama izohipsi .....	157
4.4.2	Proračun trougaonih površinskih zakrpa .....	159
<b>4.5</b>	<b>Numerički postupci za rekonstrukciju površi terena na osnovu izohipsi .....</b>	<b>162</b>
4.5.1	Uključivanje digitalizovanih strukturnih linija terena .....	162
4.5.2	Detekcija i ekstrakcija strukturnih linija analizom inicijalnog DMT-a .....	163
4.5.2.1	Detekcija i određivanje približne geometrije strukturnih linija .....	165
4.5.2.1.1	Geometrija strukturnih linija u horizontalnoj ravni .....	165
4.5.2.1.2	Visine tačaka detektovanih strukturnih linija terena .....	171
4.5.2.2	Popravljenje geometrije detektovanih strukturnih linija .....	173
4.5.2.3	Ugradnja detektovanih i ekstraktovanih strukturnih linija u DMT .....	174
4.5.3	Profinjavanje DMT-a .....	174
4.5.4	Redukcija podataka DMT-a .....	175
<b>4.6</b>	<b>Razvoj i softverska implementacija postupaka za verifikaciju DMT podataka .....</b>	<b>178</b>
4.6.1	Vizuelna verifikacija .....	179
4.6.1.1	Implementacija 3D vizuelizacije u okviru Surflng-a .....	181
4.6.2	Analitičke metode verifikacije .....	183
4.6.2.1	Kontrolne tačke .....	184
4.6.2.2	Visinske razlike u trouglovima .....	185
4.6.2.3	Odstupanja između linearne i kubne interpolacije .....	185
<b>4.7</b>	<b>Verifikacija razvijenih numeričkih postupaka i softvera .....</b>	<b>187</b>
4.7.1	Rekonstrukcija površi terena na osnovu izohipsi .....	188
4.7.2	Robustnost i efikasnost softvera za rad sa velikim količinama podataka .....	194
<b>4.8</b>	<b>Zaključna razmatranja .....</b>	<b>195</b>

<b>5 RAZVOJ METODOLOGIJE FORMIRANJA NACIONALNOG DMT-a.....</b>	<b>197</b>
<b>5.1 Iskustva na izradi nacionalnih DMT-ova u svetu .....</b>	<b>198</b>
5.1.1 Nemačka.....	198
5.1.2 SAD.....	200
5.1.3 Švajcarska .....	201
5.1.4 Velika Britanija.....	201
5.1.5 Austrija.....	202
5.1.6 Francuska.....	202
5.1.7 Holandija.....	202
5.1.8 Danska.....	203
<b>5.2 Kvalitet ciljnog DMT-a.....</b>	<b>203</b>
<b>5.3 Postojeći izvori podataka za izradu nacionalnog DMT-a .....</b>	<b>204</b>
5.3.1 Vojnotopografska karta 1:25000.....	204
5.3.2 Osnovna državna karta.....	206
5.3.3 Kvalitet podataka raspoloživih na postojećim podlogama.....	206
5.3.3.1 Proračun tačnosti visinske predstave TK25 .....	208
5.3.3.1.1 Primarno prikupljanje podataka visinske predstave TK25 .....	209
5.3.3.1.2 Greške nastale nakon kartiranja i u postupku sekundarnog prikupljanja podataka.....	210
5.3.3.2 Eksperimentalna ocena tačnosti visinske predstave TK25.....	215
<b>5.4 Savremene metode prikupljanja podataka za potrebe formiranja nacionalnog DMT-a ....</b>	<b>219</b>
<b>5.5 Predložena metodologija .....</b>	<b>220</b>
<b>5.6 Softverska podrška .....</b>	<b>222</b>
5.6.1 Softver za prikupljanje podataka sa postojećih podloga .....	222
5.6.2 Softver za formiranje i verifikaciju DMT-a.....	227
5.6.3 Softver za arhiviranje i održavanje DMT-a .....	229
<b>5.7 Prikupljanje podataka visinske predstave terena sa postojećih podloga.....</b>	<b>231</b>
5.7.1 Skeniranje podloga i primarna obrada skeniranih podloga .....	231
5.7.1.1 Obezbeđenje i kontrola kvaliteta skeniranja.....	232
5.7.1.2 Izbor rezolucije skeniranja i formata zapisa digitalne slike.....	233
5.7.1.3 Digitalna obrada skeniranih podloga .....	234
5.7.2 Otklanjanje deformacija i georeferenciranje .....	237
5.7.2.1 DigiScan - softver za kalibraciju i georeferenciranje skeniranih planova i karata .....	239
5.7.3 Digitalizacija sadržaja .....	241
5.7.3.1 Izohipse .....	242
5.7.3.2 Tačke sa poznatim visinama .....	245
5.7.3.3 Strukturne i prelomne linije terena.....	245
5.7.3.4 Površine sa posebnim značenjem.....	248
5.7.4 Obrada i verifikacija prikupljenih podataka .....	249
5.7.4.1 Generalna obrada i verifikacija digitalizovanih podataka .....	250
5.7.4.2 Obrada i verifikacija specifična za DMT podatke .....	252
<b>5.8 Inicijalno ažuriranje podataka .....</b>	<b>256</b>
<b>5.9 Formiranje finalnog DMT-a, arhiviranje i održavanje podataka.....</b>	<b>257</b>
5.9.1 Formiranje DMT-a.....	257
5.9.1.1 Grid DMT .....	258
5.9.1.2 TIN DMT .....	259
5.9.1.3 Hibridni DMT.....	261
5.9.2 Arhiviranje i održavanje podataka .....	261
<b>5.10 Verifikacija predložene metodologije .....</b>	<b>263</b>
<b>5.11 Zaključna razmatranja.....</b>	<b>269</b>
<b>6 ZAKLJUČNA RAZMATRANJA .....</b>	<b>271</b>
6.1 Razvoj numeričkih postupaka i softvera .....	271
6.2 Metodologija i tehnološki postupci .....	272
6.3 Smernice za dalja istraživanja.....	273
<b>Bibliografija .....</b>	<b>275</b>
a. Knjige, časopisi i radovi sa naučnih skupova.....	275
b. Internet adrese.....	283



<b>A. BÉZIEROVE KRIVE I POVRŠI .....</b>	<b>A-1</b>
<b>A.1 Bézier-ove, B-splajn i NURBS krive .....</b>	<b>A-1</b>
<b>A.2 Bézier-ove, B-splajn i NURBS površi .....</b>	<b>A-5</b>
A.2.1 Baricentrične koordinate .....	A-7
A.2.2 Bézier-ovi trouglovi .....	A-8
<b>B. EKSPERIMENTALNA VERIFIKACIJA NUMERIČKIH POSTUPAKA I SOFTVERA ZA FORMIRANJE DMT-a .....</b>	<b>B-1</b>
<b>B.1 Algoritmi za formiranje DMT-a na osnovu izohipsi.....</b>	<b>B-1</b>
<b>B.2 Test područje Novi Pazar.....</b>	<b>B-11</b>
B.2.1 Prikaz test područja .....	B-11
B.2.2 Formiranje DMT-a korišćenjem metoda interpolacije implementiranih u okviru softverskog paketa ArcGIS .....	B-12
B.2.3 Formiranje DMT-a korišćenjem razvijenih metoda interpolacije implementiranih u okviru softvera Surflng .....	B-14
B.2.4 Grafički prikaz rezultata formiranja DMT-a na osnovu izohipsi sa ekvidistancijom 10m ..	B-26
B.2.5 Grafički prikaz odstupanja teoretske površi terena od površi terena dobijene korišćenjem metoda interpolacije razvijenih u okviru ovog rada .....	B-28
<b>B.3 Test područje Valjevo .....</b>	<b>B-34</b>
B.3.1 Prikaz test područja .....	B-34
B.3.2 Formiranje DMT-a korišćenjem metoda interpolacije implementiranih u okviru softverskog paketa ArcGIS .....	B-35
B.3.3 Formiranje DMT-a korišćenjem metoda interpolacije razvijenih u okviru ovog rada i implementiranih u softveru Surflng .....	B-37
B.3.4 Grafički prikaz rezultata formiranja DMT-a na osnovu izohipsi sa ekvidistancijom 10m ..	B-41
B.3.5 Grafički prikaz odstupanja teoretske površi terena od površi terena dobijene korišćenjem metoda interpolacije razvijenih u okviru ovog rada .....	B-42
<b>B.4 Grafički prikaz grešaka rekonstrukcije površi terena korišćenjem metoda   interpolacije implementiranih u okviru softverskog paketa ArcGIS .....</b>	<b>B-44</b>
B.4.1 Test područje Novi Pazar.....	B-44
B.4.2 Test područje Valjevo .....	B-47
<b>B.5 Prikaz modela formiranih korišćenjem razvijenih postupaka i softvera .....</b>	<b>B-51</b>
<b>B.6 Formiranje modela sa više miliona tačaka .....</b>	<b>B-54</b>
<b>C. POSTOJEĆI PODACI ZA FORMIRANJE NACIONALNOG DMT-a .....</b>	<b>C-1</b>
C.1 Raspoloživost podloga .....	C-2
C.2 Deformacije i tačnost georeferenciranja TK25 .....	C-3
C.3 Količine podataka visinske predstave TK25.....	C-4
C.4 Podaci korišćeni za ocenu i verifikaciju visinskih podataka TK25 .....	C-5
C.5 Detaljni izveštaji sa statističkim pokazateljima upoređenja visina digitalizovanih sa TK25 sa visinama interpolovanim iz modela terena dobijenih iz DOF5, DTK5 i TP1 .....	C-6
C.6 Grafički prikaz upoređenja visina digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz digitalnih modela terena dobijenih iz DTK5.....	C-30
C.7 Sažeti prikaz rezultata upoređenja visina interpolovanih iz modela terena dobijenih iz DOF5, ODK5, DTK5 i TP1 sa visinama digitalizovanim sa TK25 .....	C-31
C.8 Upoređenje visina interpolovanih iz modela terena dobijenih iz DOF5, ODK5, DTK5 i TP1 sa visinama digitalizovanim sa TK25 – prikaz po nagibima terena .....	C-34
<b>D. REDUKCIJA PODATAKA.....</b>	<b>D-1</b>
<b>E. EKSPERIMENTALNA OCENA KVALITETA DMT25 FORMIRANOG PO PREDLOŽENOJ METODOLOGIJI .....</b>	<b>E-1</b>
<b>E.1 Prikaz test područja i raspoloživih podataka .....</b>	<b>E-2</b>
<b>E.2 Upoređenje visina interpolovanih iz DMT25 i visina dobijenih iz DOF5, TP1, ODK5 i   PM .....</b>	<b>E-3</b>
E.2.1 Detaljni izveštaji sa statističkim pokazateljima.....	E-3
E.2.2 Sažeti prikaz statističkih pokazatelja .....	E-33
E.2.3 Grafički prikaz rezultata formiranja DMT25 za izabrane projekte.....	E-42

E.3	Upoređenje visina interpolovanih iz DMT25 sa visinama dobijenim iz projekta izrade DTK5 za područje grada Beograda.....	E-53
E.4	Upoređenje visina interpolovanih iz DMT25 i visina tačaka poligonskih mreža (PM).....	E-58
E.5	Upoređenje visina interpolovanih iz DMT5 i visina poligonskih tačaka (PM).....	E-63
E.6	Upoređenje visina interpolovanih iz DMT25 i visina dobijenih iz DOF5, ODK5, DTK5, TP1 i PM – prikaz po nagibima terena .....	E-66
E.7	Upoređenje visina digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DMT25 sa visinama interpolovanim iz DMT5 (DOF5) za područje grada Beograda.....	E-73
INDEKS .....		I-1
a.	Slike .....	I-1
b.	Tabele .....	I-8
c.	Izveštaji.....	I-10





## **PREDGOVOR**

Ova disertacija je nastala kao rezultat istraživanja i razvoja na polju digitalnog modeliranja terena kojima se bavim već više od jedne decenije. Još u okviru izrade magistarskog rada razvio sam konceptualno rešenje postupka za prikupljanje podataka visinske predstave terena u okviru državnog premera. Da bi se obezbedila i njegova primena u praksi, rešenje je podržano softverskom aplikacijom za podršku digitalnom modeliranju terena koje je takođe razvijeno u okviru istog istraživanja. Do tada, digitalno modeliranje terena u Srbiji je bilo vrlo slabo zastupljeno. Ono je bilo ograničeno samo na sporadične projekte manjeg obima, ili se radilo o poslovima sa zastarelim i diskutabilnim procedurama i alatima.

Razvijeno softversko rešenje i predložena metodologija rada ubrzo su implementirani u okviru institucija koje su raspolagale fotogrametrijskim instrumentima za kartiranje većih područja. Tako se od sredine devedesetih postepeno krenulo sa prikupljanjem DMT podataka za velike projekte. Tokom tih aktivnosti sticana su vrlo značajna iskustva i neprekidno su usavršavana inicijalna softverska rešenja. Treba napomenuti da je to bio period vrlo ograničene saradnje sa svetom i vreme kada su nove tehnologije teško nalazile put do domaće nauke i prakse. Poslednjih nekoliko godina situacija se znatno popravlja i već su realizovani brojni projekti ortofotoprodukcije u okviru kojih je prikupljena značajna količina DMT podataka. Za to su korišćena rešenja koja sam razvio sa saradnicima, ali i neka od najsavremenijih tehnoloških rešenja, kao što je automatska ekstrakcija DMT-a na digitalnim fotogrametrijskim sistemima najpoznatijih svetskih proizvođača.

Prethodne aktivnosti dale su podsticaj za dalji nastavak započetih istraživanja sa ciljem razvoja metodologije i tehnoloških postupaka za formiranje DMT-a za celokupnu državnu teritoriju. Rezultati koji su ostvareni na ovom polju do tada predstavljali su solidnu osnovu i neophodnu pretpostavku za uspešnu realizaciju istraživanja predviđenih u okviru izrade ove disertacije.

Realizacija disertacije ne bi bila moguća bez intenzivne saradnje koju sam imao sa brojnim institucijama i pojedincima koji se bave digitalnim modeliranjem terena kod nas. U okviru te saradnje stečena su vrlo dragocena iskustva i u praksi su proverene mnoge ideje i rešenja. Za realizaciju vrlo obimnih eksperimenata korišćeni su podaci visinske predstave terena prikupljeni u okviru nekoliko institucija i preduzeća: Vojnogeografski institut SCG (VGI), MapSoft d.o.o., Geokarta d.o.o. i Republički geodetski zavod Srbije. Ovom prilikom ja im se srdačno zahvaljujem na dragocenoj saradnji, kao i na podacima koje su mi stavili na raspolaganje.

Veliku zahvalnost dugujem Mr Tomić Slavoljubu i njegovim saradnicima iz VGI-a koji su vredno radili na prikupljanju DMT podataka sa postojećih TK25 karata i koji su mi ustupili prikupljene podatke od suštinske važnosti za realizaciju istraživanja. Dragocena su bila i brojna iskustva stečena na realizaciji tog posla, ali i druge informacije koje sam od njih dobio iz prve ruke.

Posebnu zahvalnost dugujem kolegama Mr Milivoju Avramoviću i Bratislavu Jovanoviću čija mi je podrška i pomoć mnogo značila.

Zahvaljujem se i svojoj porodici, prijateljima i saradnicima iz Laboratorije za fotogrametriju na razumevanju i strpljenju koje su pokazali dok sam ja bio zauzet izradom ove disertacije.

Beograd, 10. jun 2005. godine

Željko Cvijetinić





# 1 UVOD

Valjana i pravovremena informacija predstavlja jedan od osnovnih faktora za uspešno izvođenje bilo koje čovekove aktivnosti. Poseban vid ovih informacija su informacije koje su prostorno određene i koje su predmet interesovanja prostornih informacionih sistema. U vremenu u kome živimo promene koje se odigravaju u čovekovom okruženju su vrlo dinamične i velikog obima. Sa druge strane, prirodni i drugi resursi su ograničeni. Zato projektovanje i realizacija prostornih informacionih sistema predstavljaju danas preduslov za uspešno i racionalno gazdovanje resursima. Vrlo bitan podsistem ovih informacionih sistema i često jedan od onih koji se među prvima realizuju na nivou jedne države jeste digitalni model terena (DMT).

Višenamenski DMT koji pokriva državnu teritoriju sa nivoom tačnosti i detaljnosti na nivou karata krupnih i srednjih razmera (1:5000 - 1:50000) predstavlja solidnu osnovu za izvođenje brojnih aktivnosti čoveka na površini Zemlje. Oblasti primene ovakvog DMT-a obuhvataju: saobraćaj, telekomunikacije, vodoprivredu, zaštitu okoline, prostorno planiranje, vojne primene, brojna naučna istraživanja i druge. Kada je reč o primenama na polju geodezije i premera zemljišta, ovakav DMT je neophodan segment u digitalnoj kartografiji i ortofotoprodukciji, a vrlo značajnu ulogu ima i kod određivanja geoida visoke tačnosti koji je potreban za prevođenje GPS merenja iz WGS84 sistema u državni koordinatni sistem.

Veliki broj razvijenih država i država u razvoju su problemu izrade nacionalnog<sup>1</sup> DMT-a pristupile još pre nekoliko decenija. Rezultat tih napora je da danas većina tih država raspolaže podacima DMT-a koji sistematski pokrivaju cele teritorije tih država i, pod određenim uslovima, na raspolaganju su svim korisnicima koji ih potražuju.

U našoj državi se ovom problemu do danas nije pristupalo sa dovoljnom ozbiljnošću, tako da se sa sigurnošću može konstatovati da je situacija u tom pogledu krajnje nezadovoljavajuća, jer iako postoje brojni potencijalni korisnici takvog DMT-a, takav proizvod ne postoji. Svi pokušaji su svedeni na sporadične projekte prevođenja podataka sa postojećih podloga u digitalni oblik. S obzirom na metode koje su pri tome korišćene, kao i na dosta nizak nivo hardverske i softverske podrške kojom se pri tome raspolagalo, proizvodi koji su pri tome dobijeni vrlo su diskutabilnog kvaliteta. Sa druge strane, urađeni su brojni projekti u okviru kojih su dobijeni kvalitetni DMT podaci, ali ni tu se ne može govoriti o sistematskom pokrivanju celokupne državne teritorije. Ovakva situacija zahteva da se hitno, ali planski pristupi rešavanju ovog problema.

## 1.1 Predmet istraživanja

Predmet istraživanja sprovedenih u okviru ovog rada su metodologija i tehnološki postupci koje treba sprovesti da bi se uspešno realizovao projekat izrade nacionalnog DMT-a (DMT koji pokriva celokupnu državnu teritoriju) kojeg karakteriše relativno visoka rezolucija i tačnost. Optimalno rešenje, pored izbora optimalne količine i nivoa detaljnosti podataka, podrazumeva i primenu odgovarajuće tehnologije za prikupljanje, obradu i ažuriranje tih podataka. Ta tehnologija podrazumeva i obezbeđenje kontrole kvaliteta ciljnog DMT-a, tj. korišćenje postupaka koji omogućavaju postizanje zahtevanog kvaliteta, ali i procedure za kontinuiranu kontrolu kvaliteta za sve faze obrade.

---

<sup>1</sup> Termini "nacionalni DMT" i "DMT za teritoriju države" koriste se ravnopravno u ovom radu. I jedan i drugi termin označavaju DMT koji se formira za celokupnu državnu teritoriju ili bar njen veći deo.



Istraživanje obuhvata kritičku analizu svih postojećih tehnika za masovno prikupljanje podataka i izradu DMT-a. Na samom početku istraživanja pošlo se od toga da predloženo rešenje mora da respektuje postojeće stanje, pre svega nivo tehnološkog razvoja potencijalnih nosioca realizacije projekta izrade nacionalnog DMT-a, kao i raspoložive resurse. Može se slobodno reći da usvajanje navedenih pretpostavki već na startu istraživanja značajno umanjuje mogućnost primene nekih od najnovijih tehnologija, kao što su radarsko snimanje ili lasersko skeniranje iz vazduha. Pa ipak, ovim metodama je takođe posvećena odgovarajuća pažnja, pre svega u cilju sveobuhvatnog prikaza trenutnog stanja u svetu kada je reč o dostignućima nauke i prakse u oblasti prikupljanja i obrade DMT podataka, ali i zbog mogućnosti primene nekih od ovih metoda u skorije vreme kod nas. Potreba za analizom ovih metoda proizilazi i iz činjenice da se u domaćoj literaturi može naći vrlo malo tekstova koji se bave ovom problematikom na adekvatan način.

Tehnologija koja se vrlo često koristi za izradu nacionalnog DMT-a je digitalizacija postojećih podataka sa konvencionalnog kartografskog materijala. S obzirom na potencijalne mogućnosti primene ove tehnologije, centralni predmet istraživanja ovog rada su upravo metode i postupci za ocenu kvaliteta ovih podataka, kao i postupci za prevođenje ovih podataka u digitalni oblik i morfološki korektnu rekonstrukciju površi terena na osnovu tih podataka. Na prvi pogled, prevođenje ovih podataka u digitalni oblik i izrada DMT-a na osnovu njih ne predstavlja poseban problem. Međutim, da bi se iz tih podataka izvukao maksimum u pogledu kvaliteta dobijenog DMT-a, potrebna je posebna pažnja kod izbora odgovarajućih softverskih rešenja i algoritama. Tu se pre svega misli na rešenja koja bi se koristila za formiranje DMT-a na osnovu digitalizovanih izohipsi i ostalih informacija sa postojećih podloga. Da bi se postupak ubrzao i otklonile eventualne greške operatera, poželjno je uvođenje visokog stepena automatizacije u ceo proces rada. Velika količina podataka koja je neophodna da bi se formirao nacionalni DMT, kao i različite epohe i metode prikupljanja tih podataka, čine verifikaciju i ocenu kvaliteta tih podataka složenom. Zato je potrebno osmisliti efikasne i pouzdane metode za verifikaciju prikupljenih podataka.

Gore pomenuti ciljevi mogu se postići uz dobro osmišljenu tehnologiju rada, što podrazumeva i odgovarajuću softversku i hardversku podršku. Postojeća softverska rešenja iz oblasti GIS-a i digitalne kartografije omogućavaju izvođenje pojedinih zadataka na ovom poslu. Potrebno je obezbediti tesnu integraciju tih softverskih rešenja, ali i razviti nova rešenja, da bi se u celosti i na optimalan način podržala celokupna tehnologija.

Pravi efekat prikupljenih podataka dolazi do izražaja tek nakon njihovog organizovanja u odgovarajuće banke podataka, pa istraživanje obuhvata i problematiku vezanu za arhiviranje i ažuriranje prikupljenih podataka, kao i distribuciju tih podataka do krajnjih korisnika. S tim u vezi, a posebno imajući u vidu neophodnost kombinovanja različitih tipova podataka dobijenih iz različitih izvora, i njihove skupne analize u okviru heterogenih hardverskih i softverskih okruženja, razmatrani su i standardi koji su prisutni u ovoj oblasti.

## 1.2 Cilj istraživanja

Glavni cilj istraživanja je razvoj metodologije i tehnoloških postupaka za prikupljanje, obradu, arhiviranje, održavanje i distribuciju podataka DMT-a za teritoriju cele države. Pri tome se podrazumeva da se istraživanje prvenstveno fokusira na uslove koji postoje u našoj državi, ali to nikako ne isključuje i primenljivost razvijenih metoda i postupaka za primene u drugim slučajevima. Postizanje ovog cilja podrazumeva izvođenje sledećih aktivnosti:

- analiza savremenih tehnologija za masovno prikupljanje podataka DMT-a, s obzirom na potrebne resurse, kvalitet DMT-a, efikasnost, troškove i sl.;
- sprovođenje eksperimenata sa ciljem utvrđivanja kvaliteta informacija o terenu sadržanih na postojećim podlogama;
- razvoj tehnologije za izradu DMT-a na osnovu postojećih podloga;
- analiza mogućnosti primene postojećih i razvoj novih numeričkih postupaka i softverskih alata za prikupljanje i verifikaciju podataka i rekonstrukciju površi terena na osnovu digitalizovanih izohipsi, rasutih tačaka i dodatnih informacija o terenu;

- eksperimentalnu proveru nad izabranim kartografskim podlogama u cilju postizanja objektivne verifikacije razvijenih postupaka i softvera, kao i dobijanja objektivne procene kvaliteta ciljelog DMT-a;
- identifikaciju problema i predlog rešenja vezanih za obradu, arhiviranje i ažuriranje podataka DMT-a.

Nakon realizacije navedenih aktivnosti mogu se očekivati i sledeći rezultati:

- pregled i kritička analiza svih savremenih relevantnih tehnika za masovno prikupljanje podataka DMT-a, a posebno sa aspekta upotrebljivosti za izradu nacionalnog DMT-a u uslovima koji trenutno vladaju u našoj zemlji;
- predlog optimalne metodologije za formiranje nacionalnog DMT-a;
- predlog odgovarajućih softverskih rešenja za podršku predloženoj metodologiji formiranja nacionalnog DMT-a;
- numerički postupci i algoritmi za prikupljanje, verifikaciju i kontrolu kvaliteta prikupljanja podataka visinske predstave i njihova originalna softverska realizacija;
- objektivna ocena kvaliteta visinskih informacija sadržanih na postojećim podlogama;
- numerički postupci, algoritmi i originalni softver za vernu, morfološki korektnu rekonstrukciju površi terena na osnovu digitalizovanih izohipsi i ostalih informacija sa postojećih podloga;
- objektivna ocena kvaliteta DMT-a koji se može dobiti na osnovu postojećih podloga, po predloženoj metodologiji i uz primenu razvijenih numeričkih postupaka;
- predlog rešenja vezanih za probleme arhiviranja i održavanja podataka nacionalnog DMT-a.

Da bi se uspešno realizovali ovako ambiciozno postavljeni ciljevi za očekivati je da se u okviru istraživanja iskoriste najnovija saznanja i dostignuća iz više disciplina.

Poznavanje tehnologije rada koja je korišćena kod izrade topografskih karata predstavlja osnovu za kvalitetno korišćenje svih informacija datih na ovim podlogama, ali i za analizu tačnosti ovih podataka. Da bi se iz ovih podataka izvukao maksimum neophodno je osmisliti tehnologiju u okviru koje će se minimizirati uticaj raznih izvora grešaka na konačni DMT (greške skeniranja, georeferenciranja, vektorizacije, interpolacije, itd.) i obezbediti odgovarajuća kontrola kvaliteta u okviru svake od tehnoloških faza. Kod razvoja i implementacije nove tehnologije neizbežno je korišćenje najnovijih saznanja iz geodezije i fotogrametrije, matematike, računarske grafike, informatike i drugih naučnih disciplina. Statistička obrada i modeliranje podataka zauzimaju u tom pogledu značajno mesto u ovom istraživanju. Da bi se pokazalo i dokazalo da su razvijena metodologija i numerička rešenja primenljiva u praksi i da treba očekivati rezultate zadovoljavajućeg kvaliteta, neophodno je osmisliti i realizovati čitav niz obimnih eksperimenata nad realnim i simuliranim podacima.

### 1.3 Polazne pretpostavke i trenutni status istraživanja

Pri izradi ovog rada pošlo se od nekoliko osnovnih pretpostavki. Proces formiranja i održavanja DMT-a za teritoriju države zahteva značajno angažovanje resursa. On obuhvata čitav niz kompleksnih postupaka koji zahtevaju detaljnu analizu i razradu tehnologije, posebno sa aspekta primenljivosti u konkretnim uslovima. Ne sme se zanemariti činjenica da postoje relativno bogata iskustva i saznanja iz ove oblasti koja treba uzeti u obzir, a posebno treba tretirati mogućnost primene najnovijih naučnih saznanja i tehnologija koje trenutno nisu dovoljno zastupljene u našoj teoriji i praksi.

Poslednjih nekoliko godina posebno je primetan razvoj i primena sistema sa takozvanim aktivnim sensorima za dobijanje digitalnih podataka o površi terena, kao što su radarska interferometrija (InSAR) i laserska merenja (LiDAR). Ove tehnike karakteriše vrlo velika efikasnost i visoka tačnost, posebno kada je u pitanju laserska metoda. Najveći nedostaci ovih metoda odnose se na ekonomske aspekte primene ovih sistema u našim uslovima, kao i na probleme vezane za otklanjanje grešaka u podacima merenja. Ove greške nastaju određivanjem visina u tačkama koje ne leže na površi terena, već na krovovima zgrada, krošnjama drveća i slično, što je kod ovih sistema uobičajena pojava. Zbog toga su u svetu u toku



intenzivna istraživanja sa ciljem efikasnog otklanjanja ovih grešaka. Ova istraživanja, kao uostalom i sva druga koja su tesno povezana sa najnovijim tehnikama prikupljanja podataka o prostoru, pa i DMT podataka, vrlo je teško realizovati u našim uslovima s obzirom na tehnološki zastarelu hardversku i softversku opremljenost naših geodetskih i fotogrametrijskih ustanova i preduzeća.

Sa druge strane, na svetskom tržištu postoji ponuda raznovrsnih podataka koji mogu biti interesantni za dobijanje nacionalnog DMT-a. Tu se pre svega misli na podatke koji se svakodnevno prikupljaju u okviru brojnih satelitskih misija. Ti podaci se kreću od sirovih snimaka dobijenih klasičnim optičkim sensorima, preko radarskih snimaka različitog nivoa obrade, pa sve do gotovih DMT-a. Ono što karakteriše sve ove proizvode je ažurnost, relativno niska, ali i ujednačena i jasno dokumentovana tačnost. U istraživanju se pošlo od pretpostavke da se obradom podataka kojima naše institucije već raspolažu može postići DMT iste ili više tačnosti, uz znatne prednosti u smislu ekonomičnosti i prava raspolaganja ovim podacima. Međutim, to nikako ne znači da ne treba sprovesti opsežnu analizu stanja i kvaliteta ponude ovim podacima na svetskom tržištu informacija. Potrebno je ispitati i mogućnosti za korišćenje ovih podataka kao dopune podacima kojima naša zemlja već raspolaže, ali i dati prognoze kako će se stvari u budućnosti odvijati u tom pogledu.

S obzirom da se radi o velikoj količini podataka, problem organizacije, arhiviranja i održavanja ovih podataka nije trivijalan i zahteva posebna razmatranja i iznalaženje odgovarajućih rešenja.

Neke od značajnijih pretpostavki vezanih za razvoj postupaka za izradu DMT-a na osnovu postojećih podloga su:

- državne institucije poseduju veliku količinu podataka o visinskoj predstavi terena u kartografskom obliku i njihovo korišćenje za izradu nacionalnog DMT-a predstavlja potencijalno najekonomičniji postupak u odnosu na druga moguća rešenja;
- kvalitet ovih podataka u smislu ažurnosti, kompletnosti, tačnosti i sl. je jedan od osnovnih faktora koji utiče na kvalitet DMT-a koji se na osnovu njih izrađuje; stoga je neophodno dati objektivnu ocenu kvaliteta tih podataka preko ovih pokazatelja;
- izrada kvalitetnog DMT-a na osnovu ovih podataka podrazumeva iznalaženje odgovarajućih numeričkih postupaka koji će respektovanjem svih raspoloživih informacija obezbediti morfološki korektnu rekonstrukciju površi terena;
- posebno je interesantna mogućnost automatske detekcije i ekstrakcije strukturnih linija terena; uključivanjem tih linija u DMT znatno se poboljšava njegov ukupni kvalitet, a istovremeno se omogućava redukcija podataka koje treba arhivirati i održavati na optimalnu meru.

Trenutna istraživanja u oblasti digitalnog modeliranja terena su u najvećoj meri usmerena na unapređenje postojećih i razvoj novih postupaka za prikupljanje i obradu podataka DMT-a primenom laserske i radarske metode, kao i u oblasti digitalne fotogrametrije. Najveća pažnja se posvećuje postizanju potpuno automatizovanih procedura za prikupljanje podataka, a samim tim i problemu otklanjanja grešaka iz rezultata merenja, tj. filtriranje podataka. To se postiže primenom odgovarajućih filtera, korišćenjem višestrukih povratnih signala kod LiDAR-a za područja pod vegetacijom, ili detekcijom objekata kroz analizu sirovih podataka snimanja radarskim, laserskim ili fotogrametrijskim sensorima. Pored problematike vezane za otklanjanje grešaka u podacima, istraživanja u ovoj oblasti su takođe usmerena i na podizanje kvaliteta prikupljenih podataka razvojem automatizovanih postupaka za ekstrakciju strukturnih linija i objekata na površi terena iz podataka merenja. Naučna istraživanja na polju digitalnog modeliranja terena se poslednjih godina sve više fokusiraju na probleme vezane za:

- korišćenje i obradu podataka primenom LiDAR-a (*Axelsson 2000, Briese 2004, Crombaghs 2000, Huising 1998, Hyyppä 2000, Masaharu 2000, Morgan 2000, Petzold 2000*) i InSAR-a (*Damoiseaux 2000, Li 2004, Mercer 1998, Morley 2000, Soergel 2000, Tighe 2000*).
- filtriranje šumova iz podataka, uglavnom onih dobijenih iz LiDAR snimanja (*Kraus 1998, Kraus 1999, Lohmann 2000, Pfeifer 2001*);
- detekciju strukturnih linija i objekata na površi terena na osnovu podataka snimanja (*Brügelmann 2000, Briese 2004*);
- obradu i korišćenje podataka iz SAR satelitskih misija za formiranje DMT-a (*Bamler 1999, Shipping 2000, Werner 2001*);
- obradu i korišćenje podataka iz SPOT satelitskih misija za formiranje DMT-a (*Fraser 2004, Muller 2004, Michalis 2004, Poli 2004, Rudovski 2004*);

- integraciju podataka DMT-a sa ostalim prostornim informacijama i formiranje 3D GIS baza podataka;
- objektivnu ocenu kvaliteta i pouzdanosti, odnosno nesigurnosti DMT-a i informacija koji se dobijaju analizom DMT-a (*Delgado 2000, Kraus 2004, Weng 2001*);
- rukovanje podacima DMT-a koji pokrivaju celokupne teritorije država (*Garland 1995, Hochstöger 1996, Peng 2004, Ruiz 2000*);
- 3D vizuelizaciju velikih setova podataka koji se odnose na teren (*Danovaro 2003, Duchaineau 1997, Floriani 2004, Fritsch 2004, Garland 1995, Gerstner 1999, Hoppe 1998, Lindstrom 1996, Lindstrom 2002, Pajarola 2002, Wang 2004, Wigenhagen 2000*).

Naravno, sva skorija istraživanja se u velikoj meri oslanjaju na rezultate istraživanja postignute u poslednjih nekoliko decenija. Ta prethodna istraživanja su se bavila problemima iznalaženja kvalitetnih i efikasnih metode interpolacije, tj. modeliranja površi terena na osnovu prikupljenih podataka, organizaciju i strukturiranje podatka (*Cebecauer 2002, Hardy 1990, Mitasova 1993, Mitas 1999, Wood 1996*). Ova istraživanja su danas manjeg intenziteta, ali su još uvek dosta aktuelna. U velikoj meri se koriste rezultati ostvareni u drugim naučnim disciplinama. Poseban primer za to su dostignuća iz oblasti kompjuterski podržanog grafičkog projektovanja (engl. *CAGD – Computer Aided Geometric Design*) koja sve više nalaze primenu i kod modeliranja površi terena (*Barnhil 1981, Franke 1984, Farin 1993, Mann 1998, Pfeifer 2002*).

S obzirom da se za digitalno modeliranje terena često koristi struktura podataka u formi nepravilne mreže trouglova – TIN (engl. *TIN – Triangulated Irregular Network*), ova istraživanja su takođe vrlo interesantna za realizaciju ciljeva istraživanja u ovom radu. Algoritmi i strukture podataka za formiranje TIN-a (*Bowyer 1981, Fortune 1987, Dwyer 1987, Guibas 1985, Ruiz 2000, Shewchuk 1996, Shewchuk 1997, Su 1995, Su 1997*) i optimizaciju TIN-a (*Ruppert 1995, Shewchuk 1997, Shewchuk 2001*) su predmet velikog broja istraživanja. Isto tako, razvijene su brojne metode za modeliranje površi na osnovu TIN-a (*Barnhil 1981, Farin 1993*). Posebno je aktuelna problematika predstavljanja 3D površi u parametarskom obliku preko trougaonih Bézierovih zakrpa (*Mann 1992, Mao 2005, Pfeifer 2002*), pri čemu je veliki deo istraživanja usmeren na filtriranje podataka i optimizaciju funkcionala površi da bi se dobila glatka površi (*Desbrun 1999, Desbrun 2000, Kobbelt 2004*). Ova istraživanja su interesantna i zbog velike zastupljenosti TIN strukture podataka za vizuelizaciju velikih 3D modela, gde se vrši optimizacija modela u zavisnosti od karakteristika površi i udaljenosti od posmatrača (*Danovaro 2003, Floriani 2004, Garland 1995, Hoppe 1998, Kobbelt 1998*).

Istraživanja vezana za formiranje DMT-a na osnovu podataka dobijenih sa postojećih podloga su već u završnoj fazi i uglavnom su fokusirana na problem automatizacije procesa digitalizacije podataka i morfološki korektno modeliranje površi terena. Kada je u pitanju automatizacija procesa digitalizacije podataka, istraživanja su uglavnom fokusirana na probleme automatske ili poluautomatske vektorizacije izohipsi, kao i automatizaciju postupaka za povezivanje izohipsi na spojevima karata, povezivanje prekinutih izohipsi i dodeljivanje visina izohipsama (*Wu 1992, Wu 1993*). U fazi modeliranja površi terena na osnovu digitalizovanih izohipsi najveći deo istraživanja je usko povezan sa problemom automatskog otkrivanja strukturnih linija terena na osnovu digitalizovanih izohipsi (*Schneider 1995, Schneider 1998, Peng 1996, Aumann 1990, Aumann 1992, Heitzinger 2001, Pilouk 1992, Dakowicz 2002, Dakowicz 2002a, Gold 2000, Gold 2002, Tang 1991, Tang 1992, Tang 1992a, Thibault 2000*), ali i na neke druge metode koje obezbeđuju dobijanje morfološki korektnog DMT-a (*Hutchinson 1988, Hutchinson 1989, Hutchinson 1996*).

Rezultati i dostignuća prethodnih istraživanja, od kojih neka nisu iz oblasti geo-nauka, imaju vrlo značajnu ulogu za razvoj metoda, postupaka i softvera u okviru ovog istraživanja. S obzirom da je samo istraživanje usmereno na jednu relativno široku oblast očekuje se primena čitavog niza različitih metoda i postupaka. Zato su trenutni status i rezultati relevantnih istraživanja posebno predstavljeni u okviru onih poglavlja ovog rada koja su posvećena konkretnoj problematici.

Izučavanju pomenute problematike kod nas nije posvećeno dovoljno pažnje. Iako se digitalno modeliranje terena već duže vremena kod nas praktikuje, ipak je ono svedeno na korišćenje postojećih softverskih alata. Ti alati često koriste numeričke postupke koji, ili nisu dovoljno dokumentovani, ili su neprikladni za konkretnu primenu. Procedure za verifikaciju prikupljenih DMT podataka su nedovoljno razvijene i, po pravilu, nisu podržane kvalitetnim softverskim alatima. Nisu sprovedena istraživanja sa ciljem utvrđivanja prikladnosti pojedinih metoda za interpolaciju i formiranje DMT-a na osnovu različitih izvora podataka. Kvalitet podataka sa kojima se raspolaze je takođe neodređen. Procena je da će ovo istraživanje značajno popraviti postojeću situaciju i postaviti solidne temelje za dalja istraživanja. Ta



očekivanja se posebno odnose na softverske alate koje treba razviti u okviru ovog istraživanja i koji treba da podrže efikasno prikupljanje i verifikaciju DMT podataka.

## 1.4 Pregled sadržaja rada

U poglavlju 1 su predstavljeni predmet i ciljevi ovog istraživanja, kao i polazne pretpostavke za realizaciju postavljenih ciljeva istraživanja. U sažetom obliku je predstavljena struktura samog istraživanja i struktura ovog rada.

U poglavlju 2 je dat jedan kritički osvrt i analiza svih relevantnih izvora podataka i tehnika za prikupljanje i primarnu obradu podataka za formiranje nacionalnog DMT-a. Analiza je obuhvatila specifičnosti svake od razmatranih metoda, s obzirom na tehnologiju, kvalitet prikupljenih podataka, ekonomičnost i efikasnost. Da bi se ova komparativna analiza upotpunila, analizirani su i oni izvori podataka i metode za koje se unapred moglo sa određenim nivoom sigurnosti pretpostaviti da nisu u stanju da obezbede podatke čiji bi kvalitet bio viši ili bar u rangu kvaliteta podataka raspoloživih na postojećim topografskim podlogama. Primer ovakvih izvora podataka su neke od satelitskih misija (ERS 1/2, SRTM). Takođe su obuhvaćene i one metode koje se u svetu već koriste za potrebe formiranja nacionalnog DMT-a, ali čija je primena u našim uslovima, pre svega zbog visoke cene, nerealna u ovom trenutku (laserska metoda). Materija iz ovog poglavlja poslužila je kao osnov za donošenje objektivne ocene mesta i uloge ovih metoda i izvora podataka u procesu formiranja i održavanja nacionalnog DMT-a. Jedan od ciljeva je bio i da se na osnovu materije izložene u okviru ovog poglavlja stručna i naučna javnost kod nas upozna sa trenutnim statusom na polju prikupljanja masovne količine DMT podataka za velika područja.

U poglavlju 3 analizirane su tehnike i postupci za formiranje DMT-a. Iako je ova materija kod nas već razmatrana i dokumentovana u okviru nekih istraživanja (*Cvijetinović 1995*), ipak je procena autora ovog rada da bi bilo celishodno da se jedna takva analiza izvede i u okviru ovog rada. Naime, u poslednjoj deceniji došlo je do novih saznanja i razvijene su nove numeričke metode (metode interpolacije, algoritmi za formiranje TIN-a). Neke od ovih metoda su implementirane i u okviru komercijalnih softverskih alata. Posebna pažnja je posvećena algoritmima za formiranje TIN-a i njegovu optimizaciju. Predstavljene su i tehnike modeliranja glatke površi terena na osnovu TIN-a korišćenjem metoda razvijenih pre svega za potrebe kompjuterski podržanog geometrijskog projektovanja (engl. *CAGD – Computer Aided Geometric Design*). Posebno su razmatrani aspekti primene ovih metoda za potrebe verifikacije i obrade velike količine prostornih podataka koji se odnose na površ terena. S obzirom na značaj koji imaju za verifikaciju DMT-a, razmatrane su i savremene metode za 3D vizuelizaciju velikih modela terena sastavljenih od nekoliko stotina hiljada, pa čak i miliona visinskih tačaka. Sve ovo je od izuzetnog značaja kada je u pitanju razvoj metodologije za formiranje nacionalnog DMT-a. Istovremeno, autoru je omogućeno da na osnovu izložene materije iz ovog poglavlja, lakše i u sažetijem obliku u narednim poglavljem predstavi sopstveni razvoj procedura i numeričkih postupaka.

Poglavlje 4 predstavlja centralno mesto ovog istraživanja. U okviru ovog poglavlja predstavljen je razvoj numeričkih postupaka za formiranje i verifikaciju DMT-a, kao i softverska implementacija razvijenih postupaka. Opisana je osnovna koncepcija na kojoj je zasnovan razvoj tih postupaka i softverska okruženja koja su korišćena za realizaciju tih postupaka. U nastavku su detaljno prikazani algoritmi i numerički postupci za formiranje DMT-a korišćenjem TIN-a. Veliki deo istraživanja je usmeren na verno i geomorfološki korektnu rekonstrukciju površi terena na osnovu izohipsi, kao dominantne strukture podataka dobijenih digitalizacijom postojećih podloga. Takođe su predstavljena i rešenja koja su razvijena za potrebe verifikacije i ocene kvaliteta velike količine DMT podataka. Jedan od ciljeva razvoja je bio i da se ostvare takva rešenja koja će se moći koristiti za sve vrste prikupljenih podataka i da se podrži što veći broj savremenih metoda rada, a ne samo digitalizacija postojećih podloga. Konačno, izvršena je i opisana eksperimentalna provera razvijenih rešenja i odgovarajuće softverske implementacije. Provera je izvedena na osnovu realnih i simuliranih DMT podataka. Ti podaci su obrađeni standardnim GIS i DMT softverskim alatima, kao i softverskim alatima razvijenim u okviru ovog istraživanja. Uporedna analiza dobijenih rezultata omogućila je donošenje objektivnih zaključaka u pogledu kvaliteta i primenljivosti razvijenih numeričkih postupaka i njihove softverske implementacije.

Poglavlje 5 sadrži predlog metodologije i tehnoloških postupaka za formiranje nacionalnog DMT-a. Metodologija formiranja nacionalnog DMT-a razvijena je uz respektovanje postojećih svetskih iskustava i okvirnih uslova kod nas, a posebno u pogledu kvaliteta raspoloživih podataka. Zato su te okvirne pretpostavke posebno razmatrane u okviru ovog poglavlja. Na osnovu ove analize i analize sprovedene u

poglavlju 2 predložena je metodologija formiranja DMT-a koja se u najvećoj meri bazira na pretpostavci da se na osnovu podataka sa postojećih vojnotopografskih karata razmere 1:25000 (TK25), uz korišćenje postojećih resursa i sa relativno skromnim ulaganjima, može dobiti solidan DMT za celokupnu državnu teritoriju. Ova pretpostavka je argumentovana kroz proračun tačnosti korišćenjem empirijskih i eksperimentalnih iskustava vezanih za tačnost podataka sa TK25. Da bi se to dodatno potvrdilo, izveden je i obiman eksperiment upoređenja podataka digitalizovanih sa TK25 podloga sa tačnijim podacima iz drugih izvora. U nastavku su detaljno razrađeni tehnološki postupci digitalizacije podataka sa postojećih karata, njihova obrada i verifikacija. Razmatrani su i postupci i rešenja za finalnu obradu prikupljenih podataka i njihovo arhiviranje, eksploataciju i održavanje. U završnom delu poglavlja dat je prikaz rezultata eksperimentalne verifikacije celokupne predložene metodologije. Formirano je više DMT-ova dobijenih na osnovu velike količine podataka digitalizovanih sa postojećih TK25 podloga. Izabrana su reprezentativna područja terena koja pokrivaju značajan deo teritorije Srbije. Kvalitet ovih modela terena je ocenjivan korišćenjem kvalitetnijih podataka. Na osnovu velikog broja visina dobijenih iz različitih izvora izvršena je uporedna analiza rezultata sa odgovarajućom statističkom obradom. Dobijeni su pouzdani pokazatelji na osnovu kojih je data objektivna ocena i verifikacija predložene metodologije i ciljnog DMT-a.

Poglavlje 6 sadrži zaključna razmatranja. Ukratko su predstavljeni postignuti rezultati, a date su i preporuke i smernice za dalja istraživanja.







## 2 SAVREMENE METODE PRIKUPLJANJA I IZVORI PODATAKA ZA DIGITALNO MODELIRANJE TERENA

Poslednjih godina, svedoci smo velikog napretka na polju usavršavanja postojećih i razvoja potpuno novih tehnika za prikupljanje i obradu ogromne količine podataka o objektima i pojavama na zemljinoj površini. To je pre svega posledica ostvarenih napredaka na polju primene računara u fotogrametriji i razvoja digitalne fotogrametrije, kao i pojave potpuno novih tehnika, kao što su radarsko snimanje i lasersko skeniranje iz vazduha. Ove tehnike, a posebno lasersko skeniranje, otvorile su nove mogućnosti na polju izrade 3D modela gradova i objekata (rafinerije, razna postrojenja i sl.). Pojava velikog broja kvalitetnih senzora (pasivnih i aktivnih) i lansiranje satelita koji su poneli pasivne i aktivne senzore u Zemljinu orbitu omogućila je pokrivanje celokupne planete sa podacima DMT-a relativno visoke tačnosti i rezolucije (Werner 2001, Bamler 1999).

Ono što je do juče delovalo teško ostvarljivo, danas je realnost. Zato je vrlo važno praćenje rezultata naučnih istraživanja u ovoj oblasti, jer ono što je danas predmet tih istraživanja, već koliko sutra može predstavljati nešto što je upotrebljivo u praksi. Rezultati tih istraživanja, kao i iskustva u njihovoj primeni u praksi, danas su, između ostalog zahvaljujući i globalnoj računarskoj mreži – Internetu, relativno pristupačni svima, pa to olakšava i transfer tehnologije i znanja kada se za to ukaže potreba i mogućnost.

Obrada podataka za formiranje DMT-a krupne i srednje razmere je uglavnom koncentrisana na otklanjanje šumova nastalih odbijanjem elektromagnetskih talasa od krovova zgrada i krošnji drveća, a ne od površi terena (Kraus 1998, Kraus 1999, Lohmann 2000, Pfeifer 2001). Isto tako, stalno se radi na daljem usavršavanju algoritama za automatsko generisanje DMT-a primenom tehnika podudarnosti slika (engl. *Image Matching*), kao i algoritama za prepoznavanje objekata (engl. *Object Recognition*). Prepoznavanje objekata je od posebnog značaja kod izrade 3D modela i GIS baza podataka gradova, ali i u oblasti bliskopredmetne fotogrametrije.

S obzirom na velike promene koje se poslednjih godina dešavaju u ovoj oblasti, postavlja se opravdano pitanje: koji su trenutne mogućnosti, dometi i ograničenja pojedinih tehnika, metoda i algoritama? Vrlo često smo svedoci da se u reklamnom materijalu za nove instrumente, softver ili tehnologije mogu naći podaci o njihovim performansama koji ponekad značajno odstupaju od rezultata ostvarenih u praktičnim primenama ili naučnim ispitivanjima.

Upravo zato, u ovom poglavlju daje se pregled i kritička analiza trenutnih dostignuća na polju prikupljanja i obrade podataka DMT-a, a posebno sa aspekta mogućnosti primene kod formiranja nacionalnog DMT-a. Nisu posebno razmatrane terenske metode prikupljanja podataka DMT-a korišćenjem totalnih stanica, GPS uređaja ili nivelmanskih instrumenata. Ovo je sasvim razumljivo ako se ima u vidu da je cilj prikupljanje izuzetno velike količine podataka koji se odnose na teritoriju cele države, kao i da se radi o relativno umerenim zahtevima u pogledu tačnosti DMT-a.

Imajući na umu gore navedeno, u ovom poglavlju su posebno obrađene sledeće metode prikupljanja podataka DMT-a:

- fotogrametrijske metode (aerofotogrametrija i podaci iz optičkih senzora satelitskih misija);
- metoda laserskog skeniranja iz vazduha (LiDAR, ALS);
- radarsko snimanje (SAR, InSAR);
- prikupljanje podataka sa postojećih podloga.



Treba reći da se metoda prikupljanja podataka sa postojećih podloga ne može okarakterisati kao savremena metoda prikupljanja DMT podataka, ali je ona svakako realna opcija i mora se ozbiljno razmotriti u svim slučajevima kada podloge sa tim podacima već postoje.

## 2.1 Fotogrametrija

Fotogrametrijske metode već nekoliko decenija predstavljaju dominantne metode kada je u pitanju prikupljanje masovne količine podataka o pojavama i objektima na fizičkoj površi zemlje. Njihovom primenom postiže se vrlo visoka efikasnost, ekonomičnost i vrlo širok raspon tačnosti, što fotogrametriju čini prihvatljivom za raznovrsne primene.

Sa pojavom digitalnih skenera za snimanje površi terena iz aviona stvoreni su uslovi za dalji napredak u oblasti fotogrametrijskog snimanja i obrade. Ovi skeneri su u stanju da registruju digitalne slike sa veličinom piksela na terenu od 50-10cm, pa čak i 5cm. Sa vrlo visokom geometrijskom preciznošću i četiri multispektralna pojasa oni pružaju mnogo više informacija nego što je to bilo moguće sa običnim aerofotogrametrijskim kamerama (Moeller 2000).

Kada je u pitanju prikupljanje primarnih podataka za izradu DMT-a, jedini konkurenti fotogrametrijskoj metodi snimanja terena su radarsko snimanje (InSAR) i lasersko skeniranje iz vazduha (LiDAR). I ove dve metode daljinske detekcije, baš kao i fotogrametrijska metoda snimanja terena, zasnivaju se na registrovanju signala dobijenih od površi terena pomoću senzora koji se nalaze na nekoj platformi, bilo da je reč o avionu, satelitu ili nekoj drugoj letelici.

### 2.1.1 Aerofotogrametrijsko snimanje terena

Klasičan način aerofotogrametrijskog snimanja površi terena za potrebe izrade DMT-a podrazumeva korišćenje aerofotogrametrijske kamere montirane na trupu aviona. Snimanje se standardno radi sa panhromatskim filmom. Dobijeni fotomaterijal se, nakon fotolaboratorijske obrade, koristi kao osnova za prikupljanje podataka o objektima i pojavama na površi terena. Kao što je poznato, osnovni preduslov da bi se dobijeni fotomaterijal uopšte mogao koristiti za merenje trodimenzionalnih koordinata tačaka na terenu, odnosno za dobijanje trodimenzionalne predstave o objektima i pojavama na površi terena, je da se snimanje izvodi sa odgovarajućim preklapom između snimaka.

Visine sa kojih se snimanje izvodi kreću se od 750m do 6000m, u zavisnosti od zahtevane razmere snimanja i žižne daljine aerofotogrametrijske kamere kojom se snimanje izvodi. Razmera snimanja se bira u zavisnosti od razmere kartiranja, tj. tačnosti i nivoa detaljnosti podataka koji se prikupljaju sa snimljenog fotomaterijala. Standardne razmere snimanja iznose od 1:4000 do 1:40000. U skladu sa time, površina terena koja se preslika na jedan standardni fotogrametrijski snimak formata 23x23cm kreće se od 0.85km<sup>2</sup> do 85.6km<sup>2</sup>. Aerofotogrametrijskim snimanjem u nekoj od spomenutih razmera dobija se fotomaterijal koji predstavlja osnov za prikupljanje podataka o visinskoj predstavi terena u vrlo širokom rasponu tačnosti, od jednog decimetra pa do nekoliko metara.

Pored standardnih film kamera, danas su u upotrebi i digitalne kamere, tj. optički senzori koji, po principu skeniranja registruju digitalne slike. Time se štedi na fotolaboratorijskoj obradi snimljenog materijala i na skeniranju snimaka za potrebe digitalnog fotogrametrijskog merenja i dalje obrade. Tu su značajne i druge prednosti digitalne kamere: bolji kvalitet slike, uspešnije automatske procedure za obradu, veliki preklap u pravcu leta bez dodatnih troškova (ovo ima direktan uticaj na mnogo kvalitetnije automatsko merenje DMT-a), manje zaklonjenih područja u urbanim sredinama, nema deformacija slike, i druge. Procena je da će se sa prelaskom na digitalne senzore cena aerofotogrametrijskog snimanja prepoloviti (Leberl 2004). Iako se ova nova tehnologija brzo prihvata, ipak treba očekivati dug period prelaska sa analognih kamera i dominaciju digitalnih senzora. Razlog je svakako u velikom broju analognih kamera koje su u operativnom stanju, a u koje su uložena značajna sredstva.

Digitalne kamere su zasnovane na zameni filma kod analogne kamere sa čvrstim sensorom koji se instalira u žižnoj ravni kamere. Optički senzor može biti razvijen korišćenjem dveju tehnologija:

- CCD (engl. *Charge-Coupled Device*), i
- CMOS (engl. *Complementary Metal-Oxide Semiconductor*).

Kod CCD tehnologije elektroni koje proizvodi svetlost koja padne na foto-diodu se smeštaju (akumuliraju) za svaku ćeliju senzora posebno, a zatim se elektronski dobijeni elektroni (napon) očitavaju tako što se taj sadržaj prenosi od datog piksela kroz druge piksele koji leže u istom nizu piksela senzora. Zato CCD čip karakteriše komplikovana izrada, jer se zahteva visoka efikasnost prenosa akumuliranog napona, za razliku od CMOS tehnologije gde se konverzija akumuliranih napona iz analognog u digitalni oblik radi za svaku ćeliju senzora posebno. CMOS je inače standardna tehnologija koja se koristi za masovnu proizvodnju mikroprocesora i memorijskih čipova.

Razlike između CMOS i CCD tehnologije za proizvodnju optičkih senzora (*McGlone 2004*):

- CCD proizvodi slike visokog kvaliteta i bez šuma, dok je CMOS osetljiviji na šum;
- CMOS senzori su manje osetljivosti (0.5 naprema 0.9 faktor popunjenosti piksela, tj. površina piksela koja je osetljiva);
- CMOS koristi znatno manje energije;
- CCD se proizvode duže vreme i imaju veću rezoluciju slike, dok je CMOS relativno nova tehnologija koja se brzo razvija.

Format slike izražen u broju piksela kod savremenih digitalnih senzora se okvirno kreće od od 2000 do 9200 piksela. Još jedan od parametara kojim se karakteriše digitalni senzor je veličina piksela digitalne slike i on se kreće od 5-15 $\mu$ m, a najčešće je to oko 9 $\mu$ m. Čip sa najvećom CCD površinom proizvedenom do sad je CCD595 čip firme *BAE Systems* sa 9216x9216 piksela i veličinom piksela od 8.75 $\mu$ m.

U principu digitalni fotogrametrijski senzori se izrađuju u vidu frejm digitalnih kamera (engl. *Frame Digital Camera*) velikog formata kojima se dobijaju klasični fotogrametrijski snimci u centralnoj projekciji, ali u digitalnom formatu. Predstavnici frejm digitalnih kamera velikog formata su *DMC* (engl. *Digital Modular Camera*) kamera firme *Z/I Imaging* i kamera *UltraCAM* firme *Vexcel*. Obe kamere rade na principu formiranja digitalne slike mozaikovanjem digitalnih slika dobijenih istovremenim registrovanjem od strane više zasebnih digitalnih kamera tj. čipova. Kod kamere *DMC* to su četiri čipa dimenzija 7Kx4K piksela za panhromatsko snimanje i četiri čipa dimenzija 3Kx2K piksela za multispektralno snimanje. Kod *UltraCAM* kamere koristi se 13 CCD čipova sa kojima se, nakon mozaikovanja, dobija panhromatska digitalna slika dimenzija 11500x7500 piksela, dok je kolor snimak dimenzija 4Kx2.7K. Prednost kamere *UltraCAM* je što je u stanju da registruje snimke u intervalu manjem od jedne sekunde, za razliku od *DMC* kamere kod koje je ovo vreme dve sekunde. Ovo omogućava da se sa *DMC* kamerom ostvari veliki poprečni preklap, što je posebno važno za automatsku ekstrakciju DMT-a i ortofotoprodukciju.

Drugi način da se teren snimi aerofotogrametrijski u digitalnom obliku je korišćenje digitalnih kamera-senzora zasnovanih na principu skeniranja korišćenjem linijskih CCD čipova (engl. *Linear Array CCD*). Ove kamere obično rade na principu skeniranja sa tri linijske kamere (engl. *Three-line Camera*). Ove tri kamere skeniraju teren u nadiru, ispred i iza nadira, respektivno, u kontinuitetu i bez prekida. Na taj način se dobija 100% trostruko pokrivanje površi terena, što pruža velike prednosti kod dalje obrade snimljenog materijala. Te prednosti se ogledaju u geometriji slike i kod korišćenja procedura za podudarnost slika (engl. *Image Matching*). Kada je reč o geometriji slike, otvara se mogućnost izrade "pravog" ortofotoa, jer zgrade registrovane sensorom koji snima u nadiru, a koje su u centralnom delu trake kojom se teren skenira, nemaju zakošenja odnosno mrtvih uglova. Drugim rečima, na slici se osnova krova poklapa sa osnovom temelja. Izvestan problem kod ovih kamera predstavlja to što ovakva nestandardno geometrija snimljenog materijala zahteva posebne procedure za obradu, pa nije moguće korišćenje standardnih fotogrametrijskih postupaka i softvera. Predstavnici ove vrste kamera su *ADS40* (engl. *Airborne Digital Sensor*) firme *Leica Geosystems*, *HRSC* senzor firme *DLR* i *TLS* kamera japanskog proizvođača. Širina trake kojom se teren skenira u panhromatskom modu kod kamere *ADS40* je 12000 piksela, pri čemu je veličina piksela 6.5 $\mu$ m. Svaki panhromatski senzor se sastoji iz dva linearna CCD niza pomena za vrednost polovine piksela, tj. 3.25  $\mu$ m. Kombinovanjem dva rezultujuća niza piksela može se dobiti slika sa više detalja. Ovakva slika se naziva slika u visokoj rezoluciji. Limitirajući faktori kod digitalnih kamera po principu skeniranja su:

- vreme potrebno za iščitavanje niza piksela, i
- brzina leta aviona iznad terena.





Vreme iščitavanja niza piksela kod kamere ADS40 je do 800Hz. Uz tipičnu brzinu leta od 370km/h i visinu leta od 1450m iznad terena, veličina piksela na terenu je 15cm, ili manje ukoliko se koriste duplirani linijski senzori, tj. linije visoke rezolucije (McGlone 2004). U praksi su čak postignute i veličine piksela od 5cm za panhromatsko snimanje. Za razliku od frejm digitalnih kamera, orijentacija slika kod sistema sa skeniranjem je znatno teža i zahteva korišćenje GPS i INS merenja.

### 2.1.2 Satelitske misije

Poslednjih godina u orbitu Zemlje su lansirani sateliti opremljeni sensorima koji su u stanju da prikupe snimke koji po svome kvalitetu odgovaraju aerofotogrametrijskim snimcima srednjih i sitnih razmera smimanja (1:20000 do 1:40000). Iako je fotomaterijal dobijen iz ovih misija još uvek skuplji od odgovarajućeg fotomaterijala dobijenog aerofotogrametrijskim snimanjem, u odnosu koji se kreće i do 10:1 (Saleh 2000), procenjuje se da će ovi proizvodi biti sve češća alternativa aerofotogrametrijskim snimcima posebno za srednje razmere kartiranja (1:5000 – 1:50000). S obzirom na to, oni predstavljaju očigledan izvor podataka za formiranje nacionalnog DMT-a, pogotovu ako se ima u vidu da se kroz jedinstven projekat može dobiti i ortofoto i DMT za celu teritoriju države.

IKONOS sistem kompanije Space Imaging je prvi komercijalni satelitski sistem koji je bio u stanju da istovremeno prikuplja 1m (0.82m u nadiru) panhromatske i 4m (3.28 u nadiru) multispektralne snimke. Lansiran je 1999. godine. IKONOS orbita je sinhrona Suncu na visini od 681km i obezbeđuje globalno pokrivanje Zemlje, sa uglovima snimanja bliskim nadiru. Širina trake je 11.3km (13816 piksela za panhromatski i 3454 piksela za multispektralni mod). Korišćenjem kontrolnih tačaka tačnost apsolutnog pozicioniranja snimaka je oko 2m CE90 (CE90 – engl. *Circular Error*, tačnost podataka je predstavljena cirkularnom greškom i, u konkretnom slučaju, znači da se 90% merenja nalazi unutar kružnice poluprečnika 2m).

Kompanija *DigitalGlobe* nudi *QuickBird* snimke koji trenutno imaju najvišu rezoluciju od svih raspoloživih komercijalnih satelitskih produkata. Rezolucija panhromatskog senzora je 0.61m, a 2.4m multispektralnog. Ovaj sistem koji je lansiran 2001. godine ima širinu trake od 16.5km u nadiru i najveće kapacitete za arhiviranje snimaka na samoj platformi. Visina orbite je 450km, a osnovna scena je površine 272km<sup>2</sup> (16.5x16.5km, 27424x27552 piksela za panhromatski i 6856x6888 za multispektralni mod). Georeferenciranje snimaka se može obaviti korišćenjem *QuickBird*-ovog rigoroznog modela senzora gde su date visine i efemeride, ili preko racionalnih polinomskih koeficijenata. (McGlone 2004).

SPOT-5, lansiran u Maju 2002. i operativan od jula iste godine, pripada poslednjoj generaciji SPOT misija. Visina Suncu sinhronne orbite satelita je 832km. HRS senzor proizvodi slike sa dve optike usmerene napred i nazad za 20° u odnosu na nadir. Rezolucija snimka je 5m duž putanje i 10m upravno na putanju. Širina trake na terenu je 120km (12000 piksela), a dužina jedne sekvence u pravcu kretanja 600km. Eksperimenti su pokazali da se korišćenjem SPOT 5 HRS snimaka može ostvariti kvalitet DMT-a od 5m za ravničarske terene i 10m za brdovita i planinska područja.

### 2.1.3 Prikupljanje podataka DMT-a sa fotogrametrijskih snimaka

Nakon obavljenog snimanja i eventualne obrade snimljenog materijala (fotolaboratorijska obrada, skeniranje snimaka) i njihovog georeferenciranja (blok izravnanje, registracija) nastupa najobimnija faza kod fotogrametrijske metode, a to je prikupljanje podataka, odnosno informacija sa prikupljenih snimaka. Kada se radi o snimanju većih površina, onda se po pravilu radi aerotriangulacija bloka da bi se snimci međusobno dobro povezali i da bi se smanjio broj potrebnih orijentacionih tačaka na terenu. Savremeni sistemi za aerofotogrametrijsko snimanje podrazumevaju i upotrebu GPS-a i INS-a, a sve u cilju smanjivanja ili potpunog eliminisanja potrebe za orijentacionim tačkama na terenu.

Za razliku od laserskog skeniranja i radarskog snimanja, fotogrametrijska metoda je znatno duže u upotrebi, pa su vremenom razvijene brojne tehnike i instrumenti sa svojim specifičnostima, prednostima i manama.

### 2.1.3.1 Strategije prikupljanja reprezentativnog uzorka podataka za opisivanje površi terena

Postoji više tehnika i strategija za prikupljanje podataka o visinskoj predstavi terena tj. o reljefu. Neke od njih su posebno razvijene i prilagođene upravo za rad sa fotogrametrijskim instrumentima, a neke od njih su korišćene i kod terenskih metoda snimanja terena. One se po tipu reprezentativnog uzorka koji se prikuplja mogu razvrstati na:

- **selektivni sampling**<sup>1</sup> kod koga se prikupljaju podaci o karakterističnim tačkama, linijama i površinama terena;
- **sistematski sampling** kod koga se područje koje se modelira sistematski prekriva serijom paralelnih profila ili manje-više pravilnom mrežom tačaka sa merenim visinama;
- **progresivni sampling** predstavlja nadogradnju sistematskog samplinga i sastoji se u progresivnom profinjavanju (progušćavanju) početne pravilne mreže visinskih tačaka u onim oblastima za koje se analizom već prikupljenih podataka ukaže da je to neophodno;
- **kompozitni sampling** predstavlja kombinaciju prethodne tri strategije;
- **direktno izvlačenje izohipsa**.

Koja će od ovih strategija prikupljanja podataka biti primenjena u svakom konkretnom slučaju zavisi od više faktora:

- mogućnosti instrumenata i pratećeg softvera za podršku prikupljanju podataka;
- zahtevane tačnosti i detaljnosti obuhvatanja terena;
- šta se specificira kao krajnji proizvod;
- karakteristika softvera tj. algoritama za obradu prikupljenih podataka i formiranje DMT-a, itd.

Selektivnim samplingom se postiže najkvalitetnije obuhvatanje površi terena, uz minimalnu količinu prikupljenih podataka. Međutim, tu je prisutan i najveći utrošak vremena, jer se postupak uglavnom sastoji od manualnog rada, a i sam izbor reprezentativnih merenja zahteva dodatno vreme. Pored toga, operater koji radi za instrumentom mora posedivati visok nivo obučenosti za taj posao.

Sistematski sampling je pogodan za implementaciju u okviru kompjuterski podržanih sistema, ali se može koristiti i kod instrumenata kojima upravlja čovek. Karakteriše ga velika redundantnost podataka, uz izostavljanje karakterističnih detalja na površi terena. Ova strategija sve više dobija na značaju sa padom cena softvera i hardvera, a uz konstantno podizanje performansi ovih komponenti, naročito u pogledu brzine rada i raspoložive memorije. Na taj način su nedostaci ove strategije koji se odnose pre svega na izuzetno veliku količinu, često redundantnih podataka, zanemarljivi u pogledu jednostavnosti implementacije same strategije na sistemima za poluatomatsko i automatsko merenje DMT-a. U slučajevima izuzetno velike gustine izmerenih tačaka može se eliminisati potreba za prelomnim i strukturnim linijama terena.

Progresivni sampling je nastao kao rezultat težnje da se smanji količina podataka koja se dobija sistematskim samplingom, uz postizanje iste ili više tačnosti. Ova strategija je specijalno razvijena za prikupljanje podataka na analitičkim fotogrametrijskim instrumentima, i po pravilu se primenjuje samo u radu sa njima. Sastoji se od sledećih faza:

- izbora odgovarajućeg osnovnog intervala za pravilnu mrežu tačaka, na osnovu iskustva ili unapred propisanih kriterijuma za dati tip terena, ili na osnovu analize izmerenih profila iz fotogrametrijskog modela;
- merenja visina u pravilnoj mreži tačaka;
- iterativno profinjavanje pravilne mreže izmerenih tačaka sa dodatnim merenjima, na polovini intervala iz prethodne iteracije, a na delovima fotogrametrijskog modela za koje softver odredi da je to neophodno.

Kompozitni sampling kroz kombinovanje progresivnog i selektivnog samplinga rešava probleme efikasnosti, redundantnosti podataka i kvaliteta obuhvatanja površi terena. Umesto progresivnog, može se sa selektivnim kombinovati i sistematski sampling.

---

<sup>1</sup> *Sampling na engleskom znači uzorkovanje, prikupljanje uzorka.*



Direktno izvlačenje izohipsa je tehnika koja se uglavnom koristi za direktno iscrtavanje izohipsi na analognim podlogama. Njena primena kod digitalnog modeliranja terena danas je vrlo ograničena u odnosu na druge tehnike i treba je izbegavati kad god je to moguće. Ona je uglavnom imala smisla u vreme dok su u fotogrametrijskoj praksi bili dominantno zastupljeni analogni fotogrametrijski instrumenti.

### 2.1.3.2 Analitički i analogni fotogrametrijski instrumenti

Tehnike rada na analognim i analitičkim instrumentima su praktično dostigle svoj maksimum kada je u pitanju mogućnost njihovog daljeg usavršavanja i daljeg povećanja efikasnosti rada. Ono na šta je poslednjih deceniju-dve najviše obraćano pažnje je softverska podrška prikupljanju podataka i on-line verifikaciji prikupljenog sadržaja još u fazi prikupljanja (*Reinhardt 1988*). Istovremeno, nastavljena su istraživanja koja su imala za cilj objektivno utvrđivanje optimalnog uzorka (*Balce 1986, Frederiksen 1986, Fritsch 1988*) i ocenu kvaliteta DMT-a (*Frederiksen 1986, Frederiksen 1984, Kraus 2004, Weng 2001*).

Analitički instrumenti omogućavaju prikupljanje podataka za vrlo kvalitetno predstavljanje površi terena. Njihove mogućnosti posebno dolaze do izražaja kod korišćenja progresivnog i selektivnog samplinga.

Iako se praktično više ne proizvode, analogni instrumenti se još uvek u nekim zemljama koriste u proizvodnim uslovima. U našoj zemlji oni su, u stvari, glavni izvor podataka kada je u pitanju državni premer i ostale primene aerofotogrametrije. Glavni nedostatak ovih instrumenata u odnosu na analitičke je nedostatak povratne veze od računara ka instrumentu, tj. nemogućnost računarski navođenog pozicioniranja merne markice na zadatu poziciju u stereomodelu. Stoga je i efikasnost primene ovih instrumenata znatno manja u odnosu na analitičke, a posebno u odnosu na digitalne fotogrametrijske sisteme. Ovo je posebno izraženo kada se radi o progresivnom i kompozitnom, a donekle i sistematskom samplingu. Štaviše, na ovim instrumentima je moguće implementirati samo modifikovane tehnike progresivnog i kompozitnog samplinga. Međutim, kada je u pitanju selektivni sampling, ili kada se radi dopuna postojećih podataka karakterističnim tačkama, linijama i površinama terena, analogni instrumenti skoro da uopšte ne zaostaju za naprednijim sistemima. Naravno, preduslov za ovo je da je analogni instrument direktno povezan sa računarom i da je rad na njemu podržan kvalitetnim softverom za prikupljanje podatka o površi terena.

Primena analognih i analitičkih instrumenata za prikupljanje podataka o površi terena je još uvek aktuelna u svim onim slučajevima kada se raspolaže klasičnim fotomaterijalom. Ona je posebno opravdana kod krupnorazmernih projekata gde se uglavnom radi o područjima sa mnoštvom veštačkih objekata koji predstavljaju problem kada je u pitanju automatizovano prikupljanje podataka na digitalnim fotogrametrijskim sistemima. Još jedno područje primene ovih instrumenata, a koje je potencijalno vrlo interesantno sa aspekta ovog istraživanja, je dopuna podataka DMT-a dobijenih digitalizacijom postojećih podloga. Na ovaj način, kombinovanjem digitalizovanih izohipsi i karakterističnih linija i površina terena izmerenih na ovim instrumentima može se značajno podići kvalitet ciljnog DMT-a.

U budućnosti treba očekivati sve manju upotrebu ovih instrumenata, sem u specijalnim slučajevima. Razlog je pre svega u visokim troškovima za njihovo održavanje, dotrajalosti instrumenata u upotrebi i sve nižim cenama digitalnih sistema, uz sve bolje performanse.

### 2.1.3.3 Digitalni fotogrametrijski sistemi

Prednost digitalnih fotogrametrijskih sistema u odnosu na analogne i analitičke instrumente je svakako u vrlo velikim potencijalima za automatizovanje većine mernih operacija na njima. Današnje generacije ovih sistema uglavnom imaju u potpunosti automatizovane procedure za izvođenje automatske i relativne orijentacije. Isto tako, za velike projekte gde se po pravilu radi aerotriangulacija bloka, omogućeno je automatsko biranje i merenje veznih tačaka. Na taj način se znatno skraćuje vreme obrade od trenutka dobijanja snimaka u digitalnom obliku do trenutka otpočinjanja prikupljanja DMT podataka sa snimaka.

Kada je u pitanju prikupljanje podataka za formiranje DMT-a, digitalni sistemi raspolažu funkcijama koje omogućavaju postizanje vrlo visokog stepena automatizacije i efikasnosti u radu. Realizacija prikupljanja uzorka po svim strategijama za prikupljanje DMT podataka se vrlo jednostavno implementira

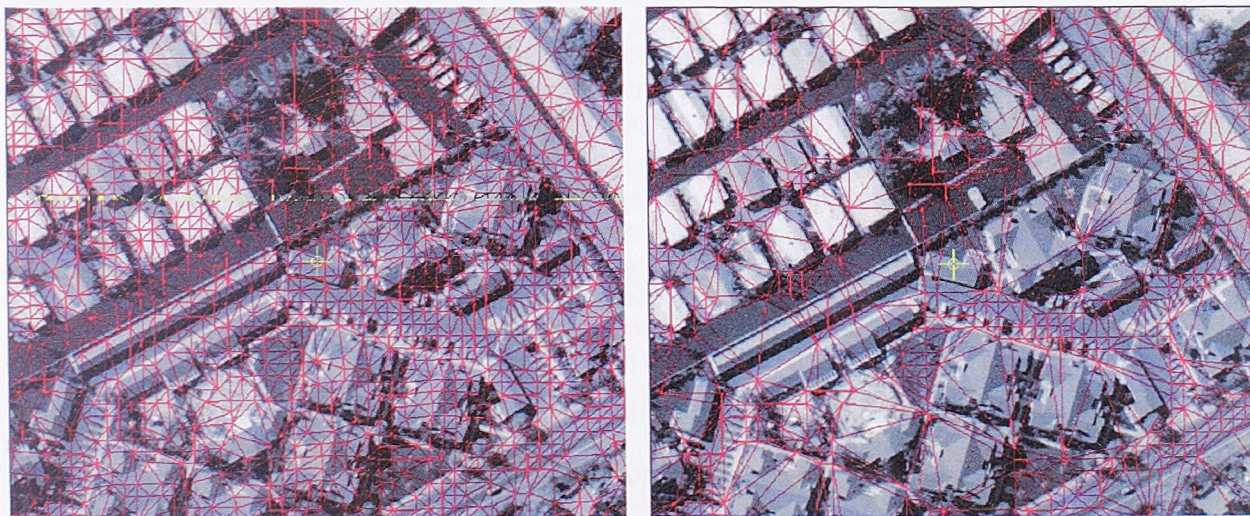


u okviru ovih sistema. Podržano je i prikupljanje strukturalnih linija i rasutih tačaka po metodi selektivnog samplinga. Ove sisteme karakteriše i zavidna udobnost u radu u odnosu na analogne i analitičke instrumente, jer operater najčešće ne mora da bude vezan za okular, već koristi posebne naočare za stereoskopsko gledanje. Time je i sam proces rada znatno manje zamoran za operatera. Velika prednost u odnosu na analogne i analitičke instrumente je i mogućnost jednostavne superimpozicije prikupljenih podataka na ekranu monitora, u okviru stereo-modela, što u značajnoj meri olakšava i čini pouzdanijom verifikaciju prikupljenog sadržaja.

Automatsko merenje tačaka po sistematskom samplingu, tj. u pravilnoj mreži tačaka sa unapred zadatim parametrima mreže izvodi se sa vrlo visokim koeficijentom uspešnosti. Razvijeni su i algoritmi za automatsko merenje tačaka u nepravilnom rasporedu i to tako da se sa najmanjom mogućom redundantnošću prekrije površ terena (LH Systems 2001).

Procedure automatskog merenja DMT-a tj. algoritmi iz oblasti podudarnosti slika su intenzivno usavršavani poslednjih dvadesetak godina i njihovom kombinacijom se postiže vrlo visoka tačnost merenja. Prvobitni problemi kod primena ovih sistema u svakodnevnoj proizvodnji bili su prevashodno vezani za velike memorijske zahteve za rukovanje digitalnim snimcima, kako na jedinice spoljne memorije, tako i u radnu i video memoriju računara tokom procesiranja. Sa podizanjem performansi računara u pogledu raspoložive memorije, kao i sa povećanjem brzine rada svih komponenti sistema, ovi sistemi su u proizvodnim uslovima dostigli, pa i prevazišli analitičke instrumente. Tačnost merenja slikovnih koordinata na ovim sistemima je u direktnoj vezi sa kvalitetom skenera na kojima su ti snimci skenirani. Današnji profesionalni fotogrametrijski skeneri omogućavaju skeniranje i sa optičkim rezolucijama i do 4 $\mu$ m (DSW500, LH Systems), pri čemu je geometrijska tačnost skeniranja vrlo visoka i iznosi oko 2 $\mu$ m što omogućava postizanje izlazne tačnosti koja odgovara ili je samo nešto niža od one ostvarive na analitičkim instrumentima. Naravno, u tim slučajevima se plaća i vrlo visoka cena u pogledu neophodne memorije za arhiviranje i obradu skeniranih snimaka, kao i u pogledu procesorskog vremena potrebnog za obradu.

Procedure za automatsko generisanje DMT-a u okviru komercijalnih digitalnih fotogrametrijskih sistema su dosta usavršene i značajno su ubrzale postupak prikupljanja DMT podataka. Bolja rešenja kod ovih sistema omogućavaju prilagođavanje rada tih procedura za različite tipove terena. Na žalost, i pored velikog broja parametara sa kojima se rad ovih procedura može konfigurisati, još uvek nije u potpunosti rešen problem velikog broja pogrešnih merenja. Procenjuje se da 5% - 30% automatski generisanih tačaka zahteva manuelno editovanje (McGlone 2004). Ova merenja najčešće predstavljaju tačke na krošnjama drveća, krovovima zgrada i drugim veštačkim objektima koji ne formiraju površ terena. Zato se poslednjih godina veliki broj istraživanja i bavi uspešnim otkrivanjem i eliminacijom tih grešaka. Kao što se sa naredne slike može videti, i kod najsavremenijih softverskih realizacija digitalnih fotogrametrijskih sistema nije moguće potpuno automatsko eliminisanje svih pogrešnih merenja. Na sledećoj slici dat je primer automatske eliminacije tačaka DMT-a koje padaju na objekte, a koje su dobijene automatskom izradom DMT-a na digitalnom fotogrametrijskom sistemu SOCET SET (LH Systems 2001).



Slika 2.1 : Automatska eliminacija pogrešnih merenja u okruženju SOCET SET-a

Trenutni status istraživanja i rezultati postignuti u praktičnim primenama to i potvrđuju. Štaviše, nerealno je očekivati i u narednih nekoliko decenija da se razviju potpuno automatizovane procedura za odstranjivanje svih ovih grešaka samo na osnovu aerofotogrametrijskih snimaka (Brenner 2000). Zato



nakon završenog procesiranja stereopara primenom automatskih procedura za merenje, operater mora pažljivo da pregleda dobijene podatke, da eliminiše pogrešna merenja i da eventualno izvrši dodatna merenja. Ovaj postupak može delimično da se automatizuje i ubrza kroz razvoj odgovarajućih tehnika koje kombinuju fotogrametrijske snimke i informacije iz drugih izvora, kao što su postojeće digitalne podloge, digitalni model površi dobijen laserskom ili radarskom metodom i sl.

Upravo ove funkcije digitalnog fotogrametrijskog sistema koje su namenjene za editovanje automatski dobijenog DMT-a, njihova raznovrsnost, sveukupna udobnost u radu, a posebno kod stereoskopskog merenja, uz opšte performanse i konfigurabilnost algoritma za automatsko merenje DMT-a, su i njegove najznačajnije karakteristike koje treba uzeti u razmatranje kada je u pitanju efikasnost njegove primene kod digitalnog modeliranja terena. Softverska rešenja koja se nude u okviru najpoznatijih komercijalnih digitalnih fotogrametrijskih sistema, a u kojima su implementirani kvalitetni algoritmi za automatsku ekstrakciju DMT-a sa snimaka su:

- modul *ImageStation Automatic Elevation (ISAE)* koji je deo softversko-hardverske implementacije digitalne fotogrametrijske radne stanice *ImageStation SSK* firme *Z/I Imaging*;
- modul *Auto Terrain Extraction* koji se nudi u okviru paketa *SOCET SET* firme *Bae Systems*;
- modul *Automatic Terrain Extraction (ATE)* kao deo softverskog paketa *Leica Photogrammetric Suite* firme *Leica Geosystems*;
- *MATCH-T* modul firme *Inpho GmbH* koji se ugrađuje u *Summit Evolution* (digitalni fotogrametrijski sistem) i *DTMaster Stereo*.

#### 2.1.4 Obrada podataka

Obrada sirovih DMT podataka dobijenih fotogrametrijskim metodama najčešće se sastoji od sledećih operacija:

- otkrivanje i eliminacija grubih grešaka nastalih lošim spuštanjem markice, merenjem visina na zgradama ili na krošnjama drveća i sl;
- otklanjanje sistematskih grešaka kod merenja visina po profilima;
- otklanjanje šumova u merenjima koji su posledica slučajnih grešaka;
- eliminacija suvišnih podataka.

Kao i kod svih ostalih tehnika za digitalno modeliranje terena, najveći problem predstavlja otkrivanje i eliminacija grešaka u podacima. Ovo je posledica same prirode pojave koja se opisuje, tj. površi terena, koja je uglavnom nepravilna, ali i posledica vrlo malog broja redundantnih merenja, što značajno utiče na njihovu pouzdanost. Izvođenje dodatnih merenja i prikupljanje novih podataka za objektivnu ocenu kvaliteta prikupljenih podataka je neracionalno i po pravilu se retko praktikuje, pa se sve svodi na primenu metoda koje su manje ili više subjektivne prirode.

Tu svakako na prvom mestu dolazi metoda vizuelnog pregleda DMT-a preko različitih proizvoda dobijenih analizom tog DMT-a. Najčešće se koriste crteži sa interpolovanim izohipsama i perspektivni pogledi sa kombinacijom senčenja. Posebno je efikasna opcija superimpozicije formiranog DMT-a i rezultata različitih analiza tog DMT-a sa fotogrametrijskim modelom u vidnom polju fotogrametrijskog instrumenta, bilo da je reč o analognom-analitičkom instrumentu ili digitalnoj fotogrametrijskoj radnoj stanici. Dobijeni DMT se može uporediti i sa nekim već postojećim DMT-om niže tačnosti, ali koji još uvek može da ukaže na grube greške u ostvarenim merenjima.

Nije redak slučaj da su merenja tačaka koje je izveo operater po nekoj sistematskoj šemi, kao što je profilisanje ili merenje u pravilnoj mreži tačaka, a posebno kad se radi u dinamičkom režimu rada, opterećeni sistematskim greškama. Zato je potrebno analizom ovih podataka utvrditi te uticaje i otkloniti ih iz rezultata merenja.

Sva merenja su neizostavno opterećena slučajnim greškama. Ove greške su u fotogrametrijskim merenjima kod prikupljanja podataka za potrebe izrade DMT-a prisutne kao visokofrekventni šumovi u okviru signala koji predstavlja izmereni profil terena u nekom pravcu. Poznavajući generalne karakteristike terena, tačnost samih merenja, kao i traženu izlaznu tačnost DMT-a, može se izvršiti otklanjanje ovih šumova iz podataka merenja, bilo da su oni posledica grešaka merenja ili fluktuacija

same površi terena u blizini tih merenja. Na ovaj način se u stvari vrši generalisanje površi terena koja je dobijena na osnovu sirovih merenja.

Podaci prikupljeni na digitalnim fotogrametrijskim radnim stanicama primenom automatizovanih procedura često sadrže i veliki broj suvišnih merenja, posebno ako je reč o jednostavnijim algoritamskim rešenjima, gde se podaci prikupljaju u formi sistematskog samplinga, tj. pravilne mreže visina.

### 2.1.5 Kvalitet podataka, efikasnost i ekonomičnost

Kao što je to već rečeno, kvalitet podataka koji se dobijaju primenom fotogrametrijskih metoda se kreće u vrlo velikom rasponu. Taj kvalitet pre svega zavisi od razmere snimanja, a zatim i od načina prikupljanja tih podataka, kvaliteta instrumenata koji se pri tome koriste, a zatim i od vrste terena na koji se ti podaci odnose.

Kvalitet podataka za formiranje DMT-a se najčešće vezuje za tačnost i pouzdanost geometrije prikupljenih podataka i eventualno nekih atributa koji se za njih vode. Međutim, treba istaći i da je kvalitet tih podataka povezan i sa tipom, količinom i rasporedom tih podataka, jer i to u velikoj meri utiče na rekonstrukciju i modeliranje površi terena na osnovu tih podataka.

Tačnost koordinata pojedinačnih tačaka dobijenih manuelnim fotogrametrijskim merenjem, a na osnovu snimaka dobijenih iz aerofotogrametrijskog snimanja, može se grubo dati formulama:

$$\sigma_{XY} = R_S \cdot \sigma_{\xi} \quad (2-1)$$

$$\sigma_Z = \frac{Z^2}{c \cdot B} \sigma_{p_{\xi}} \quad (2-2)$$

gde je:

$R_S$  - razmera snimanja,

$c$  - konstanta kamere,

$B$  - baza snimanja,

$\sigma_{\xi}$  - tačnost merenja koordinata u ravni snimka,

$\sigma_{p_{\xi}}$  - tačnost merenja horizontalne paralakse u ravni snimka.

Za aerofotogrametrijsku metodu, tačnost određivanja visina tačaka u praksi je po pravilu manja od položajne tačnosti.

Ne ulazeći detaljno u analizu raznih uticaja na tačnost određivanja koordinata iz fotogrametrijskog modela (postupak orijentacije, broj, raspored i tačnost orijentacionih tačaka, tačnost instrumenta, deformacije filma i distorzije objektiva i sl.) ovde se daju neki rezultati dobijeni empirijskim putem za standardni slučaj merenja aerosnimaka (*Kraus 1984*).

Za signalisane tačke terena mogu se usvojiti sledeće orijentacione vrednosti:

$$\sigma_{XY_{Sig}} = 8\mu m \cdot R_S \quad (2-3)$$

$$\sigma_{Z_{Sig}} = 0.08\% \cdot h, \text{ (kamere sa normalnim i širokim uglom)} \quad (2-4)$$

$$\sigma_{Z_{Sig}} = 0.10\% \cdot h, \text{ (kamere sa superširokougaonim uglom)} \quad (2-5)$$

gde je  $h$  visina leta aviona.

Tačnost sračunata po gornjim formulama se može postići kvalitetnim analognim instrumentima. Ako se koriste kvalitetni analitički instrumenti, postiže se povećanje tačnosti za oko 25%.



Za nesignalisane tačke, što je uglavnom i slučaj pri prikupljanju podataka za potrebe formiranja DMT-a, mora se uzeti u obzir i greška zbog nesigurne definicije tačaka  $\sigma_{Def}$ :

$$\sigma_{XY_{Nesig}} = \sqrt{\sigma_{XY_{Sig}}^2 + \sigma_{XY_{Def}}^2} \quad (2-6)$$

$$\sigma_{Z_{Nesig}} = \sqrt{\sigma_{Z_{Sig}}^2 + \sigma_{Z_{Def}}^2} \quad (2-7)$$

Uopšteno uzevši, tačnost DMT-a dobijenog na osnovu fotogrametrijskih merenja može se izraziti formulom:

$$\sigma_Z = 0.15\% \cdot h + \frac{0.150}{c} \cdot h \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (2-8)$$

gde je  $\alpha$  nagib terena.

Navedene formule predstavljaju položajnu tačnost pojedinačnih nesignalisanih tačaka određenih u stacionarnom režimu rada. Ako se koristi dinamički režim rada, što je uglavnom slučaj kod direktnog izvlačenja izohipsi, onda se postiže manja tačnost visina:

$$\sigma_{Z_{Sig}} = 0.25\% \cdot h, \text{ (kamere sa normalnim i širokougaonim objektivom)} \quad (2-9)$$

$$\sigma_{Z_{Sig}} = 0.30\% \cdot h, \text{ (kamere sa superširokougaonim objektivom)} \quad (2-10)$$

Tačnost izvučenih izohipsi se izražava u zavisnosti od nagiba terena  $\alpha$  i prema Koppe-ovoj formuli iznosi:

$$\sigma_H = \sigma_Z + \sigma_G \cdot \tan \alpha, \quad (2-11)$$

gde je  $\sigma_G$  položajna tačnost merenja kontinualnih linija. Ova tačnost je manja za izohipse nego za linije horizontalne predstave, jer se za izohipse ne vrši prosto markiranje već se one traže u modelu na osnovu stereoskopskog utiska. Ona se može odrediti po formulama:

$$\sigma_G = 100\mu\text{m}, \text{ u razmeri snimka (za krupne razmere snimanja)} \quad (2-12)$$

$$\sigma_G = 0.2\text{mm}, \text{ u razmeri kartiranja (za sitne razmere snimanja)} \quad (2-13)$$

U praksi se za grube procene, izuzev za slučajeve ekstremnih nagiba terena, koristi vrednost:

$$\sigma_H = 0.3\% \cdot h. \quad (2-14)$$

Primenom kvalitetnih procedura za automatsko merenje tačaka (digitalnu korelaciju) tačnost koja se može ostvariti je približno ista ili čak veća od one koja se može dobiti merenjem na boljim analognim, a nešto niža od one ostvarive na analitičkim instrumentima. Podrazumeva se da su snimci skenirani u visokoj rezoluciji, uz vrlo visok geometrijski i radiometrijski kvalitet.

Način merenja, tj. strategija prikupljanja reprezentativnog uzorka, u velikoj meri utiče, kako na kvalitet samih podataka, tako i na efikasnost i ekonomičnost primene fotogrametrijskih metoda.

Kada je u pitanju kvalitet podataka prikupljen različitim strategijama prikupljanja uzorka, nema dileme u pogledu toga koja od ovih strategija daje najkvalitetnije podatke. To je, svakako, selektivni sampling, jer se tako dobijeni podaci odnose na karakteristične elemente terena, pa je opisivanje površi terena ovim podacima najtačnije i najefikasnije (bar kad je u pitanju količina tih podataka). Pored toga, ti podaci se uglavnom mere u stacionarnom režimu rada, dakle sa najvišom mogućom tačnošću koja je ograničena jedino kvalitetom podloga, instrumenata, kao i znanjem i veštinom operatera. Slično važi i za kompozitni sampling. Digitalizovane, tj. direktno izmerene izohipse poseduju vrlo visok morfološki kvalitet i bogatstvo detalja. One sadrže dosta implicitnih informacija o karakteristikama terena. Glavni nedostatak takvih merenja je niža tačnost visina pojedinačnih tačaka na izohipsama (formule 2-11, 2-12 i 2-13), jer se one po pravilu mere u dinamičkom režimu rada. Najniži kvalitet u morfološkom pogledu imaju podaci sistematskog samplinga, ali se taj nedostatak može zaobići povećanjem broja merenja po jedinici

površine ili, još bolje, proglašavanjem merenja samo na kritičnim mestima, kao što to predviđa progresivni sampling.

Kada je u pitanju kvalitet DMT-a dobijen na osnovu satelitskih misija on iznosi od 5-15m za DMT na osnovu SPOT5 HRS snimaka, i 1-5 m za DMT na osnovu snimaka iz *IKONOS* i *QuickBird* snimaka (*Kaczynski 2004*). Brojna istraživanja sprovedena poslednjih godina pokazuju da se, uz korišćenje adekvatnih procedura za orijentaciju senzora i filtriranje grešaka iz podataka DMT-a može na osnovu SPOT5 HRS snimaka dobiti DMT sa tačnošću od oko 5m za otvorene i umereno nagnute terene i oko 10m u planinskim područjima (*Fraser 2004, Muller 2004, Michalis 2004, Poli 2004, Rudovski 2004*).

Kada je reč o merenjima na fotogrametrijskim instrumentima u manuelnom ili poluatomatskom režimu rada, iskusan operater može da izmeri u proseku oko 1000-2000 rasutih tačaka primenom sistematskog samplinga ili 400-1000 tačaka koje pripadaju strukturnim linijama terena za jedan sat. To znači da merenje jedne tačke u proseku iznosi 4 do 9 sekundi. Za jedan fotogrametrijski model, a u zavisnosti od izabrane strategije, razmere snimanja, tipa instrumenta i karakteristika terena, može se reći da to na kraju rezultira sa oko 2000-8000 izmerenih tačaka i utroškom vremena od 4 do 10 sati. Kod digitalnih sistema i analitičkih instrumenata ovo vreme se dodatno skraćuje, jer restitutor ne mora da bira položaj tačke (kod sistematskog i progresivno samplinga) već samo poništava paralaksu, tj. meri visinu, tako da ovo vreme iznosi oko 2-3 sekunde.

Ako se zajedno posmatraju efikasnost prikupljanja podataka i kvalitet DMT-a koji se na osnovu njih može dobiti, može se reći da se najbolji rezultati postižu primenom sistematskog samplinga, uz eventualnu dopunu ovih podataka karaktrističnim tačkama i strukturnim i prelomnim linijama terena.

Svakako da se najveća brzina merenja pojedinačnih visinskih tačaka postiže na digitalnim fotogrametrijskim sistema primenom automatske korelacije. Tu se sa kvalitetnim algoritmima i dobrim hardverom, postiže brzina merenja od 20 do 50 tačaka u sekundi, i stalno se povećava sa poboljšanjem performansi hardvera i softvera. Važno je istaći i da je to vreme angažovanja mašine, a ne čoveka, što dodatno smanjuje troškove. Najčešće se posao organizuje tako da se to vreme odnosi na period kada sistem i inače ne bi mogao biti drugačije korišćen (noću, preko vikenda i sl.), pa je i to prednost u odnosu na ostale tehnike rada. Naravno tu treba uzeti u obzir i vreme koje operater naknadno utroši na korigovanje tako dobijenih podataka, što vrlo često nije za zanemarivanje. Posebno veliki utrošak vremena na ove korekcije treba očekivati u naseljenim područjima i područjima koja su obrasla vegetacijom. Vrlo često se u ovim područjima i ne praktikuje primena automatskih procedura, jer vreme koje se potroši na korekcije automatski prikupljenih podataka, ponekad premašuje vreme koje bi inače bilo potrebno da se ovi podaci prikupe nekom od manuelnih ili poluatomatskih tehnika. Za neke grube procene može se uzeti da je za obradu stereopara razmere snimanja od 1:15000 sa prosečnom složenosti terena i bez mnogo veštačkih objekata i guste vegetacije potrebno oko 5 min za automatsku izradu DMT-a i oko 30-45min za njegovu dopunu i editovanje. U modelima sa gustom vegetacijom i urbanim područjima potrebno je, pre samog izvođenja automatskih procedura, izdvojiti ova područja. Tom prilikom se mogu izmeriti i strukturne i prelomne linije terena čime se ostvaruju preduslovi za postizanje boljih rezultata primenom automatskih procedura. U proseku, vreme potrebno za ovu operaciju iznosi od 15-30 minuta. Ukupno efektivno prosečno vreme koje je iskusnom i uvežbanom operateru potrebno za obradu jednog stereopara iznosi oko 1 sat po jednom modelu. Za obradu stereoparova sitnije razmere potrebno je više vremena od ovoga, dok se stereoparovi u krupnijim razmerama mogu obraditi za kraće vreme.

Kod izrade plana za realizaciju projekta prikupljanja podataka DMT-a primenom aerofotogrametrijske metode korišćenjem gore navedenih instrumenata i postupaka, svakako treba imati na umu i sve troškove koji su povezani sa operacijama koje treba sprovesti do trenutka kada može da otpočne samo prikupljanje podataka DMT-a sa snimaka. Te operacije su: aerofotogrametrijsko snimanje, obrada fotomaterijala, skeniranje, određivanje orijentacionih tačaka, aerotriangulacija, i dr.

Tržišna cena prikupljanja podataka DMT-a primenom fotogrametrijskih metoda kod nas iznosi 10-100 USD/km<sup>2</sup> u zavisnosti od razmere snimanja (kartiranja), tipa terena i zahtevane tačnosti DMT-a. Cene iz donjeg dela datog intervala se, grubo govoreći, odnose na razmere kartiranja 1:25000 i sitnije, dok se cene iz gornjeg dela intervala odnose na razmere kartiranja 1:5000 i nešto krupnije. Za DMT koji odgovara kartama razmere 1:25000 ta cena bi iznosila oko 15-20 USD/km<sup>2</sup>.

Okvirne cene podataka koji se dobijaju na osnovu obrade snimaka iz satelitskih misija su:

- 2-3 EUR/km<sup>2</sup>, za DEM-a sa 10m vertikalnom tačnošću i 15m horizontalnom tačnošću dobijen obradom SPOT-5 snimaka,
- cena DEM-a dobijenog na osnovu *IKONOS* i *QuickBird* snimaka odgovara ceni DEM-a iste tačnosti dobijenog korišćenjem aerofotogrametrijskih snimaka, ali može biti i nekoliko puta veća.



Cena za DMP<sup>1</sup> (digitalni model površi) dobijen iz IKONOS snimaka koji nudi firma *Space Imaging* iznosi 20, 17 i 14 USD/km<sup>2</sup>, za tačnost od 2, 3 i 5m respektivno (w25). Cena je iz kataloga za 1999. godinu i odnosi se na snimke iz arhive i za jednokorisničku licencu korišćenja. Podaci su u formi DMP-a, što znači da visine nisu svedene na površ terena, tj. nije izvršena korekcija visina za vegetaciju i objekte. Firma *Space Imaging Eurasia*, koja je predstavnik *Space Imaging* za područje Srbije i Crne Gore, nudi DEM proizvod ITM-5m sa rastojanjem tačaka u gridu od 6m, 5.6 RMSE položajna tačnost, 1.8m RMSE visinska tačnost po ceni od 100USD/km<sup>2</sup>. Korisnik je u obavezi da obezbedi GCP za georeferenciranje snimaka. Cena se odnosi na jednokorisničku licencu, dok se za 2-3 korisnika množi sa faktorom od 1.3, a za 4-10 korisnika sa faktorom 1.6.

Pri izboru fotogrametrijske metode za prikupljanje podataka DMT-a treba imati u vidu i sledeće činjenice:

- fiksni deo troškova aerofotogrametrijskog snimanja čini da je primena fotogrametrijske metode opravdana i racionalna za prikupljanje podataka samo za veća područja i u tim slučajevima ona je jedna od najekonomičnijih metoda prikupljanja podataka o terenu;
- aerofotogrametrijsko snimanje u velikoj meri zavisi od vremenskih uslova i često je ograničeno na određeno doba godine i period u toku dana kada se može izvoditi;
- fotomaterijal dobijen aerofotogrametrijskim snimanjem po pravilu se, pored prikupljanja podataka DMT-a, koristi i za druge svrhe, a najčešće za izrade karata, planova i ortofoto-a, što dodatno pojeftinjuje primenu cele metode;
- prikupljanje podataka na osnovu fotomaterijala dobijenog jednim aerofotogrametrijskim snimanjem može se izvoditi primenom praktično svih tehnika i instrumenata koji su prisutni u fotogrametrijskoj praksi, a podaci prikupljeni različitim tehnikama i instrumentima mogu se lako kasnije kombinovati;
- moguća je dopuna prikupljenih podataka naknadnim merenjima korišćenjem istog fotomaterijala;
- primenom GPS-a i INS-a potrebno je vrlo malo dodatnih podataka;
- fotogrametrijske metode karakteriše zrela tehnologija sa velikim brojem razvijenih tehnika, algoritama, dobrom kompjuterskom podrškom za automatizaciju poslova i velikim brojem obučениh stručnjaka;
- efikasnost u naseljenim područjima i područjima obraslim gustom vegetacijom je umanjena.

## 2.2 Lasersko skeniranje iz vazduha - LIDAR

Lasersko skeniranje iz vazduha je jedna od metoda daljinske detekcije koja je poslednjih godina našla vrlo zapaženu primenu kod prikupljanja podataka za digitalno modeliranje terena. Primena ove metode u praksi je počela ranih devedesetih godina. Trenutna situacija u oblasti fotogrametrije i daljinske detekcije, kako kod naučnih istraživanja, tako i kod praktičnih primena, ukazuje na sve veći značaj i mogućnosti ove metode za prikupljanje podataka o prostoru.

Upravo zato, u ovom radu se daje kratak osvrt na ovu tehnologiju rada, jer se u skorijoj budućnosti i kod nas može očekivati njena sve veća primena. Ovo posebno važi za poslove izrade 3D modela gradova, razne inženjerske projekte, prikupljanje podataka DMT-a za potrebe ortofotoprodukcije i kod izrade geodetskih podloga krupnih i srednjih razmera. Sve ovo, ukazuje da laserska metoda može biti jedan od značajnih izvora podataka za formiranje DMT-a za teritoriju države, ako ne u početnoj fazi njegove izrade, a ono bar u kasnijim fazama održavanja, ažuriranja i podizanja njegovog kvaliteta.

<sup>1</sup> DMP (digitalni model površi) je termin koji označava da se digitalni model odnosi na površ koja uključuje i zgrade i vegetaciju, tj. nije izvršeno svođenje svih visina na čistu površ terena. Engleski termin je DSM – Digital Surface Model

## 2.2.1 Snimanje terena laserom iz aviona

Laserska metoda - **LiDAR** (engl. *Light Detection And Ranging*) ili **ALS** (engl. *Airborne Laser Scanning*), kao što to i sam naziv sugerira, zasniva se na korišćenju laserske svetlosti za određivanje rastojanja od senzora do objekata u prostoru. Obradom ovih podataka i podataka koji se prikupljaju korišćenjem dodatnih uređaja ugrađenih u jedan LiDAR sistem, dobijaju se polarne koordinate za svaku tačku na površini terena od koje se odbio laserski zrak.

LiDAR sistem za prikupljanje podataka koristi:

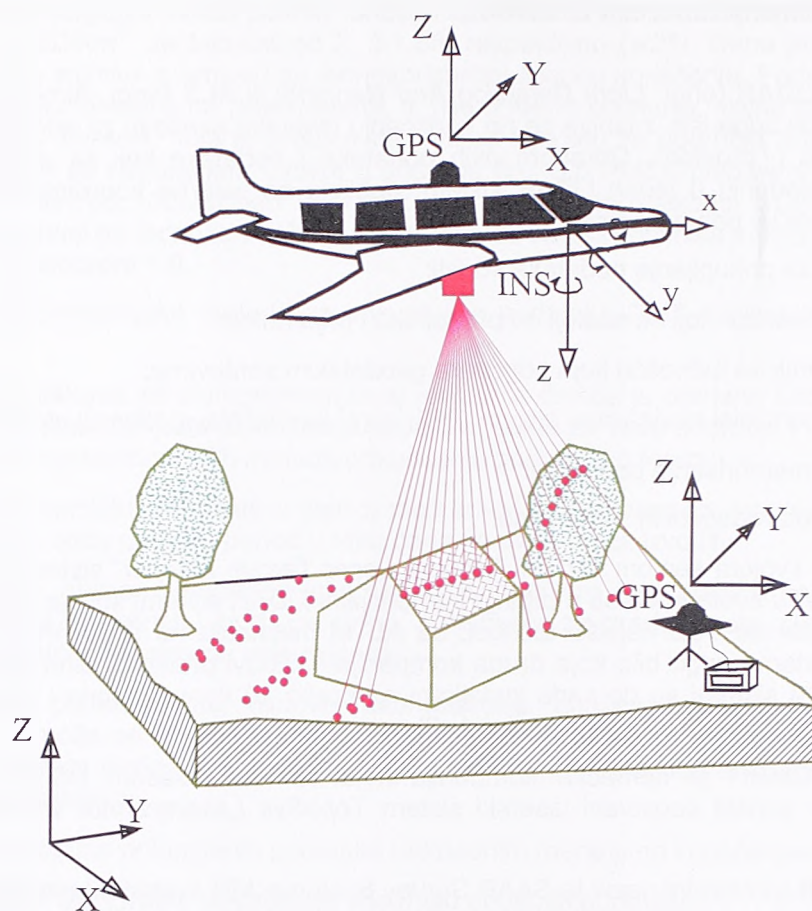
- jak laserski senzor koji se sastoji od predajnika i prijemnika;
- GPS prijemnik sa tačnošću koja odgovara geodetskim zahtevima;
- uređaj za Inercijalni navigacioni sistem (INS, engl. *Inertial Navigation System*) i
- jedinicu za memorisanje podataka.

Najpoznatiji proizvođači ovih sistema su:

- **Optech** sa svojom serijom "*ALTM Airborne Laser Terrain Mapper*" sistema; ovaj proizvođač je trenutni lider u svetu kada su u pitanju komercijalni LiDAR sistemi koji se koriste za topografska snimanja gde se traži najviša tačnost; sa ALTM instalacijama širom sveta, Optech ima više prodatih sistema nego bilo koja druga kompanija - njihovi proizvodi čine dve trećine sistema u svetu; ALTM sistemi su do sada instalirani na preko 20 tipova aviona i helikoptera i mogu se instalirati praktično na bilo koju letelicu (w3);
- **TopoSys** GmbH je nemačka kompanija koja se bavi izradom DMT-a primenom LiDAR tehnologije; koriste sopstveni laserski sistem *TopoSys Laserscanner* vrlo visokih performansi (w9);
- **TopEye AB** (prethodni naziv je SAAB Survey Systems AB) švedska kompanija koja je bila član SAAB koncerna proizvodi LiDAR sistem pod istoimenim nazivom - *TopEye* (w10);
- **LH Systems**, ogranak kompanije Leica Geosystems, jedan je od vodećih proizvođača sistema za prikupljanje, obradu i održavanje informacija na osnovu slika; njihova glavna delatnost je vezana za dobijanje geografskih informacija na osnovu aerofotogrametrijskih i satelitskih snimaka; "*ALS40 Airborne Laser Scanner*" je laserski sistem koji nudi ova kompanija (w6);
- **Laseroptronix**, švedska kompanija koja se bavi projektovanjem, razvojem i proizvodnjom elektro-optičkih senzora i laserskih uređaja; njihova ponuda obuhvata i *Geomapper* laserski sistem koji je prvenstveno predviđen za montiranje na helikopter (w5);
- **Schwartz Electro-Optics (SEO)**, kompanija iz SAD, koja se takođe bavi istraživanjem, projektovanjem i proizvodnjom elektro-optičkih senzora i laserskih uređaja nudi *Toposense* laserski sistem (w7);
- **Nortech** sa sistemima "*Airborne Laser Terrain Profiler (ALTP)*" i "*All Terrain Laser Acquisition System - Vertical Laser (ATLAS-VL)*".

Laserski uređaj je ugrađen u pod letelice (avion ili helikopter) koja obično leti na visinama od 200-300m za helikopter i 500-1000m za avion. Sa novim sistemima kao što je ALTM 2033 visine idu i do 3000m, ili čak 6000m kao posebna opcija. Tipična brzina leta je od 200 do 250 kilometara na sat. Ako se kao platforma koristi helikopter snimanje može da se izvodi i sa visine od 20-50m. Kod većine komercijalnih sistema, za vreme skeniranja laserski uređaj emituje brze impulse infracrvene laserske svetlosti koji se zatim koriste da bi se odredila rastojanja od senzora do terena ispod letelice. Talasne dužine laserske svetlosti se mogu kretati od 500 do 1500nm. Standardne vrednosti za topografsko snimanje su u rasponu od 1040nm do 1060nm. Pored sistema kod kojih se emituju impulsi laserske svetlosti, postoje i sistemi kod kojih se emituje kontinualna laserska svetlost modulirana sinusoidnim signalom. Konačna udaljenost od senzora do terena se određuje na osnovu fazne razlike između primljenog signala i onog koji se kontinualno emituje. Pošto su dvostruka rastojanja od senzora do terena po pravilu veća od talasne dužine laserske svetlosti, potrebno je korišćenje dveju ili više frekvencija za modulaciju da bi se odredio broj celih talasnih dužina u tom dvostrukom rastojanju.





Slika 2.2 : Princip rada laserskog skeniranja iz vazduha

Kod većine LiDAR sistema usmeravanje laserske svetlosti u željenom pravcu postiže se korišćenjem jednog ogledala koje osciluje ili rotira. Specifično je rešenje koje je primenila firma *TopoSys* za svoj sistem. Ono se zasniva na korišćenju povezanih staklenih optičkih vlakana i za razliku od rešenja sa ogledalima omogućava prikupljanje znatno veće količine podataka u jedinici vremena, tj. veću gustinu tačaka na terenu.

U slučaju oscilujućeg ogledala, dobija se jedna lepeza laserskih impulsa, kojom se površ terena skenira po jednoj liniji. Pošto ogledalo osciluje po pravcu upravnom na pravac leta, usled kretanja aviona dobija se da linija skeniranja nije upravna u odnosu na pravac leta već zakošena. Sve ove linije međusobno se nadovezuju jedna na drugu u obliku slova 'z' i formiraju traku skenirane površi terena (Slika 2.2). Kod sistema sa povezanim staklenim optičkim vlaknima rezultat snimanja je serija paralelnih profila visinskih tačaka i veoma velika gustina tačaka u pravcu leta aviona. Frekvencija skeniranja tj. broj skeniranih linija u jedinici vremena se najčešće kreće od 1-100Hz za većinu sa sistema oscilujućim ili rotirajućim ogledalima, ili čak do 650Hz za *TopoSys* LiDAR sa optičkim vlaknima. Kod većine sistema se frekvencija skeniranja može podešavati prema potrebi.

Sistemi sa oscilujućim ogledalima su najfleksibilniji kada je u pitanju raspored i gustina tačaka na terenu. Širina trake zavisi od ugla oscilacije ogledala i visine leta i iznosi od 100m do par hiljada metara. Raspored i gustina tačaka na terenu zavisi od visine leta, brzine letelice, frekvencije oscilovanja ogledala, frekvencije lasera i ugla oscilovanja ogledala. U zavisnosti od ovih parametara ta gustina se kreće od par decimetara do par metara, što je i najčešći slučaj ako se želi ravnomerno pokrivanje površi terena izmerenim visinama. Ugao oscilovanja ogledala se kreće od 7 do 20 stepeni levo i desno od pravca leta letelice. Za područja šira od ove trake vrši se snimanje sa više traka pri čemu se, kao i pri aerofotogrametrijskom snimanju, vodi računa o tome da se obezbedi preklap između ovih traka.

Rastojanja od senzora do tačaka na površi se mogu odrediti sa tačnošću višom od 5cm. Naime, merenje rastojanja od senzora do posmatrane tačke na terenu se određuje po formuli:

$$R = \frac{1}{2} ct_L, \quad (2-15)$$

gde je  $c = 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$  brzina svetlosti, a  $t_L$  vreme potrebno da laserski zrak stigne od senzora do tačke na terenu i da se vrati ponovo do senzora. S obzirom da savremena tehnologija omogućava merenje vremena sa tačnošću od skoro  $10^{-10}$  sekunde, dobija se gore navedena tačnost određivanja rastojanja.

Kada impuls pogodi teren, veličina njegovog odraza na terenu varira između 15 i 150cm u zavisnosti od visine leta i rasipanja laserskog zraka. Veličina ovog odraza se računa po formuli (McGlone 2004):

$$A_L = \frac{h}{\cos^2(\theta)} \gamma \quad (2-16)$$

gde je  $h$  relativna visina leta nad terenom,  $\theta$  ugao skeniranja,  $\gamma$  divergencija (rasipanje) laserskog zraka. Širina trake kojom se u jednom prolazu skenira teren, uz korišćenje prethodnih veličina dobija se po formuli:

$$SW = 2h \tan \frac{\theta}{2}, \quad (2-17)$$

dok gustina tačaka u pravcu upravnom na pravac leta zavisi uglavnom od merne frekvencije lasera (engl. *PRF – Pulse Repetition Frequency*) i može se sračunati po formuli:

$$dx = \frac{h}{\cos(2\theta_s)} \frac{\theta_s}{PRF}, \quad (2-18)$$

pri čemu je  $\theta_s$  ugaona brzina skeniranja izražena u  $[\text{rad}^{-1}]$ .

LiDAR sistem je u stanju da razlikuje višestruke prijeme (do 5 višestrukih povratnih signala) svakog odaslatog impulsa, što omogućava istovremeno određivanje površi biljnog pokrivača i površi terena. Višestruki povratni signali se takođe mogu koristiti za snimanje vrhova krošnji drveća, linija vazdušnih dalekovoda i sl. Kod nekih sistema moguće je registrovanje samo prvog ili poslednjeg od višestrukog odbijenih signala, kod nekih se mogu registrovati i prvi i poslednji odbijeni signal, a kod nekih i svi odbijeni signali. Za područja obrasla mešovitim drvećem procenat prodiranja laserskog zraka iznosi preko 60%, dok je on za crnogorične šume manji i iznosi preko 30%, pa o ovome treba posebno voditi računa kod planiranja LiDAR projekata. Prikupljanje podataka sa istovremenim registrovanjem višestrukih impulsa je opcija koja je retka kod većine sistema. Postupak kada se podaci prikupljaju na osnovu prvih odbijenih signala se naziva 'prvi impuls mod' (engl. *First Puls Mode*), a postupak prikupljanja na osnovu poslednjih odbijenih signala 'poslednji impuls mod' (engl. *Last Pulse Mode*).

Ponekad je sastavni deo LiDAR sistema i digitalna kamera koja snima područje koje se skenira. Na primer, kod *TopoSys* sistema istovremeno sa prikupljanjem merenja za izradu DMT-a teren se digitalno skenira u četiri kanala (RGB i infracrveni) (w9). Time se stvaraju preduslovi za vrlo efikasno i skoro potpuno automatizovano dobijanje ortofotoa u digitalnom obliku.

Još jedna od interesantnih mogućnosti koja je posebno prisutna kod druge generacije LiDAR sistema, je registrovanje vrednosti reflektovane svetlosti. Naime, količina reflektovane laserske svetlosti, zavisi od njene talasne dužine ali i od koeficijenta refleksije površi od koje se laserska svetlost odbila, a posebno je različita za svetle i tamne površine. Što je površ svetlija to je stepen refleksije veći, tako da on iznosi 10-20% za peščano tlo, 30-50% za vegetaciju i 50-80% za područja pod snegom i ledom. Registrovanjem ovih vrednosti i njihovom analizom moguće je dodatno klasificiranje površina na terenu. Recimo, vegetacija ima veću vrednost refleksije nego veštački objekti kao što je beton ili asfalt.

Precizna pozicija senzora, orijentacija letelice (engl. *attitude*), trenutni ugao ogledala (nagib laserskog zraka) i prikupljena odstojanja se koriste da bi se odredile trodimenzionalne koordinate tačaka na terenu. Ove sisteme karakteriše vrlo velika količina podataka koje je moguće prikupiti za kratko vreme i ova *frekvencija merenja* iznosi od par stotina do par desetina hiljada (25000 - 33000) tačaka u sekundi. U literaturi se, recimo, za *TopoSys* sistem navodi da je, zahvaljujući pre svega primeni staklenih optičkih vlakana, frekvencija merenja njegovog lasera 83000Hz (w9). Sa starijim sistemima se standardno postiže



pokriivanje površi terena sa merenjima na svakih 2-3 kvadratna metra, a sa novijim sistemima i sa nekoliko merenja (do 20) po jednom kvadratnom metru površi terena.

Kao što je već rečeno, laserski uređaj može precizno da izmeri rastojanje od senzora do terena. Međutim, ova informacija je neupotrebljiva ukoliko nije poznata tačna pozicija letelice u prostoru, kao i njena orijentacija tj. položaj laserskog znaka u odnosu na ose prostornog koordinatnog sistema. Ove informacije se određuju primenom GPS i INS tehnologija.

GPS komponenta LiDAR sistema koristi princip rada koji se standardno primenjuje u fotogrametriji da bi se korišćenjem diferencijalnih GPS merenja eliminisala potreba za kontrolnim tačkama i drugim merenjima na terenu. Kao i kod ostalih GPS merenja, veza sa minimum četiri, a optimalno sa šest ili više satelita je potrebna da bi se odredila tačna pozicija senzora. GPS podaci se standardno prikupljaju u intervalima od 1-2 sekunde, a ponekad i češće. Dva ili više GPS prijemnika, koji prikupljaju podatke istom brzinom, se nalaze na poznatim lokacijama na terenu i u funkciji su tokom svake misije leta. Ukoliko ovi prijemnici nisu udaljeni više od 30-40km od letelice može se postići tačnost od 5-10cm u određivanju pozicije prijemnika u letelici. Kao i u slučaju primene kod aerofotogrametrijskog snimanja, diferencijalno kinematičko GPS post-procesiranje ovih podataka daje trajektoriju kretanja letelice, tačnije senzora, u vidu serije trodimenzionalnih pozicija. GPS uređaj i laserski senzor su pričvršćeni za fiksne pozicije unutar letelice. Rastojanje između GPS antene i senzora laserskog uređaja precizno se meri sa centimetarskom tačnošću primenom totalne stanice.

Tokom leta letelica rotira oko tri ose i te rotacije (engl. *roll*, *pitch*, *yaw*) određuju orijentaciju, tj. položaj letelice u prostoru. Ovi uglovi rotacije utiču na prostorni odnos između antene i senzora. Oriientacija letelice se određuje primenom INS uređaja koji se nalazi u letelici. INS kombinuje tehnologiju kružnog laserskog žiroskopa sa optičkim vlaknima i tehnologije ortogonalnih akceleratora. INS uređaj se obično sastoji od tri ortogonalna akceleratora i tri međusobno ortogonalna žiroskopa ( $w3$ ). Podaci se prikupljaju u pravilnom razmaku sa brzinom od 50 podataka u sekundi, dajući tako poziciju senzora i orijentaciju letelice u istim vremenskim intervalima. Koristeći ove parametre, GPS određene pozicije se mogu transformisati tako da se umesto na GPS antenu odnose na centar laserskog senzora, tj. na centar ogledala. Na taj način, kombinovanjem GPS i INS informacija može se odrediti tačna pozicija i orijentacija izvora za svaki vektor laserskog zraka.

Parametri kao što su: visina leta, brzina letelice, poprečni preklap između traka tj. rastojanje između susednih linija leta, ugao trake, frekvencija skenera, i određuju gustinu tačaka i ovi projekti se biraju tako da odgovore zahtevima projekta. Letelica leti po planiranoj, pravilnoj putanji iznad područja predviđenog za snimanje.

## 2.2.2 Obrada podataka

Pre nego što se predstave procedure za obradu LiDAR podataka merenja, potrebno je reći da se pre samog prikupljanja i obrade podataka moraju sprovesti odgovarajuće procedure u okviru pripreme faze da bi sama obrada podatak bila uspešna. Priprema faza se sastoji iz kalibracije parametara vezanih za laserski uređaj, GPS i INS uređaje i za podešavanje optimalnih parametara samog procesa prikupljanja podataka. Ovi parametri procesa treba da se razmatraju pre samog leta, sa ciljem da se odgovori zahtevima korisnika. Oni se odnose na samu platformu senzora (brzina i visina leta) i na laserski uređaj (frekvencija laserske svetlosti, merna frekvencija, frekvencija skeniranja). Izbor optimalnih parametara je složen, jer oni mogu biti međusobno uslovljeni, a često i ograničeni karakteristikama laserskog uređaja i platforme kojima se raspoložuje. Kalibracija parametara se izvodi u laboratoriji, na terenu i u vazduhu, pre, za vreme, i/ili nakon leta. Neki od primera kalibracije su određivanje praga za ocenu dužine, određivanje greške aliniranja laserskog senzora i INS uređaja, kao i rešavanje GPS neodređenosti celog broja faza (engl. *ambiguity*). Ovo je vrlo važno, jer su kalibracija i obrada GPS i INS podataka među najznačajnijim izvorima grešaka kod LiDAR-a.

Nakon svakog leta, podaci koji se sastoje iz pozicije i orijentacije letelice, kao i dužina i ugao laserskog zraka za svaku merenu tačku, iščitavaju se sa uređaja na letelici i obrađuju. GPS podaci sa letelice i sa GPS prijemnika lociranih na poznatim tačkama se obrađuju korišćenjem softvera za kinematičko GPS post-procesiranje. Upotreba dve ili više stanica na terenu na terenu obezbeđuje kontrolu kvaliteta i poboljšava tačnost određivanja kinematičke trajektorije letelice. Rezultat ove obrade su trodimenzionalne koordinate GPS antene u intervalima od 0.5 ili 1 sekunde.

Ono o čemu treba voditi računa pri obradi GPS merenja i određivanju elemenata spoljne orijentacije senzora je činjenica da se GPS određene koordinate odnose na WGS84 referentni koordinatni sistem i da je za njihovu transformaciju u državni koordinatni sistem, tj. na ortometrijski sistem visina potrebno poznavati ondulacije geoida sa odgovarajućom tačnošću.

Nakon procesiranja GPS merenja, sirovi INS podaci i GPS trajektorija se kombinuju koristeći Kalman tehnike filtriranja. Rezultat je kompletan set elemenata spoljne orijentacije ( $X_0, Z_0, Y_0, \omega, \phi, \kappa$ ) senzora. Koordinate za tačke terena se računaju na osnovu izmerenih rastojanja, uglova ogledala (nagiba laserskog zraka) i ovih elemenata spoljne orijentacije. U ovoj fazi se unose i različiti kalibracioni parametri da bi se otklonile neke od grešaka koje neizbežno prate proces merenja.

Merenja koja su zajednička za susedne trake laserskog snimanja, tj. tačke koje padaju u preklopno područje za dve susedne trake koriste se za izravnane merenja, a sa ciljem otklanjanja sistematskih grešaka INS-a i GPS-a.

Osnovni izvori grešaka koje se nalaze u merenjima dobijenim LiDAR sistemom mogu se podeliti na (Huising 1998):

- greške koje dolaze zbog nesavršenosti laserskog sistema (laserski uređaj, GPS i INS);
- greške usled procesa merenja iz vazduha, i
- greške koje potiču od karakteristika površi od koje se odbio laserski zrak.

Kao i kod svih merenja, ove greške po karakteru svog delovanja mogu biti sistematske i slučajne. Primeri sistematskih uticaja su: sistematske greške laserskog prijemnika, naporavanje i klačenje žiroskopa kod INS uređaja, uticaj troposfere, nagib površi od koje se odbija laserski zrak i vegetacija. Slučajne greške obuhvataju: šum primljenog signala, širina laserskog zraka, vreme reagovanja prijemnika, vremenske greške u elektronici, divergencija laserskog zraka, talasna dužina laserskog zraka, greške u pozicioniranju i orijentaciji platforme, svojstva transmisije svetlosti kroz atmosferu, tip (složenost) površi terena i refleksione karakteristike površi od koje se odbija laserski zrak.

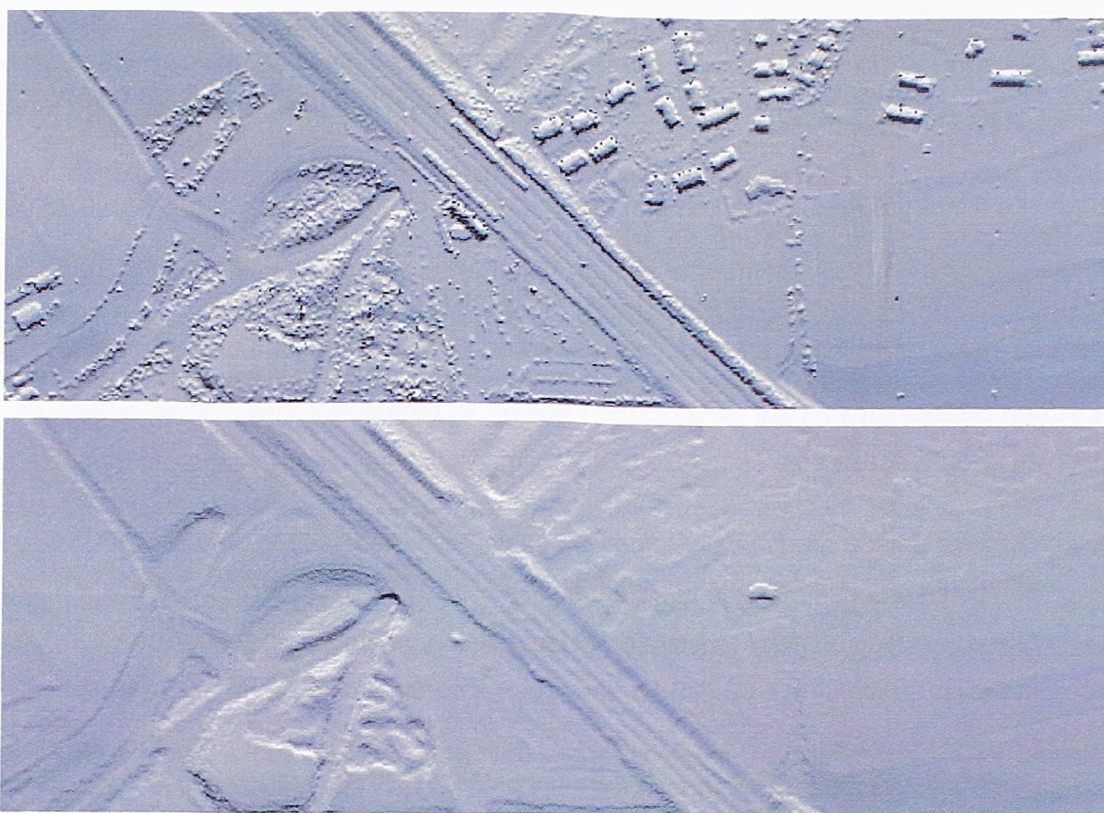
Ogromna količina tačaka koje generiše jedan LiDAR sistem zahteva i značajne resurse za rukovanje ovim podacima i njihovu obradu. Neretko, tu se radi o količinama od nekoliko stotina miliona tačaka. Pored toga, ove tačke se često odnose na krošnje drveća, automobile i zgrade. Veliki broj korisnika očekuje podatke koji se odnose baš na površ terena, dok ima i onih koji traže površinu definisanu biljnim pokrivačem koja uključuje i drveće i zgrade. Stoga je vrlo važno da se primene inteligentne procedure da se količina prikupljenih podataka svede na prihvatljivu meru s obzirom na zahtevanu tačnost DMT-a, kao i da se podaci prvo klasifikuju s obzirom na pojave i objekte na koje se odnose, a zatim i da se iz njih primenom tehnika filtriranja odstrane neželjene informacije (Kraus 1999).

U teoriji i praksi je razvijeno više algoritama za filtriranje i proređivanje LiDAR podataka. Neki od najznačajnijih su:

- morfološki filteri;
- linearna predikcija;
- aproksimacije splajn površima i
- standardni filteri iz oblasti digitalne obrade slika.

Ova problematika je predmet brojnih istraživanja u svetu i može se reći da trenutno ne postoji jedna tehnika za filtriranje, odnosno klasifikaciju, koja se može smatrati kao optimalna za sve uslove i zahteve. Na primer, morfološki filteri koji se obično koriste u praksi, mogu uspešno da odstrane merenja na zgradama i veštačkim objektima koje karakterišu vrlo nagle visinske razlike, ali isto tako mogu odstraniti i značajne karakteristike površi terena, kao što su ivice podzidova, strmih nasipa i sl. Sa druge strane, linearna predikcija daje vrlo dobre rezultate kod pošumljenih područja (Lohmann 2000), ali se sa dobrim podešavanjem parametara za rad algoritma mogu dobiti veoma dobri rezultati i za izgrađena područja (Pfeifer 2001).





Slika 2.3 : Rezultat filtriranja LiDAR podataka primenom iterativne robustne linearne predikcije (Pfeifer 2001)

Jedan od pristupa koji daje dobre početne rezultate sastoji se od kombinovanja postupka za klasifikaciju podataka na osnovu višestrukih povratnih signala i procedura za ocenu površi terena. I pored stalnih napora na usavršavanju ovih algoritama, još uvek se ne može obezbediti da ne dođe do loše ocene površi terena u pojedinim delovima snimljenog područja. Na primer, velike stene i stenovit teren uopšte, šume sa gustim rastinjem, brane i nasipi, mostovi i zgrade - svi imaju vrlo slične karakteristike u visinskom smislu i vrlo je teško razlikovati ih. Samim tim, i projektovanje algoritama za automatsko klasificiranje i filtriranje podataka koji se odnose na neželjene objekte je vrlo komplikovano. Zato, da bi se obezbedila zahtevana tačnost i pouzdanost DMT-a dobijenog LiDAR sistemima, potrebno je izvršiti njegovu verifikaciju i eventualno korigovanje od strane dobro obučениh operatera. Ovo se obično radi korišćenjem fotogrametrijskih snimaka i instrumenata za njihovo stereoskopsko posmatranje i merenje. Operater na ovim instrumentima dodaje strukturne linije terena, meri dodatne visinske tačke i koriguje izmerene visine u oblastima gde su algoritmi za obradu LiDAR podataka dali loše rezultate. Vrlo detaljan i sveobuhvatan prikaz postupaka koji se koriste za obradu LiDAR podataka dat je u radu (Rottensteiner 2002).

U zavisnosti od stepena obrade LiDAR podaci se mogu isporučiti u nekoliko oblika *McGlone 2004*:

- sve tačke - postprocesirani i georeferencirani podaci bez filtriranja i klasifikacije (najjeftiniji proizvod koji se dobija za vrlo kratko vreme);
- prvi prolaz - podaci filtrirani primenom automatskih procedura i klasifikovani na podatke koji se odnose na površ terena i na podatke koji ne pripadaju površi terena (obično ista cena kao za prethodni proizvod);
- očišćeni podaci - u potpunosti editovani i pregledani podaci, klasifikovani manuelno koristeći i druge izvore podataka (skuplji, sa dugom obradom);
- raslojeni podaci – dalja obrada i klasifikacija podataka, kao što je identifikacija dalekovoda, osnova zgrada i sl. (još skuplji nego očišćeni podaci);
- integrisani podaci – LiDAR podaci su kombinovani sa podacima iz drugih izvora (senzora), kao što su digitalne slike, hiperspektralni podaci, planimetrijski podaci i sl. (najskuplji LiDAR proizvod).



### 2.2.3 Kvalitet podataka, efikasnost i ekonomičnost

Kada je u pitanju pojedinačna tačnost LiDAR merenja, ona je vrlo visoka. Po visini iznosi od 5-15cm, a po položaju je nešto manja i iznosi 15-20cm. Međutim, za korisnika je mnogo važnija informacija kolika je tačnost dobijenog DEM-a.

Tipična tačnost koja se u literaturi navodi za komercijalne LiDAR sisteme iznosi oko 15cm (Huising 1998). Međutim, ostvarena tačnost se može proveriti i obezbediti samo upoređenjem dobijenih visina sa mrežom kontrolnih tačaka ili stereosuperimpozicijom. Štaviše, da bi se postigla visoka tačnost koja se zahteva kod nekih primena, potrebno je izvršiti i izravnaje dobijenih merenja koristeći date kontrolne tačke. Ovo se radi pre svega da bi se otklonili eventualni uticaji koji dolaze od GPS, INS ili LiDAR komponenti sistema, a koji pokazuju sistematski karakter za merenja koja se odnose na sve tačke unutar jednog reda ili jednog bloka laserskog snimanja.

Sistematski uticaji koji su posledica inicijalizacije kod GPS-a iznose 10-20cm. Greške određivanja geoida zavise od kvaliteta geoida za dato područje i one utiču na transformaciju GPS koordinata iz WGS84 sistema u državni koordinatni sistem. Greške u orijentaciji letelice pomoću INS-a, za laserska skeniranja sa visine od 1000m prouzrokuju grešku na terenu od 15cm (Kraus 1998). Tehnike za izravnaje tj. popravljajanje tačnosti visina variraju po svojoj kompleksnosti i sofisticiranosti, a u zavisnosti od primene i veličine projekta. One se kreću od proste translacije svih tačaka po visini za isti iznos da bi se otklonio jednak sistematski uticaj, pa sve do blok izravnajanja koje uključuje veze između traka, kontrolne tačke na terenu i modeliranje sistematskih uticaja koji variraju s vremenom (Crombaghs 2000, Kraus 1998). Ovo izravnaje ima sličnosti sa klasičnom izravnajanjem aerofotogrametrijskog bloka (Rottensteiner 2002). Na sve ove greške dodaju se i greške koje su vezane za tip terena, vegetaciju, greške filtriranja itd. U sledećoj tabeli dat je prikaz raspona slučajnih i sistematskih grešaka (Huising 1998):

Tip terena Tip greške	Ravan asfaltiran	Ravan bez useva i vegetacije	Ravan sa travom i žbunjem	Brežuljkast asfaltiran	Brežuljkast bez useva i vegetacije	Brežuljkast sa travom i žbunjem
Ukupna sistematska greška [cm]	5-20	5-20	20-200	5-20	5-20	20-200
Ukupna slučajna greška [cm]	10-50	10-50	10-50	20-200	20-200	20-200

Tabela 2-1 : Kvantifikacija sistematskih i slučajnih grešaka kod LiDAR-a u zavisnosti od tipa terena

Tačnost koja se može dobiti za terene pod šumom iznosi (Kraus 1999):

$$\sigma_H = \pm(18 + 120 \cdot \tan \alpha) [\text{cm}], \quad (2-19)$$

gde je  $\alpha$  nagib terena. Ova jednačina važi za slučajeve gde je efikasnost prodiranja laserskih impulsa bar 25% i gde je raspored tačaka izmerenih na vegetaciji i na terenu relativno ravnomeran. Uz otklanjanje sistematskih uticaja iz LiDAR merenja konstantna vrednost od 18cm može da se smanji na 10cm. U literaturi se mogu naći slični rezultati. U okviru eksperimenta izvedenog u Finskoj, korišćenjem *TopoSys-1* senzora sa mernom frekvencijom od 83000Hz, frekvencijom skeniranja od 630Hz, uglom skeniranja od  $\pm 7.1^\circ$  i visinom leta od 400m, dobijene su srednje kvadratne greške (RMSE) za ravan pošumljen teren od 15cm i oko 40cm za pošumljen teren sa nagibom od 40% (Hyyppä 2000a). Prosečna RMSE greška je iznosila oko 22cm, a sistematska greška oko 12cm, što znači da je određena površ koja se odnosi na niski šumski biljni pokrivač. Za deo pod šumskim putevima dobijena je srednja kvadratna greška od 8.5cm. Takođe je pokazano da se visine drveća mogu dobiti sa tačnošću od 1m RMSE.

Izlaznoj tačnosti ostvarenoj LiDAR sistemom za šumovite terene, a sračunatoj po jednačini (2-19), odgovara tačnost aerofotogrametrijski određenog DMT-a za nepošumljen teren, snimljenog kamerom širokog ugla i sa visine od 1200m. Prema tome, tačnost ostvarena LiDAR metodom, grubo govoreći, odgovara tačnosti koja se dobija primenom aerofotogrametrije sa krupnom razmerom snimanja, ali je nesumnjiva prednost LiDAR-a kod snimanja pošumljenih terena. Ovde takođe treba dati nekoliko bitnih napomena.

Prva od njih se odnosi na mogućnost pojave pogrešnih merenja koja nastaju kao posledica loših povratnih signala od vodenih površina i izrazito tamnih ili svetlih površina. Druga se odnosi na greške u pogledu klasifikacije i filtriranja podataka koji se odnose na pojave koje ne pripadaju površi terena. U literaturi se mogu čak naći konstatacije da zbog takvih izvora grešaka, uključujući tu i GPS i INS, tačnost

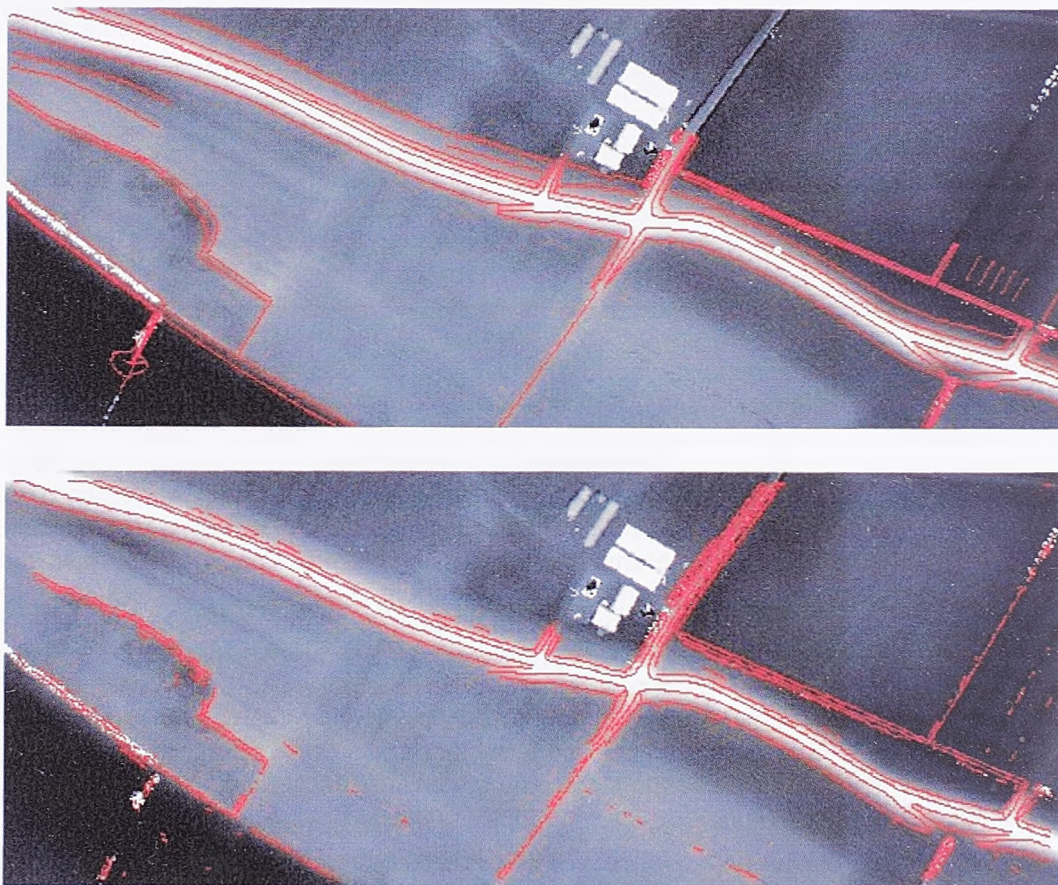


podataka dobijenih koršćenjem laserskih sistema u praksi znatno zaostaje u odnosu na onu koja je očekivana (Huising 1998). Zbog svega toga, i dalje je neophodna verifikacija i dopuna ovih podataka, primenom poluautomatskih ili manualnih postupaka, a najčešće primenom fotogrametrijske metode. Za ovu verifikaciju i editovanje treba izdvojiti dva do tri puta više vremena nego na samo prikupljanje podataka LiDAR sistemom. Svakako, ovde treba istaći i to da se vrlo slični problemi javljaju i kod fotogrametrijske metode kada se koriste digitalni fotogrametrijski sistemi za automatsko merenje DMT-a.

U praktičnim primenama, kada se uzmu u obzir svi izvori grešaka i različiti tipovi terena (ravan, strm, pošumljen), tačnost ostvarena LiDAR-om tipično iznosi **20-30 cm**. Imajući u vidu da je laserska metoda relativno nova tehnologija i da se može očekivati dalji napredak kod analize i modeliranja grešaka koje su posledice raznih sistematskih uticaja, realno je za pretpostaviti dalje podizanje izlazne tačnosti podataka dobijenih ovom metodom. U istraživanjima je već postignuta tačnost od 10cm za ravan teren, ali tek pošto su otklonjeni značajniji sistematski uticaji (Kraus 1998).

Ono što je svakako najznačajnije, kada je u pitanju poređenje LiDAR-a i fotogrametrijske metode je da LiDAR vrlo uspešno rešava problem prikupljanja DMT podataka za pošumljena područja što je za fotogrametrijske metode vrlo veliki problem.

Sa druge strane, morfološki kvalitet DMT-a dobijen iz LiDAR podataka značajno zaostaje u odnosu na kvalitet DMT-a dobijenog klasičnom fotogrametrijskim metodom (Kraus 1998). Ovaj kvalitet se može popraviti naknadnim dodavanjem strukturnih i prelomnih linija terena upravo fotogrametrijskim merenjima, ili kreiranjem ovih linija direktnim spajanjem tačaka određenih LiDAR-om. Interesantni su pokušaji da se razviju algoritmi za automatsku detekciju prelomnih linija na osnovu LiDAR podataka (Brügelmann 2000, Rottensteiner 2002). Prvi rezultati su zadovoljavajući i tako detektovane prelomne linije se mogu porediti sa onim prikupljenim manualnim fotogrametrijskim merenjima.



Slika 2.4 : Upoređenje prelomnih linija terena dobijenih različitim postupcima: fotogrametrijski merene (gore) i automatski određene linije na osnovu laserskih podataka (Brügelmann 2000)

Tačnost LIDAR-a zavisi od:

- kalibracije sistema;
- kvaliteta merenja pozicije i orijentacije;
- gustine tačaka na terenu;



- visine i brzine leta;
- količine i tipa drveća i zgrada na terenu.

U odnosu na standardne manuelne fotogrametrijske tehnike za masovno prikupljanje podataka o površi terena, LiDAR tehnologija sigurno ima očigledne prednosti kada je u pitanju efikasnost u pogledu brzine rada i količine prikupljenih podataka. Dok kod fotogrametrije ta efikasnost iznosi oko 1500 tačaka na sat, LiDAR sistemi standardno prikupljaju 10000-25000 tačaka u sekundi, a neki sistemi prikupljaju i 80000 tačaka u sekundi. Pored toga, LiDAR podaci su po pravilu raspoloživi za generisanje DMT-a neposredno po povratku aviona sa misije leta. Naravno, treba imati u vidu i činjenicu da LiDAR podaci zahtevaju i manuelnu verifikaciju i editovanje tako da konačna razlika u pogledu efikasnosti nije tako drastična. Ova razlika se još više smanjuje kada je u pitanju poređenje digitalnih fotogrametrijskih sistema i LiDAR-a.

Najnoviji laserski uređaji omogućavaju da se snimanja vrše i sa visina od više hiljada metara tako da i tu laserska metoda dobija na značaju, jer se time postiže veća efikasnost i proširuje područje primene. Podaci koji čine jednu traku kilometar širine i dužine nekoliko stotina kilometara mogu biti prikupljeni za nekoliko sati.

Ono što je posebna prednost LiDAR tehnologije u odnosu na ostale tehnike snimanja je mogućnost razlikovanja višestrukih povratnih signala od jednog odaslatog signala, čime je omogućeno razlikovanje površi terena od krošnji drveća, linija dalekovoda i sl. Ova prednost LiDAR otvara mogućnost efikasne primene u šumarstvu za određivanje karakteristika šumskog pokrivača (*Hyypä 2000, Kraus 1998*) i za kartiranje dalekovoda. Pored toga, prednost LiDAR tehnologije u odnosu na aerofotogrametriju je u tome što se kod LiDAR-a, baš kao i kod radarskog snimanja, koristi aktivni izvor svetlosti tako da prirodno svetlo i senke nemaju uticaja na snimanje, pa se ono može izvoditi u bilo koje doba dana ili godine.

Primena LiDAR sistema i razvijenih algoritama za klasifikaciju i filtriranje podataka je posebno interesantna za izradu 3D modela gradova i prepoznavanje i ekstrakciju zgrada i drugih objekata, gde se postiže vrlo visoka efikasnost u odnosu na ostale metode. Neki od standardnih postupaka podrazumevaju korišćenje informacija o zgradama sa postojećih podloga u digitalnom obliku i digitalnog modela površi (DMP) dobijenog LiDAR-om da bi se obezbedila skoro potpuna automatska rekonstrukcija 3D modela gradova (*Brenner 2000*), dok postoje i pokušaji da se to postigne samo na osnovu LiDAR podataka (*Masaharu 2000*). Uobičajeni postupak započinje izradom digitalnog modela terena u obliku pravilne mreže tačaka (grida) koji zatim služi kao osnova za dalje analize zbog svoje jednostavne strukture. Primenom morfoloških filtera se vrši klasifikacija i segmentacija delova koji pripadaju terenu i delova pod vegetacijom i objektima (*Morgan 2000*). Zatim se na osnovu kriterijuma o minimalnoj površini zgrada i promena u visini i nagibu/orijentaciji svakog segmenta dalje klasificiraju segmenti koji pripadaju zgradama od onih pod vegetacijom. Na kraju se vrši ekstrakcija ravnih površi koje čine elemente zgrade izborom optimalne ravni koja sadrži segmente zgrade i to primenom izravnjanja po metodi najmanjih kvadrata.

Ono što je posebno interesantno sa aspekta ovog rada je činjenica da se ova tehnika u nekim državama koristi da bi se odredio nacionalni DMT. Primer ovakvog pristupa je Holandija, gde je LiDAR primenjen za određivanje DMT za celokupnu teritoriju države, sa gustom od jedne tačke na 16m<sup>2</sup> (*Brügelmann 2000, Crombaghs 2000*).

Operativni troškovi LiDAR prikupljanja podataka, ako se izuzmu inicijalni troškovi za kupovinu opreme, mogu da se spuste na nivo od nekoliko dolara po kilometru jedne trake ili nekoliko stotina dolara po satu snimanja. U literaturi (*Sties 2000*) se navodi podatak da cena laserskog prikupljanja podataka u okviru jedne misije leta za veće područje iznosi oko 200 USD po kvadratnom kilometru. Ova cena se odnosi samo na prikupljanje podataka, a ne i njihovu dalju obradu kao što je resampling i editovanje, što ovu cenu udvostručuje. Cena od 200 USD po kvadratnom kilometru se značajno povećava za slučaj manjih područja (manjih od 100km<sup>2</sup>), ili kod kompleksnih projekata gde se obavlja više letova. U literaturi (*Petzold 1999*) se mogu naći procene da se odnos troškova snimanja i izrade DMT-a visoke tačnosti (par decimetara – za podloge razmera 1:2500 do 1:5000) primenom LiDAR-a i fotogrametrije kreće u odnosu 1:3.

Na Internetu se može naći vrlo široka ponuda usluga koje pružaju brojne kompanije koje se bave pružanjem usluga vezanih za LiDAR tehnologiju. Na primer, EagleScan/3Di kompanija iz Kalifornije, SAD, u svojoj ponudi ima AccuDEM, digitalni model visina, dobijen LiDAR tehnologijom, sa visinskom tačnošću datom srednjom kvadratnom greškom od 0.15m i položajnom greškom od 1.00m (*w11*). Podaci su u vidu rasutih tačaka na rastojanju od 3-5m, ili u pravilnoj mreži tačaka na rastojanju od 2m, a nude se u više standardnih formata za razmenu. U specifikaciji se navodi da je 95% vegetacije, zgrada i drugih objekata uklonjeno iz podataka. Cena za područje veličine 7.5' x 7.5' (~160km<sup>2</sup>) koje pokriva jednu kartu iz



standardne USGS (United States Geological Survey) kartografske podele na karte razmere 1:20000 je 30400 USD, što iznosi oko 190 USD/km<sup>2</sup>. Kompanija raspolaže gotovim podacima za određena područja, ali se u većini slučajeva, a to važi i za našu zemlju, mora naručiti posebno snimanje. U praksi se cena DMT-a dobijenog LiDAR tehnologijom kreće od 100-600 USD/km<sup>2</sup>, u zavisnosti od prava korišćenja, tačnosti i stepena obrade. Ove cene mogu da budu i značajno veće ukoliko se snimanje vrši za malo područje.

## 2.3 Radarsko snimanje

Radarsko snimanje, kao i lasersko skeniranje iz vazduha, jedna je od novijih metoda za prikupljanje podataka o objektima i pojavama na površi terena. Kao i LiDAR, i radarsko snimanje omogućava prikupljanje podataka čija se tačnost može uporediti sa tačnošću podataka dobijenih metodom klasičnog aerofotogrametrijskog snimanja.

Za razliku od LiDAR-a koji je ograničen na snimanja sa manjih visina, do par hiljada metara, radarsko snimanje se tipično izvodi sa znatno većih visina, uključujući tu i snimanja iz satelita. Zato ova metoda ima veće potencijale, bar kada je u pitanju prikupljanje podataka za formiranje DMT-a koji odgovaraju detaljnosti i tačnosti kartografskih podloga srednjih i sitnih razmera, što upravo i predstavlja predmet interesovanja ovog rada.

Radarska metoda snimanja se zasniva na korišćenju nekoliko principa. Najvažniji od njih su:

- princip rada radara;
- princip korišćenja sintetičkog otvora ili blende (engl. *synthetic aperture*);
- princip interferometrije.

U praksi su razvijene dve metode rada. One se, prema principima na kojima se zasnivaju, označavaju skraćenicama SAR (engl. *Synthetic Aperture Radar* – radar sa sintetičkom blendom) i InSAR (IFSAR) (engl. *Interferometric Synthetic Aperture Radar* – radarska interferometrija sa sintetičkom blendom).

### 2.3.1 SAR

Osnovni princip na kome počiva radarska metoda snimanja je princip na kome rade radari. Kao što je poznato, on se sastoji u otkrivanju objekata i određivanju rastojanja do tih objekata korišćenjem radio talasa, pa se zato i koristi termin - radar (engl. *RADAR: Radio Detecting and Ranging*). Princip je dosta sličan onom koji se koristi kod određivanja rastojanja primenom lasera, s tom razlikom što se ovde koriste zračenja koja pripadaju delu elektromagnetskog spektra sa dužim talasnim dužinama. Kao i kod lasera, koristi se jedan aktivni izvor elektromagnetskog zračenja koji emituje radio talase i odgovarajući prijemnik sa antenom koji registruje odbijene talase. Merenjem proteklog vremena određuje se rastojanje do objekta od koga su se talasi odbili. Tipične frekvencije i talasne dužine na kojima rade SAR senzori su dati u sledećoj tabeli.

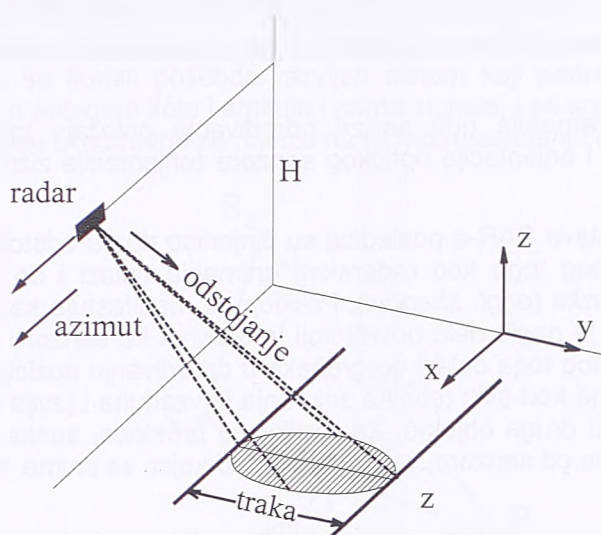
Opseg	Talasna dužina	Frekvencija
<b>X</b>	3 cm	9.6 GHz
<b>C</b>	5.3 cm	5.6 GHz
<b>L</b>	24 cm	1.3 GHz
<b>P</b>	68 cm	0.3 GHz

Tabela 2-2 : Tipične talasne dužine i frekvencija SAR sistema (Dowman 2004)

Zahvaljujući ovakvom rasponu frekvencija radio talasi bez ikakvih smetnji prodiru kroz oblake i kišu. Stepenn prodiranja radarskog signala kroz vegetaciju zavisi od talasne dužine signala. Signal u L opsegu, prodire dalje nego signal u X opsegu. Još jedna od prednosti radarskog snimanja u donosu na klasične metode fotogrametrije i daljinske detekcije koje koriste pasivni senzor je to što visokofrekventne

impulse, kao i kod LiDAR-a, emituje sam senzor, tako da je sistem nezavisan od dnevnog svetla i vremenskih uslova.

Ono što je karakteristično kod SAR snimanja je to što se teren snima bočno u odnosu na pravac, odnosno orbitu po kojoj se kreće senzor.



Slika 2.5 : Princip radarskog snimanja

SAR slika je u stvari prikaz refleksivnosti snimljenog područja s obzirom na mikro talase. Ona se dobija digitalnom obradom signala koji su emitovani sa predajnika i koji su se kao povratni signali, odbijeni od ciljne površi, vratili nazad do antene, tj. prijemnika. Mikrotalasna energija koja se koristi kod SAR sistema je koherentna. To znači da faza odaslatah signala varira na kontrolisan način i tokom transmisije jednog signala, ali i od signala do signala, kao i da se fazni sadržaj odbijenih signala čuva kada se primi.

Osnovna merenja koja se vrše kod SAR sistema su: vreme odziva signala, energija, faza i pozicija SAR senzora u prostoru. Echo koji se registruje senzorom je linearna superimpozicija višestrukih odbijenih signala od svih elementa osvetljenog terena. Amplituda odbijenog signala je proporcionalna stepenu refleksije elementa terena i talasne dužine emitovanog signala. Upotreba koherentnog signala kod SAR-a znači da definicija refleksija radara mora takođe uzeti u obzir i faznu modifikaciju odbijenog elektromagnetskog talasa.

Snimanjem površi terena SAR sistemom dobija se dvodimenzionalna slika snimljenog područja. Dve dimenzije o kojima se ovde radi su **azimut** (engl. *azimuth*) i **odstojanje** (engl. *range*), a odnose na pravac leta i na pravac upravan na pravac leta, tj. paralelan sa antenom (Slika 2.5). Rezolucija za vrednosti azimuta zavisi od dužine antene i stoga je ograničena kada se koristi radar sa realnim otvorom (blendom). Upravo zbog toga se koristi princip sintetičkog otvora. On se sastoji u kombinovanju signala koje detektuje radar u toku leta, tj. signala koji su dobijeni na različitim pozicijama u prostoru. Na taj način, sintetički se formira jedna veoma dugačka antena.

Dok se senzor kreće duž pravca/orbite po kojoj se snima on emituje mikrotalasne impulse ka terenu i prima odbijene signale od površi terena. Do SAR prijemnika stiže čitav jedan niz signala koje karakteriše njihova **amplituda** i **faza**. Kao što je već rečeno, ovo omogućava da se u kasnijoj obradi signala formira jedna sintetička antena. Rezultat je slika visoke rezolucije koja sadrži vrednosti refleksije mikrotalasa od terena. U stvari, za svaki piksel SAR slike čuva se vrednost u vidu kompleksnog broja, pri čemu je amplituda tog kompleksnog broja mera refleksije, a faza odražava rastojanje (fazna razlika) od SAR antene do elementa na terenu koja odgovara tom pikselu. Pošto radar osvetljava značajno veliku površinu terena, primljeni odbijeni signal (eho) je superimpozicija velikog broja koherentnih ehoa od svih osvetljenih elemenata terena. Svaki od ovih eho signala je okarakterisan vremenom proteklim od odašiljanja i prijema signala (u zavisnosti od rastojanja elementa do senzora) i fazno pomeren (u zavisnosti od rastojanja elementa do senzora i njegovog stepene refleksije). Samo formiranje SAR slike se postiže na osnovu signala emitovanih sa različitim pozicija senzora duž trajektorije letelice. Pošto se SAR senzor pomera od jedne do druge lokacije za odašiljanje i prijem signala, rastojanje od senzora do tačke na terenu se takođe menja. Ovo znači i da će se fazni sadržaj eho signala emitovanih sa različitim pozicija takođe menjati. SAR slika se i dobija ekstrakcijom informacija o radarskoj refleksiji na tačkama terena, a kroz obradu digitalnih signala formiranih na osnovu primljenih eho signala. S obzirom da površ

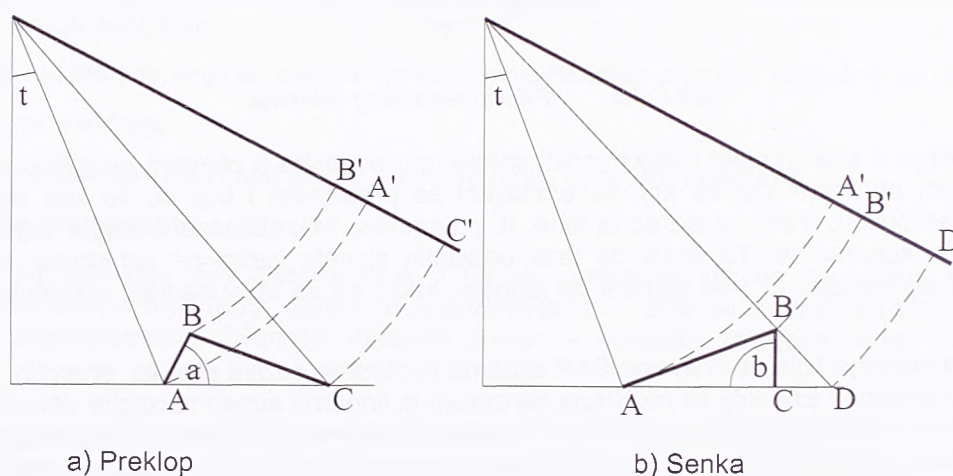


terena varira u visinskom smislu i da na terenu postoje trodimenzionalni objekti dobija se dvodimenzionalna slika koja je predstava trodimenzionalne scene čija refleksija varira kao funkcija prostornih koordinata. Pozicije tačaka na terenu mogu biti određene na dva načina:

- kao presečna tačka kružnice poluprečnika jednakog sračunatom rastojanju od senzora do tačke na terenu (*Doppler range*) i samog terena predstavljenog poznatim DMT-om;
- stereo-presekom dveju kružnica koje se odnose na istu tačku terena, a, koje su dobijene za dve pozicije senzora.

Za razliku od fotogrametrije gde se za određivanje položaja tačaka u prostoru neophodno poznavanje tačne i pozicije i orijentacije optičkog senzora (orijentacija žižne ravni optičkog senzora), to kod radara nije slučaj.

Neka od važnih svojstava SAR-a posledica su činjenice da su odstojanja od antena do tačaka na površi terena zakošena. Zbog toga kod radarskog snimanja dolazi i do specifičnih problema. To su **preklop** (engl. *layover*) i **senka** (engl. *shadow*). Preklop se manifestuje kao preklapanje signala koje se dešava u slučajevima kada je nagib dela površi koji je okrenut ka senzoru veći od ugla pod kojim se ta površ snima (Slika 2.6). Zbog toga dolazi do grešaka u određivanju pozicija tačaka na terenu. Senka je pojava koja je i inače prisutna kod svih tehnika snimanja iz vazduha i javlja se u slučajevima kada delovi objekata ili terena zaklanjaju druge objekte. Za razliku od preklopa, senka se javlja kada je nagib dela površi koji je okrenut suprotno od senzora, veći od ugla pod kojim se snima (Slika 2.6).



Slika 2.6 : Preklop i senka kod SAR-a

Kao i kod laserske metode, najčešće se koristi DGPS i INS da bi se odredila pozicija letelice i njena orijentacija u prostoru. Time se otklanja potreba za određivanjem orijentacionih tačaka na terenu.

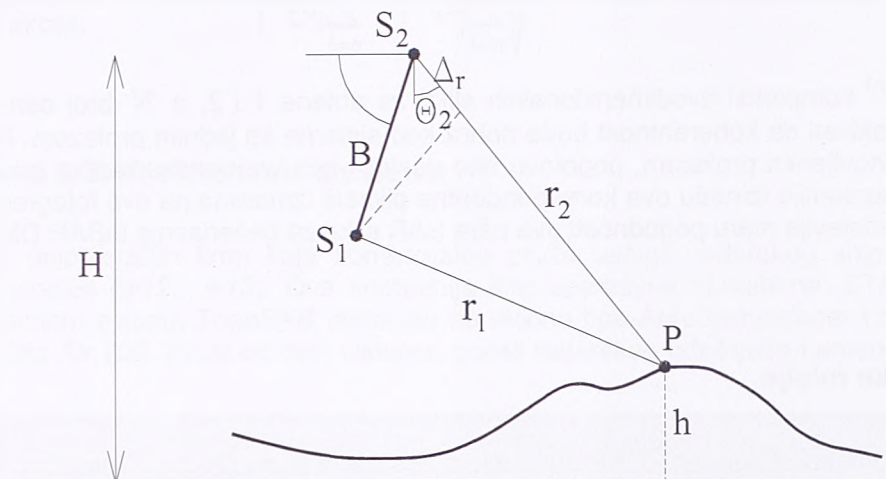
Osnovne karakteristike SAR tehnologije su:

- rezolucija SAR slike je nezavisna od rastojanja senzora do terena;
- tačnost koordinata SAR piksela ne zavisi od tačnosti orijentacije platforme sa senzorom;
- geometrijska tačnost SAR slike ne zavisi od rastojanja;
- SAR prikupljanje podataka ne zavisi od doba dana;
- oblaci ne ometaju SAR prikupljanje podataka.

### 2.3.2 InSAR (IFSAR)

Slika dobijena SAR snimanjem se odnosi na kosa odstojanja od senzora do terena, pa je potrebno prevesti ove podatke u odgovarajući koordinatni sistem, tj. kartografsku projekciju. Ovde dolazi do izražaja treći princip prisutan kod InSAR-a - **interferometrija**. Ovde se koristi visoka osetljivost faze koju sadrži svaki piksel SAR u zavisnosti od udaljenosti tačke na terenu od antene.

Princip interferometrije se u suštini sastoji u tome da se sa dva SAR senzora snimi ista površ terena sa dve skoro paralelne orbite. Tipična vrednost baze, tj. rastojanja između ove dve pozicije sa kojih se snima, je od 10m do 500m. Postoje dva načina da se ovo postigne. To su takozvani **InSAR sa ponovljenim prolazom** (engl. *repeat-pass*) i **InSAR sa jednim prolazom** (engl. *single-pass*). Kod prvog pristupa, koji je uobičajen kod snimanja iz satelita, dve SAR slike se snimaju u različitim trenucima vremena, recimo, u razmaku od nekoliko dana. Najčešće se slike snimaju sa istim senzorom. Tako se interferometrija može primeniti i kod sistema koji prvobitno i nisu bili zamišljeni da se koriste na ovaj način. Kod drugog pristupa se koristi posebno razvijen sistem koji podrazumeva radarski sistem sa dualnim kanalima sa glavnom antenom koja i emituje i prima signale, i sa sporednom antenom koja samo prima reflektovane signale. Ove dve antene se nalaze na fiksnom rastojanju (Slika 2.7).



Slika 2.7 : Princip interferometrije kod InSAR-a

Kod oba pristupa, na osnovu merenja dva SAR senzora, dobijaju se za svaku tačku terena različite vrednosti odstojanja  $r_1$  i  $r_2$ . Stoga, korespondentni pikseli za dve SAR slike imaju iste vrednosti amplitude, ali različite vrednosti faze. Određivanjem **fazne razlike**, tj. **interferometrijske faze** ( $\phi_1 - \phi_2$ ) dveju SAR slika dobijenih sa pozicija  $S_1$  i  $S_2$  (Slika 2.7) može se odrediti razlika rastojanja  $\Delta_r = (r_1 - r_2)$  dobijena sa dve antene vrlo precizno po formuli:

$$\Delta_r = \frac{\lambda}{2p\pi} \cdot (\phi_1 - \phi_2), \quad (2-20)$$

gde je  $p=2$  za interferometriju sa ponovljenim prolazom, a  $p=1$  za interferometriju sa jednim prolazom. Ova fazna razlika se meri za svaki piksel. Rezultat je **interferogram** koji sadrži vrednosti razlika faza tj. paralaksi.

Princip je sličan kao i kod aerofotogrametrije, gde se visina računa na osnovu snimaka dobijenih iz dva različita pravca, s tom razlikom što se umesto amplitude signala koristi faza signala. Merenjem faze dobija se tačan digitalni model površi koji je nezavisan od kontrasta. Prednost kod merenja faze je što se  $\Delta_r$  može dobiti sa milimetarskom tačnošću i to nezavisno od kontrasta na slici, tako da se bez problema može dobiti digitalni model i za površi kao što su vodene površine ili površine pod ledom. Naravno, da bi se to postiglo, mora se prethodno rešiti problem  $2\pi$  **neodređenosti faze** (engl. *ambiguity*) jer su vrednosti faza na SAR slikama ograničeni na opseg od 0 do  $2\pi$ , pa je potrebno odrediti celi broj talasnih dužina. Procedura se naziva **odmotavanje faze** (engl. *phase unwrapping*) i izvodi se na osnovu kontrolnih tačaka na terenu.

Kada su fazna razlika  $\Delta_r$  i odstojanje  $r_1$  poznati, visina tačke P (Slika 2.1) se može dobiti jednostavno po formuli:

$$h = H - (r_1 + \Delta_r) \cdot \cos \Theta_2, \quad (2-21)$$

gde je  $H$  visina antene  $S_2$  iznad referentne površi.



Drugo korisno svojstvo InSAR-a je mogućnost ocene **koherentnosti** (engl. *Coherence*). Koherentnost predstavlja meru koja pokazuje koliko je razlika u signalu koji se odbijen vratio do antena uređaja. S obzirom na ciljeve koji imaju efekat rasipanja u prostoru, jasno je da rasuti signal koji se vrati i registruje od strane dve antene neće biti identičan, tj. faze bez dodatka  $\Delta_T$  i amplitude neće biti iste, što prouzrokuje razliku u koherentnosti. Koherentnost se definiše kao (*Damoiseaux 2000*):

$$\gamma = \frac{\sum_{n=1}^N c_1^{(n)} \cdot c_2^{(n)}}{\sqrt{\sum_{n=1}^N |c_1^{(n)}|^2 \cdot \sum_{n=1}^N |c_2^{(n)}|^2}}, \quad (2-22)$$

gde su  $c_1^{(n)}$  i  $c_2^{(n)}$  kompleksi dvodimenzionalnih slika za antene 1 i 2, a  $N$  broj osrednjenih uzoraka. Prirodno je za očekivati da koherentnost bude dobra kod sistema sa jednim prolazom, dok je ona slabija za sisteme sa ponovljenim prolazom, pogotovo ako postoji veća vremenska razlika između dva prolaza. Kao i koeficijent korelacije između dva korespondentna piksela izmerena na dva fotogrametrijska snimka, i koherentnost predstavlja meru pogodnosti dva para SAR slika za generisanje InSAR DMT-a.

### 2.3.3 Satelitske misije

Tipična rezolucija snimaka dobijenih SAR snimanjem iz satelita je od 5m do 100m. Ovi podaci se češće i duže koriste od onih dobijenih avio InSAR-om. Ovi podaci se često koriste za formiranje nacionalnih DMT-a. primeri su *Radarmap* projekat za Nemačku i *LANDMAP* projekat za Veliku Britaniju (*Morley 2000*). Podaci koji se najčešće koriste za ove primene su prikupljeni u okviru satelitske misije ESA ERS 1/2, a koriste se i podaci iz misija *RADARSAT*, *JERS* i *ENVISAT*.

**ERS-1/2** misija je realizovana sa dva satelita koji funkcionišu kao tandem. *ERS-1* prikuplja snimke terena jedan dan nakon *ERS-1* satelita. Na taj način se smanjuje vremenska dekorelacija snimaka (površni terena) između dva snimanja. *ERS-1* je lansiran jula 1991. godine, a *ERS-2* u aprilu 1995. od kada je i počela ozbiljna komercijalna eksploatacija ovih sistema. SAR senzor koristi radarski signal C-opsega frekvencije 5.3GHz. Nagib snimanja je  $23^\circ$ , prostorna rezolucija 10-30m, a širina trake 100km.

Oba *ERS* satelita imaju Suncu asinhronu orbite sa nagibom od  $98^\circ 52'$  i visinom između 782 i 785km. Ciklus ponovnog prelaska iznosi 35 dana, s tim što on iznosi i kraće zbog preklopa traka iz pojedinih putanja. Veličina scene koja se dobija iz ove misije je  $100 \times 100 \text{ km}^2$ . Cena jedne scene je od 1000 do 1400 EUR u zavisnosti od stepena obrade. Predviđeni su i popusti od 25%, odnosno 50% za narudžbe od 10-50, odnosno više od 50 scena respektivno.

Rezolucija **RADARSAT** senzora je 7.8m, pri čemu sistem koristi radio talase sa talasnom dužinom od 6cm. Veličine scena i rezolucija se mogu birati. Ova satelitska misija, kao i druge SAR satelitske misije, kao što su *JERS* i *ENVISAT*, standardno obezbeđuju podatke za interferometrijsko procesiranje.

**Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)**. Misija je izvedena 2000. godine. Šatl je na sebi poneo dva SAR sistema. Prvi sistem je SAD C-opseg, a drugi Nemačko/Italijanski X-opseg. To je prvi satelitski SAR sistem koji je omogućio InSAR procesiranje sa jednim prolazom. Ovo je omogućeno time što je na svemirski šatl montirana antena dužine 60m na čijem se kraju nalaze X-opseg ( $\lambda=3\text{cm}$ ) i C-opseg ( $\lambda=5.6\text{cm}$ ) antene prijemnici. U samom šatlu su smešteni X-opseg i C-opseg antene koje su i predajnici i prijemnici. Visina orbite je 233km, dok je nadirni ugao snimanja za C-opseg SAR između  $31^\circ$  i  $61^\circ$ , dok je za X- opseg SAR ovaj ugao između  $50^\circ$  i  $54^\circ$ . Širina trake snimanja za C-opseg sistem je 225km, a za X-opseg širina trake je 45km.

U okviru ove misije prikupljeni su podaci o površi terena za 80% zemljine teritorije pod kopnom (*Bamler 1999, Kocak 2004, w15, w16*). Senzor sa C-opsegom je pokrio 94.6% zemljine kopnene teritorije dva puta, i oko 50% tri puta. Višestruki podaci za neko područje vrlo značajno utiču na tačnost dobijenog DEM-a. Postoji više vrsta podataka koji u prikupljeni ovim sistemom, ali neke generalne specifikacije su: veličina grida je 1" tj. približno  $30 \times 30 \text{ m}$ , CE90=16m apsolutna tačnost visina (CE - Circular Error), LE90=10m relativna tačnost visina (LE - Linear Error) i LE90=20m apsolutna tačnost pozicije u horizontalnom smislu. Navedene vrednosti za tačnost predstavljaju granice opsega u kome se mora naći bar 90% podataka. Interesantno je da je eksperimentalnom proverom ovih podataka utvrđeno

da je njihova tačnost u praksi znatno veća i da za testirana područja iznosi ispod 5m (Heipke 2001, Kocak 2004). Za horizontalni datum je korišćen WGS 84, a za vertikalni WGS 84 elipsoid.

Postoje najave da će svi podaci prikupljeni i obrađeni u okviru ove misije biti dostupni uz plaćanje samo troškova koji se odnose na cenu medija za njihovu isporuku (Werner 2001). Na žalost, autor ovog rada nije uspeo da dođe do ovih podataka, iako na Internetu postoje adrese na kojima se ovi podaci mogu naručiti za neka područja. Za neka područja su ti podaci dati samo u jednom grubom gridu od 3", tj. ~90m (C-opseg), ali ne i u osnovnom gridu od 1", tj. ~30m.

Ono što je veoma značajno kada su u pitanju podaci SRTM misije je da su to najtačniji DEM podaci koji postoje za skoro celokupnu teritoriju planete Zemlje. Zbog toga ovi podaci predstavljaju idealan osnov za inicijalnu orijentaciju i georeferenciranje podataka više tačnosti, za odmotavanje faze i proračun atmosferske korekcije.

### 2.3.4 Snimanje InSAR sistemom iz aviona

Jedna od najpoznatijih firmi koja komercijalno pruža usluge radarskog snimanja iz aviona je Intermap Technologies (w12, w13). Ova kompanija ima operativna tri sistema: STAR-3i instaliran na LearJet 36A mlaznom avionu, TopoSAR instaliran na avionu tipa AeroCommander i STAR-4 instalirana na avionu tipa King Air 200. Svaki od ovih sistema, pored radarskog odašiljača i antena, ima i GPS i INS opremu.

Parametri	STAR sistemi		
	STAR-3i	TopoSAR	STAR-4
Avion	LearJet 36A	Aero Commander 690-1000	King Air 200
Standardna brzina leta	750 km/h	400 km/h	400 km/h
Standardna nadmorska visina	3-10km	3-9km	3-9km
Širina trake (zavisi od terena)	3-10km	3-8km	8-11km
Frekvencija	9.57GHz (X-opseg)	9.55GHz (X-opseg)	9.58GHz (X-opseg)
Raspon opsega	67.5 i 135 MHz	do 400MHz	67.5, 135 i 270 MHz
Nagib antene	30°-60°	30°-60°	30°-60°
Polarizacija	HH	HH	HH
InSAR baza	0.9m	0.6 ili 1.8m	0.98m
Najbolja rezolucija	1.25m	0.5m	standardno 1.25m (planirano do 0.5m)

Tabela 2-3 : Glavne tehničke specifikacije Intermap STAR sistema (Li 2004)

Najimpresivniji od ovih sistema je svakako STAR-3i. Sistem se sastoji od InSAR opreme montirane na LearJet 36 mlazni avion. U stanju da prikuplja visine za tačke koje čine pravilni raster sa razmakom od 5-10m i tačnošću visina od 1.5-3m brzinom od 1000-2000 km<sup>2</sup>/h (maksimalno 7500 km<sup>2</sup>/h, sa visine od 12200m) (w12). Pod idealnim uslovima sistem je u stanju da snimi područje od 30000km<sup>2</sup> za samo jedan dan (Mercer 1998).

Pored ovih sistema na tržištu postoje i drugi operatori i njihovi avio InSAR sistemi. Jedan od takvih sistema je i GeoSAR. To je sistem koji radi na dve frekvencije (X i P-opseg).



### 2.3.5 Obrada podataka

Obrada sirovih podataka dobijenih InSAR snimanjem započinje odvojenom obradom signala prikupljenih sa dve antene. Softver za obradu kombinuje GPS/INS merenja sa GPS podacima sa terena da bi se generisale neophodne informacije za formiranje SAR slike i kasnije procesiranje slika sa dve antene korišćenjem principa interferometrije. Rezultat tog procesiranja su dve slike od kojih se prva odnosi na vrednosti faze (interferogram), a druga na vrednosti koherentnosti. Interferogram predstavlja dvodimenzionalnu sliku faznih razlika između dveju slika. Fazne razlike sadrže više  $2\pi$  celina i jedan deo koji je od 0 do  $2\pi$ , ali je samo vrednost za deo fazne razlike registrovana na interferogramu. Zato je potrebno da se kroz proces odmotavanja faze odredi apsolutna vrednost fazne razlike. Tek nakon toga se mogu sračunati visine za sve piksele SAR slike po formuli (2-17). Georeferenciranjem ovih slika dobija se DMP, ortorektifikovana SAR slika i ortorektifikovana slika koherentnosti. Na osnovu ovih slika, daljom klasifikacijom i ekstrakcijom informacija mogu se dobiti i drugi proizvodi kao što je to karta sa izohipsama ili čak topografska karta sa objektima u vektorskom obliku (*Damoiseaux 2000*).

Više SAR slika, odnosno DMP-ova se mozaikuju u jednu celinu. Biraju se optimalni delovi DMP-a dobijeni iz slika koje se preklapaju, a odnose se na različite pravce leta i pojase, pa na osnovu njih napraviti mozaik koji čini konačan DMP. Pri tome se praznine u podacima popunjavaju nekom od metoda interpolacije. Takođe se i otkrivaju i eliminišu grube greške u podacima.

Dobijeni DMP treba prevesti u DMT (DEM) korigovanjem visina koje se odnose na vegetaciju, zgrade i sl., a isto tako treba izvršiti glačanje dobijenog DMT-a korišćenjem odgovarajućih filtera. Problemi i postupci za prevazilaženje tih problema su dosta slični onima kod obrade DMT-a dobijenog LiDAR metodom, s tom razlikom da se kod SAR podataka merenja većinom odnose na DMP površ terena, dok to kod LiDAR-a zavisi od toga da li se koristi prvi ili zadnji impuls. Svođenje visina sa vegetacije i objekata na površ terena se uglavnom radi automatskim procedurama. Međutim, da bi se dobio proizvod zadovoljavajućeg kvaliteta manuelno editovanje je neophodno u većini slučajeva. I pored toga, tačnost dobijenog DMT-a je često niža od tačnosti DMP-a.

### 2.3.6 Kvalitet podataka, efikasnost i ekonomičnost

Kvalitet podataka dobijenih avio InSAR snimanjem, u smislu pozicione tačnosti, zaostaje u odnosu na one dobijene laserskim snimanjem. Međutim, ova razlika u pogledu tačnosti dolazi do izražaja samo kod projekata gde se zahteva najviša tačnost, kao što je izrada podloga razmera 1:1000 do 1:2500. U svim ostalim primenama te razlike su skoro zanemarljive. Srednja kvadratna greška STAR sistema za DMP iznosi od 0.5-3m, a za DMT 0.7-1.0m.

Kada je reč o satelitskim misijama *ERS 1/2* i *RADARSAT* u literaturi su publikovani rezultati u kojima se navodi srednja kvadratna greška od 3.5m za ravne, otvorene terene i oko 10m za terene pod vegetacijom (*Morley 2000*). Tačnost i cena DMT-a dobijenog na osnovu *RADARSAT* snimaka upoređljiva je sa ovim parametrima za DMT dobijen iz *SPOT*-ovih snimaka i iznosi 10-15m (*Mercer 1998*). Generalni problem sa satelitskim InSAR podacima, sa izuzetkom onih dobijenim iz *SRTM* misije, je da se tu radi o podacima dobijenim sa dvostrukim prolazom, pa se javljaju problemi koherentnosti SAR slika i grešaka koje su posledica atmosferskih uticaja.

Očekivana tačnost *SRTM* DEM produkata je nešto manja i nalazi se u intervalu od 7-15m, ali se u literaturi mogu naći i rezultati koji ukazuju na znatno višu tačnost gde se srednja kvadrtna greška kreće u rasponu od 3 do 5m (*Heipke 2001, Kocak 2004*). Kao i podaci iz drugih misija i *SRTM* podaci su opterećeni značajnim greškama, od kojih su posebno značajne greške preklopa u planinskim područjima i praznine u podacima.

Tačnost InSAR-a DMT-a zavisi od:

- kalibracije sistema;
- kvaliteta sistema za merenje pozicije i orijentacije senzora;
- dužine baze između dve InSAR antene;
- visine i brzine leta;
- količine i tipa drveća i zgrada na terenu.

Kod izrade DMT-a, treba voditi računa o greškama koje se tipično javljaju kod InSAR-a. Ove greške treba analizirati i koliko je to moguće odstraniti iz rezultata. To su, pre svega:

- greške koje se odnose na određivanje faze (engl. *phase unwrapping*), gde čak i male greške proizvode velike greške kod visina;
- greške u određivanju orijentacije baze kod InSAR-a, što prouzrokuje nagib DMT-a za isti iznos;
- nehomogenosti atmosfere koje prouzrokuju neravnomerno prostiranje talasa – kod sistema sa jednim prolazom ove greške se poništavaju, jer isti uslovi važe za signale koji putuju do obe antene;
- šumovi kod merenja faze;
- greške zbog preklopa;
- greške usled višestruko odbijenih signala i dr.

Bez obzira na izvor InSAR(SAR) podataka treba voditi računa da je odraz radarskog signala na terenu relativno veliki (nekoliko metara),

Efikasnost prikupljanja podataka za potrebe izrade DMT-a primenom radarske metode je vrlo velika. Kada je u pitanju DMT sa nivoom detaljnosti i tačnosti koji odgovara kartama od 1:5000 – 1:50000 ova metoda trenutno nema premca. Kao što je već rečeno, STAR-3/ InSAR sistem firme *InterMap Technologies* je u stanju da prikuplja podatke na osnovu kojih se generiše DEM sa veličinom grida od 5-10m i tačnošću visina od 1-3m (srednja kvadratna greška) brzinom od 1000-2000 km<sup>2</sup>/h (*Mercer 1998, w12*). U GT2 modu prikupljanja podataka, ovaj sistem leti na visini od oko 6000m i prikuplja radarske podatke rezolucije 2.5m za traku širine 10km. Na osnovu ovih podataka dobija se DEM sa veličinom grida od 5m i visinskom tačnošću od 2m (srednja kvadratna greška). Pod idealnim uslovima sistem je u stanju da snimi područje od 30000km<sup>2</sup> za samo jedan dan (*Mercer 1998*). Koliko je efikasna aero InSAR govori i podatak da je firma *InterMap Technologies* pokrenula i nekoliko NEXTMap misija koje imaju za cilj pokrivanje čitavih državnih teritorija primenom STAR tehnologije. Primer tih misija su *NEXTMap Britain*, *NEXTMap Indonesia* i *NEXTMap USA*. Poslednja misija predstavlja “kartiranje decenije”, jer ima za cilj da se iskartira čitava kontinentalna teritorija SAD od 7.9 miliona kvadratnih kilometara samo za nekoliko godina i uz visinsku i položajnu tačnost od 1m ili bolje (*Li 2004*).

U literaturi (*Sties 2000*) i na Internetu (*w12*) može se naći podatak da cena DMT-a dobijenog radarskom metodom iznosi oko 1000 – 2000 USD za površ terena dimenzija 7.5' x 7.5', (~160 km<sup>2</sup>), a u zavisnosti od zahtevane tačnosti, što iznosi oko 6-12USD/km<sup>2</sup>. Ova cena se odnosi na kupovinu podataka samo za sopstvene potrebe, bez prava na dalju prodaju i distribuciju. Ukoliko kupac želi i ovakva prava nad podacima, onda se cena obično duplira. Kada se sve ovo uzme u obzir, dobija se da cena podataka radarskog snimanja okvirno iznosi od 12-80 USD/km<sup>2</sup> u zavisnosti od zahtevane tačnosti, stepena obrade, površine za koju se prikupljaju podaci i prava koja se pri tome dobijaju nad podacima. Ako se ova cena uporedi sa cenom podataka dobijenih laserskom metodom, vidi se da je ona za red veličine niža. Ovde svakako ne treba smetnuti sa uma da je kod InSAR-a reč o podacima kod kojih je visinska tačnost metarska ili par metara, dok je tačnost koju LiDAR standardno ostvaruje za red veličine viša, tj. par decimetara. U literaturi se može naći skoro neverovatan podatak da je kod snimanja teritorije Velike Britanije primenom avio InSAR-a ostvarena cena od 5 USD/km<sup>2</sup>, uz tačnost oko 0.5m za teren bez vegetacije i objekata (*Dowman 2004*). Međutim, nije jasno da li je to proizvodna cena ili cena koju plaća korisnik. Ako je to korisnička cena, onda se najverovatnije tek sa višestrukom prodajom ovog proizvoda pokrivaju troškovi izrade DMT-a i ostvaruje profit.

## 2.4 Digitalizacija podataka sa postojećih podloga

Digitalizacija postojećih podloga je tehnika koja je u prošlosti veoma često korišćena za prikupljanje digitalnih podataka za potrebe izrade DMT-a. Ovo je sasvim razumljivo ako se ima u vidu da je većina institucija u trenutku kada su pristupale rešavanju problema izrade nacionalnog DMT-a već posedovala veliku količinu ovih informacija u formi planova i karata. Sa druge strane, laserska i radarska metoda, kao i digitalni fotogrametrijski sistemi, u to vreme još uvek nisu bili u dovoljnoj meri razvijeni da bi mogli uspešno da konkurišu u pogledu efikasnosti ni postojećim metodama snimanja, ni digitalizaciji postojećih podloga. Upravo zato, veliki procenat postojećih podataka za formiranje nacionalnih DMT-a čine upravo podaci dobijeni digitalizacijom postojećih podloga. Ponekad se ovi podaci dopunjavaju i podacima



dobijenim drugim metodama rada kao što je fotogrametrijska restitucija. Na taj način se može značajno podići kvalitet prikupljenih podataka, kao u pogledu same tačnosti, tako i u pogledu ažurnosti dobijenog DMT-a.

#### 2.4.1 Digitalizacija postojećih podloga

Postoji više različitih tehnika za prevođenje visinskih informacija sa postojećih podloga u digitalni oblik. Zajedničko za sve njih je da se one u osnovi sastoje od digitalizacije izohipsi, tj. od prevođenja linija koje predstavljaju izohipse i koje su iscrtane na kartografskoj podlozi u odgovarajući digitalni oblik, kao i dodeljivanju visina dobijenim izohipsama. Ovako dobijeni podaci se često dopunjavaju i drugim informacijama koje se nalaze na podlogama koje se koriste kao izvor podataka. Najčešće se tu radi o digitalizaciji pojedinačnih tačaka sa kartografske podloge za koje su upisane visine, ili pak, o digitalizaciji strukturalnih linija terena koje su iscrtane na podlozi (hidrografija, useci, litice, ...).

Sve u svemu, najveći obim posla kod digitalizacije visinske predstave sa postojećih podloga se praktično sastoji od vektorizacije izohipsi. Vektorizacija linijskog sadržaja je problem koji je inače aktuelan u svim situacijama kada treba sadržaj neke kartografske podloge prevesti u vektorski digitalni oblik. Povoljna okolnost kod digitalizacije izohipsi sa postojećih podloga je u tome da se sadržaj visinske predstave sastoji od vrlo jednostavne topologije podataka. Nije čak neophodno voditi računa o tome da se svi segmenti jedne izohipse međusobno povežu u jednu celinu.

Do pojave jeftinih skenera velikog formata, za potrebe poluautomatske vektorizacije karata sa izohipsama često su se koristili specijalizovani uređaji, takozvani **uređaji za praćenje linija** (engl. *Line followers*). To su bili vrlo skupi i glomazni uređaji, koji su istina, omogućavali solidnu brzinu rada. Princip rada se sastoji u tome da operater pozicionira glavu senzora na izohipsu, a zatim senzorska glava automatski prati izohipsu do kraja ili do preseka sa drugim linijama, kada se od operatera očekuje da da dalje instrukcije za rad. Pri kretanju glave senzora po izohipsi vrši se registrovanje koordinata. Ceo postupak se može pratiti na monitorima visoke rezolucije. Kod nas ovih instrumenata nema i nije realno očekivati da će se neko danas odlučiti za njihovu nabavku.

Mnogo jeftiniji i komforniji način vektorizacije izohipsi je skeniranje karata i poluautomatska ili automatska **vektorizacija izohipsi sa skeniranih podloga**. Da bi se ova tehnologija primenila nisu potrebna veća ulaganja. Dovoljna je nabavka jednog skenera velikog formata i nekoliko radnih stanica opremljenih odgovarajućim softverom. Podloge se skeniraju uglavnom u rezoluciji 300-600 DPI. Najpovoljniji slučaj je ako se raspolaže sa podlogama na kojima je data samo visinska predstava terena, jer je sadržaj na taj način znatno rasterećen. Ukoliko to nije slučaj, a podloge su urađene u više boja, može se ići na skeniranje u koloru i separaciju sadržaja po bojama. Tako se može efikasno eliminisati sadržaj koji nije interesantan za vektorizaciju. Tu do izražaja dolazi kvalitet softvera, jer postupak separacije nije uvek trivijalan zbog različitih nijansi boja koje se javljaju na skeniranoj slici.

Nakon skeniranja podloge i separacije boja, vrši se georeferenciranje i otklanjanje deformacija karte. Ova faza se može uraditi i nakon vektorizacije sadržaja, ali je mnogo jednostavnije i bolje da se ovaj postupak izvrši odmah na početku, da bi se utvrdio kvalitet podloge i samog skeniranja. U slučaju da se u ovoj fazi ne dobiju zadovoljavajući rezultati može se doneti odluka da se ponovi skeniranje. Druga mogućnost je da se izabere neka druga podloga sa istim sadržajem. Tek kada se ovde dobiju zadovoljavajući rezultati ima smisla ići na vektorizaciju sadržaja.

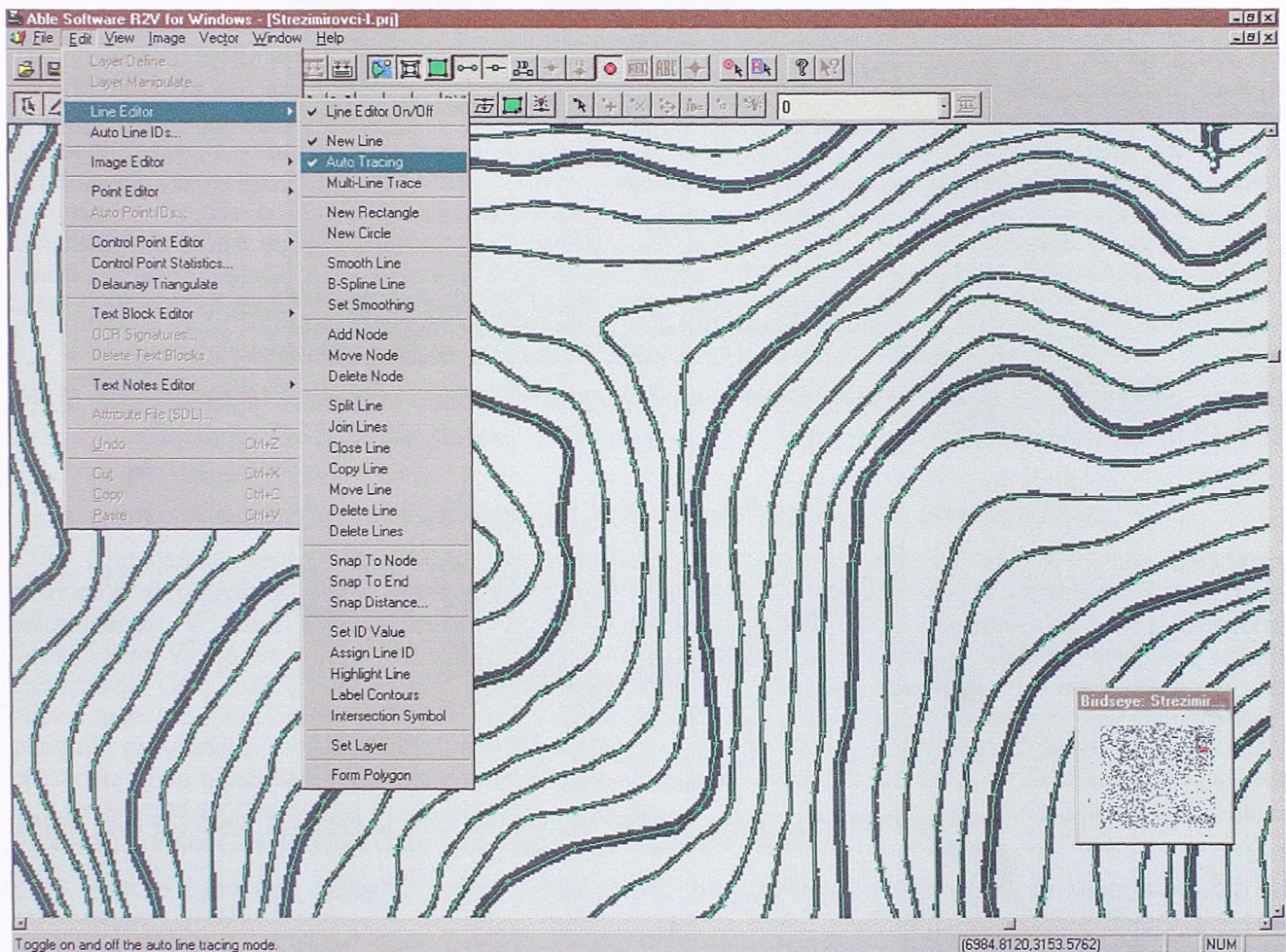
Poslednjih decenija u nauci i praksi se dosta radilo na razvoju efikasnih postupaka za poluautomatsku i automatsku vektorizaciju sadržaja sa postojećih podloga. Matematičke osnove i algoritmi koji se ovde primenjuju standardno se izučavaju u teoriji digitalne obrade slika (engl. *Digital Image Processing*). Razvoj ovih algoritama i postignuti napredak u pogledu performansi personalnih računara doveo je do toga da danas na tržištu mogu da se nađu relativno jeftina softverska rešenja koja u kombinaciji sa standardnim računarskim hardverom u potpunosti zadovoljavaju potrebe vektorizacije izohipsi.

Može se reći da potpuno **automatska vektorizacija** bez naknadnog manualnog editovanja dobijenog vektorskog sadržaja još uvek nije moguća, ili bar nije moguća kada su u pitanju kartografske podloge standardnog kvaliteta i sadržaja. Naime, brojni ispisi na karti ili planu i drugi sadržaj koji se preklapa sa izohipsama dovode do pojave velikog broja grešaka nakon softverskog procesiranja skenirane slike. Sve ove greške potrebno je naknadno manualno korigovati. Problem je pri tome pronaći sva problematična mesta u vektorizovanom sadržaju. Sa druge strane, sam proces automatske



vektorizacije može značajno da se unapredi, pa čak i da se dobiju rezultati bez grešaka, ako se pre samog procesiranja slike izvrši njeno "čišćenje" od sadržaja koji može prouzrokovati greške. Ovo čišćenje može da se obavi automatski, primenom posebnih softverskih procedura, ili manuelno. Jedan, primer automatskog čišćenja je prepoznavanje i ekstrakcija svih tekstualnih ispisa sa skenirane podloge. Drugi primer je odstranjivanje nečistoća, tj. usamljenih piksela ili grupica piksela (šum) koje su posledica zaprljanosti podloga, nesavršenosti skenera, ili se naprosto radi o sadržaju koji se ne želi vektorizovati. Kvalitet i efikasnost automatske vektorizacije svakako u velikoj meri zavisi i od funkcija softvera koje su korisniku na raspolaganju za kasnije ispravljanje inicijalnog vektorskog sadržaja koji, po pravilu, sadrži veću ili manju količinu grešaka.

Za razliku od automatske, kod poluautomatske vektorizacije se znatno ređe javljaju greške, jer operater sve vreme kontroliše ceo postupak i razrešava moguće problematične situacije. Po nekim ispitivanjima, ovakav postupak je skoro dva puta brži od automatske vektorizacije praćene naknadnim ispravljanjem grešaka. Ovo je razumljivo, posebno ako se ima u vidu da svakoj izohipsi i inače treba dodeliti odgovarajuću visinu. Kod poluautomatske vektorizacije ovo se radi zajedno sa poentiranjem izohipse na ekranu, tako da to ne predstavlja dodatni utrošak vremena, dok se to kod automatske vektorizacije mora naknadno uraditi, nakon procesiranja slike.



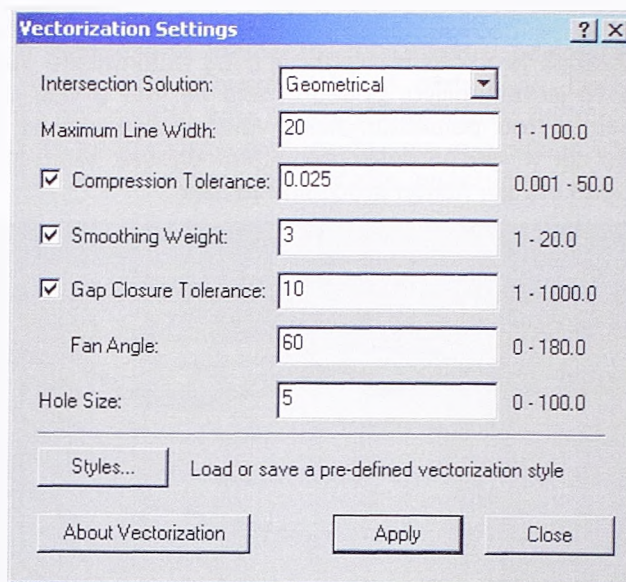
Slika 2.8 : Primer korisničkog interfejsa softvera R2V firme Able Software Corp. sa vektorizovanim izohipsama

Softver koji se koristi za ove potrebe obično raspolaže brojnim parametrima preko kojih se utiče na sam postupak vektorizacije. Ovim parametrima se najčešće zadaje:

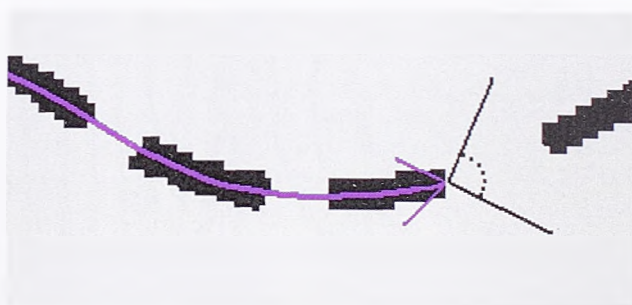
- tačnost aproksimacije tj. odstupanja linije u vektorskom obliku od iste u rasterskom obliku (glačanje i generisanje linija);
- debljina rasterske linije koju treba predstaviti jednom linijom u vektorskom obliku;
- najkraći segment linije;
- maksimalno rastojanje između dva segmenta iste linije koje treba premostiti tj. ignorisati;
- prag za ignorisanje praznina unutar jedne linije;



- parametri za podešavanje vektorizacije isprekidanih i tačkastih linija;
- brzina praćenja linije;
- vreme čekanja na račvanju linije na dve strane;
- ugao za limitiranje opsega u okviru kog se traži veza za nastavak prekinute linije;
- parametar za selekciju relevantnog sadržaja sa rasterske slike tj. opseg vrednosti piksela koji se smatraju elementima vektorskog sadržaja.



Slika 2.9 : Podešavanje parametara za vektorizaciju kod ArcScan ekstenzije softvera ArcGIS (ESRI 2004)



Slika 2.10 : Ugao za limitiranje opsega u okviru kog se traži veza za nastavak prekinute linije (ESRI 2004)

## 2.4.2 Obrada podataka

Obrada podataka dobijenih digitalizacijom postojećih podloga može obuhvatiti sledeće postupke:

- povezivanje prekinutih izohipsi;
- dodeljivanje visina i drugih atributa izohipsama;
- kontrola i korekcija slaganja i povezivanje digitalizovanog sadržaja na spojevima susednih planova ili karata;
- dodeljivanje visina i drugih atributa digitalizovanim strukturnim linijama;
- otkrivanje i eliminacija grubih grešaka u merenjima;

- dopuna podataka sa podacima iz drugih izvora i njihovo usaglašavanje;
- filtriranje ili generalizacija podataka i sl.

Povezivanje prekinutih digitalizovanih izohipsi je operacija koja je neophodna ako se u toku rada primenjuje neka metoda za automatizovano dodeljivanje visina izohipsama. Ova obrada se obično izvodi primenom procedura za digitalnu obradu slika, pre same vektorizacije. Alternativa ovim procedurama su procedure koje se zasnivaju na vektorskoj obradi podataka. U literaturi je predstavljen jedan takav postupak koji se zasniva na formiranju ograničene Delaunay-jeve triangulacije - DT (poglavljje 3.3.1). Koristeći dualni graf ove triangulacije tj. Voronoi dijagram - VD (poglavljje 3.3.1) i koncept skeleta i kore (engl. *skeleton, crust*) za generalizaciju krive (detaljnije objašnjeno u poglavljju 3.4.2.1, *Amenta 1998, Amenta 1998a, Amenta 1999, Amenta 2001, Dakowicz 2002, Dakowicz 2002a, Gold 2000, Gold 2002, Thibault 2000*), mogu se rekonstruisati delovi izohipse koji nedostaju (*Spinello 2004*). Postupak se sastoji u tome da se prvo formira ograničena Delaunay-jeva triangulacija za koju se svi segmenti izohipsi tretiraju kao obavezni linijski segmenti iz ulaznog skupa podataka. Nakon toga se formira kora na osnovu DT (VD). Zatim se iz triangulacije brišu sukcesivno sve izohipse koje su kompletne. To su izohipse koje su u vidu zatvorenih poligona ili su to otvoreni poligoni čije se obe krajnje tačke nalaze na granici područja ulaznih podataka. Zatim se vrši obrada preostalih izohipsi, pri čemu se prekidi obrađuju nezavisno, počevši od jednostavnijih (određenijih) slučajeva ka složenijim (manje određenim). Za svaki prekid se uzimaju krajnje tačke prekida, a zatim se za svaku od ovih tačaka formira po jedan skup koji se sastoji od Voronoi temena koji su susedni posmatranoj tački. Svakom od ovih temena se dodeljuje težina koja je zavisna od njegovog rastojanja do posmatrane tačke (dužine odgovarajuće stranice DT) i razlike njegovog azimuta i azimuta tangente na izohipsu u posmatranoj tački. Prekid izohipse se elimiše formiranjem nedostajućeg segmenta na osnovu izabranih Voronoi temena (stranica DT). Kada se neka izohipsa kompletira, ona se briše iz skupa podataka koji se dalje obrađuje po opisanoj proceduri. Pa ipak, konstatovano je da automatska obrada i povezivanje svih izohipsi nije uvek moguća (*Spinello 2004*). Naime, u radu sa stvarnim podacima i topografskim kartama pojavljuju se problemi koji su vezani za loše uslove i topološke greške. Najčešći uzročnici ovih problema su:

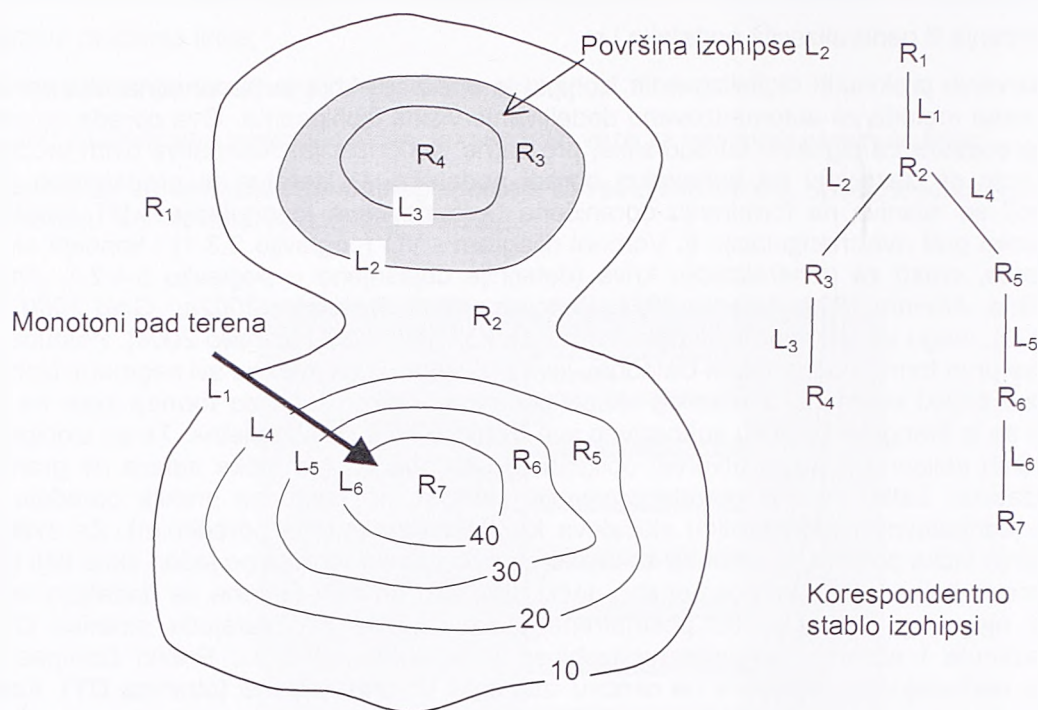
- debele linije, tj. linije nastale spajanjem dve izohipse u jednu (slepljene izohipse);
- preklapanje izohipsi i brojki koje označavaju visine izohipsi (problem se može ublažiti prethodnim OCR procesiranjem i eliminacijom sadržaja koji se odnosi na visine izohipsi iz ulaznog skupa podataka);
- topološki problemi na mestima gde se izohipse seku sa drugim linjskim sadržajem.

Dodeljivanje visina i drugih atributa izohipsama se može izvoditi interaktivno, u toku izvođenja manuelne ili poluautomatske vektorizacije (praćenje linije), ili naknadno nakon završene automatske vektorizacije. U literaturi se mogu naći radovi u kojima se opisuju postupci za automatizovano dodeljivanje visina vektorizovanim izohipsama samo na osnovu minimalne količine inicijalno unetih informacija (*Wu 1993, Kamada 1990*). Ovi postupci se uglavnom zasnivaju na teoriji grafova. Te informacije uključuju visine za manji broj izohipsi ili karakterističnih visinskih tačaka. Na osnovu ovih početnih podataka pravi se jedan konceptualni model u formi stabla sa izohipsama (engl. *contour tree*), preko kojeg se izražavaju međusobni odnosi između izohipsi, tj. topologija izohipsi. Struktura ovog stabla je u stvari graf sa čvorovima (engl. *nodes*) i vezama (engl. *edges*). Vezama su predstavljene izohipse, a čvorovima regioni koji predstavljaju područja između izohipsi (Slika 2.11).

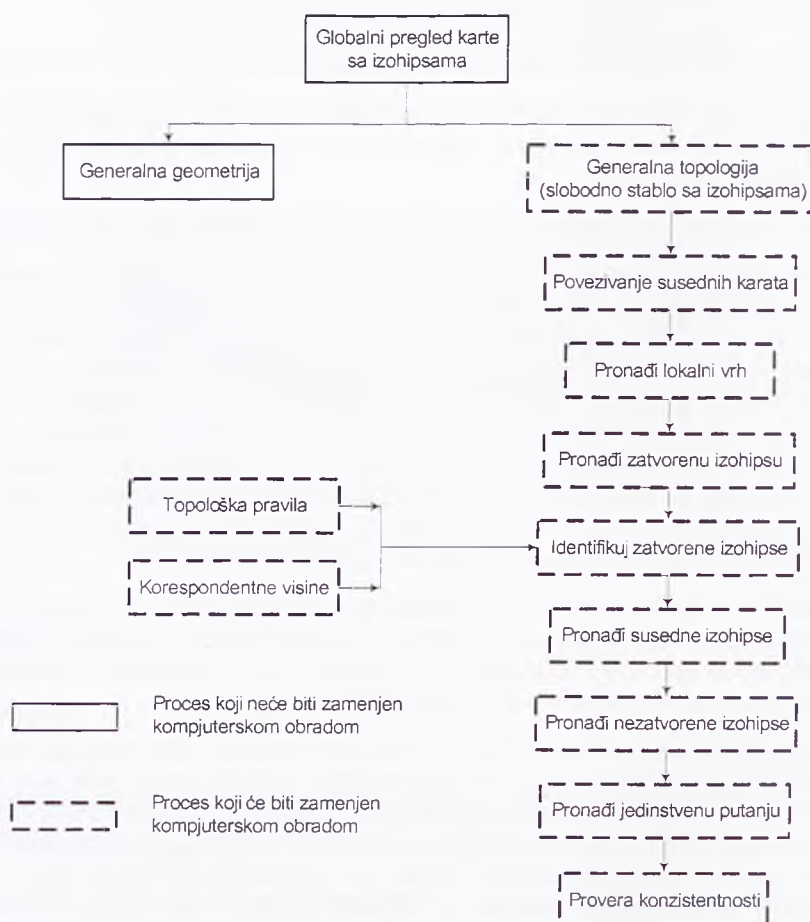
Proces započinje uspostavljanjem i korišćenjem skupa pravila na osnovu kojih se gradi stablo sa izohipsama. U toku procesa operater, u jednom interaktivnom postupku, pomaže softveru da ceo postupak sprovede do kraja. Ceo postupak je osmišljen tako da odgovara proceduri koju koristi iskusan operater da bi identifikovao visine izohipsi na karti (Slika 2.12)

Pa ipak, istraživanja su pokazala da, i pored svih napora, uvek postoje situacije kada ne postoje jednoznačna rešenja, pa se opet mogu pojaviti greške ili nedoumice koje operater mora posebno da razreši. Ove greške su najčešće posledica grešaka u samim digitalizovanim izohipsama. Ovde se pre svega misli na prekide izohipsi i na mesta gde se izohipse dodiruju. Drugi izvor potencijalnih problema su mesta na obodu posmatranog područja ili karte. Tu se javljaju izohipse koje nisu zatvorene. Za ove izohipse ne postoji jednoznačno rešenje u pogledu određivanja njihovih visina. Poseban problem predstavljaju sedla. U svakom slučaju, radi se o vrlo kompleksnom problemu. Samim tim, mnogo je jednostavnije, pa čak i efikasnije, koristiti proste softverske funkcije kojima se uzastopnim izohipsama dodeljuju visine tako što se zada visina početne izohipse, ekvidistancija i na skeniranoj podlozi naznači duž koja seče te izohipse. Primer softvera koji raspolaže ovom funkcijom je *R2V* softver američke firme *Able Software Corp* (w39).





Slika 2.11: Graf sa topologijom izohipsi (Wu 1993)



Slika 2.12 : Dijagram toka kod identifikacije izohipsi koju sprovodi operater i faze koje bi se mogle automatizovati obradom na računaru (Wu 1993)

Pre ili posle procedure dodeljivanja visina izohipsama treba izvršiti verifikaciju i korekciju povezivanja izohipsi na spojevima listova karata. Ova procedura se može izvoditi korišćenjem standardnih CAD alata ili da se primeni neka od automatizovanih procedura.

Specifičnost obrade podataka dobijenih bilo kojom od metoda digitalizacije podataka za postojećih podloga sastoji se u tome da se ti podaci, kako je to već rečeno, sastoje u najvećoj meri od izohipsi u vektorskom obliku. Po tome su oni vrlo slični strukturi podataka koji se dobijaju prikupljanjem podataka na fotogrametrijskim stereorestitucionim instrumentima po metodi direktnog izvlačenja izohipsi.

Problem kod ove vrste podataka je u tome što oni najčešće zahtevaju znatno više memorijskog prostora za arhiviranje, od, recimo, podataka dobijenih selektivnim samplingom, a pored toga, struktura ovih podataka prilično je nepodesna za dalje procesiranje. Obično je količina tačaka na izohipsama znatno veća od one koja je neophodna za verno predstavljanje površi terena. Često se ide na to da se gustina ovih tačaka proredi prostom analizom izohipsi kao krivih linija. Međutim, ovakav pristup neće uvek dati zadovoljavajuće rezultate. Razlog leži u činjenici da se ovom analizom ne razmatra i međusobni odnos susednih izohipsi, pa se često dešava da se neke tačke na izohipsama nepotrebno zadržavaju, a neke se pogrešno eliminišu.

Sa druge strane, podaci sa izohipsama u digitalnom obliku sadrže dosta visok nivo informacija o geometriji površi terena, a često i o njenim morfološkim svojstvima. Upravo zato, kod eliminacije suvišnih tačaka na digitalizovanim izohipsama mora da se vodi računa da se ne izgube i ove informacije. Iz svih pomenutih razloga, u slučajevima kada se želi postizanje maksimalnog učinka, nije prihvatljivo da se izohipse tretiraju kao skupovi tačaka sa poznatim visinama. Sam oblik i međusobni odnos susednih izohipsi, kao i pravila koja se u kartografiji koriste pri predstavljanju terena izohipsama u značajnoj meri doprinose izradi kvalitetnog DMT-a, kako sa aspekta opšte tačnosti tako i sa aspekta korektnosti predstavljanja morfoloških oblika površi terena koja se njime modelira.

### 2.4.3 Kvalitet podataka, efikasnost i ekonomičnost

Kada je reč o kvalitetu podataka dobijenih digitalizacijom postojećih podloga mora se pre svega imati u vidu da se radi o podacima koji su već prošli određenu obradu. Naime, ti podaci su pregledani, izvršeno je otklanjanje detalja ili nepravilnosti na iscrtanim izohipsama koji su rezultat slučajnih grešaka merenja, ili je to naprosto bilo potrebno da bi se izvršila generalizacija izohipsi s obzirom na razmeru kartiranja i da bi se dobila morfološki verna predstava površi terena. Time je posao na izradi DMT-a u velikoj meri olakšan.

Sa druge strane, obrada koja je već izvršena nad ovim podacima sa sobom nosi i određene rizike. S obzirom da su ti podaci već obrađeni praktično je nemoguće iz tih podataka otkloniti greške koje su napravljene tokom te obrade, jer najčešće ne postoje informacije na osnovu kojih bi se rekonstruisali originalni podaci. Greške koje su sadržane u podacima dobijenim digitalizacijom postojećih podloga sadrže greške originalnog prikupljanja i obrade podataka (greške snimanja detalja i kartiranja), ali i greške digitalizacije (deformacije podloge, skeniranje, vektorizacija). Limitirajući faktor su svakako greške originalnog prikupljanja podataka.

Koppe je tačnost visinskih informacija dobijenih sa topografskih podloga predstavio preko sledeće formule:

$$\sigma_H = A + B \cdot \tan \alpha \quad (2-23)$$

gde je:

$\alpha$  - nagib terena,

A i B- konstante koje se usvajaju u zavisnosti od podloga.

U sledećoj tabeli date su vrednosti koeficijenata A i B koje je predložio Koppe i vrednosti koeficijenata koje su usvojene u Švajcarskoj i Nemačkoj za različite tipove (razmere) topografskih karata. Takođe su date i tačnosti visina za ove podloge u zavisnosti od nagiba terena.



Razmera	Koppe		Švajcarska		Nemačka	
	1:25 000	1:5 000	1:25 000	1:10 000	1:25 000	1:5 000
A	1.00	0.40	1.00	1.00	0.50	0.40
B	7.00	3.00	7.00	3.00	5.00	5.00
0	1.00	0.40	1.00	1.00	0.50	0.40
5	1.61	0.66	1.61	1.26	0.94	0.84
10	2.23	0.93	2.23	1.53	1.38	1.28
15	2.88	1.20	2.88	1.80	1.84	1.74
20	3.55	1.49	3.55	2.09	2.32	2.22
25	4.26	1.80	4.26	2.40	2.83	2.73
30	5.04	2.13	5.04	2.73	3.39	3.29
35	5.90	2.50	5.90	3.10	4.00	3.90
40	6.87	2.92	6.87	3.52	4.70	4.60
45	8.00	3.40	8.00	4.00	5.50	5.40

Tabela 2-4 : Vrednosti koeficijenta *A* i *B* i visinska tačnost za različite tipove podloga

Greške deformacija podloge i skeniranja se u znatnoj meri mogu minimizirati, ali samo pod određenim uslovima. Naime, da bi se otkrile deformacije podloge nastale tokom vremena neophodno je da na karti postoje ucrtane tačke sa poznatim, referentnim koordinatama. Ovo je posebno važno u slučajevima kada postoje deformacije lokalnog karaktera, kada je neophodno da postoji veća količina ovih tačaka sa relativno ravnomernim i gustim rasporedom po korisnom prostoru karte. Na osnovu poznatih teoretskih koordinata ovih tačaka i njihovih pozicija na karti, moguće je utvrditi deformacije same podloge. U najpovoljnijem slučaju to su tačke koje predstavljaju temena koordinatne mreže ili mreže meridijana i paralela. Kada su u pitanju greške skeniranja one se mogu eliminisati korišćenjem kvalitetnih skenera ili softverski, na isti način kao kod utvrđivanja i eliminacije deformacija podloge. Najpovoljniji slučaj je korišćenje kvalitetnog ravnog skenera velikog formata.

Kod digitalizacije ovih podataka posebnu grupu problema čini to što se za predstavljanje pojedinih zemljišnih oblika koriste kartografski znaci, na nekim delovima nema visinskih podataka i sl. U tim slučajevima je vrlo komplikovano unošenje odgovarajućih visinskih informacija za takva područja.

Dodatni problem kod digitalizacije postojećih podloga je pitanje njihove ažurnosti, jer se te podloge odnose na stanje od pre više godina ili čak od pre više decenija. Iako se površ terena, posebno kada su u pitanju srednje i sitnije razmere kartiranja ne menja tako značajno, ovo pitanje svakako treba uzeti u obzir kod primene ove metode.

U pogledu efikasnosti, a pogotovu ekonomičnosti, ova metoda je svakako jedna od najprihvatljivijih. Sve što je potrebno za njenu primenu su: odgovarajuće podloge sa podacima o visinskoj predstavi terena, skener velikog formata, odgovarajući softver, nekoliko radnih stanica prosečnih performansi i obučeni operateri. Od svih nabrojanih uslova, može se reći da najveću težinu kod donošenja odluke da se krene u realizaciju ovakvog jednog projekta ima prvi, tj. kvalitet podloga na kojima se nalaze informacije koji će biti korišćene za izradu DMT-a. Nakon toga, prioritet ima izbor odgovarajućeg softvera, tj. algoritama koji će obezbediti da se izvuče maksimalan kvalitet iz prikupljenih podataka.

Iako je opšte poznato da ova metoda spada u vrlo ekonomične metode, vrlo je teško egzaktno iskazati kolika je njena ekonomičnost. Naime, objektivna procena ekonomičnosti ove metode bi morala uzeti u obzir i vrednost podataka koji postoje na postojećim podlogama. Sami troškovi na prevođenju DMT podataka sa ovih podloga u digitalni oblik bi se okvirno mogli sagledati na primeru topografskih karata 1:25000. Ako se pretpostavi da u proseku treba 5 čovek-dana da se obrade svi relevantni podaci sa jednog lista ove karte, i da je komercijalna cena rada jednog stručnjaka (bruto sa svim uračunatim troškovima: prostor, oprema, porezi) oko 2500 EUR za mesec dana (22 radna dana), dobija se da je cena formiranja DMT-a za jednu kartu oko 570 EUR, tj. oko 760 USD. S obzirom da jedna karta pokriva područje od oko 150 km<sup>2</sup>, konačno se dobija jedinična cena formiranja DMT-a po ovoj metodi od oko 5 USD/km<sup>2</sup>. Naravno, treba imati u vidu da je ovo samo jedna približna procena koja je zasnovana na dosta neizvesnim pretpostavkama u pogledu neophodnog vremena i cene rada. Potrebno vreme za obradu topografske karte iz ODK serije (1:5000) je znatno kraće i iznosilo bi u proseku oko 2 čovek-dana. Površina koju pokriva jedan list karte je 6.75 km<sup>2</sup>, pa cena izrade ovakvog DMT-a, koristeći istu računicu kao i za karte 1:25000, iznosi oko 45 USD/km<sup>2</sup>.

## 2.5 Zaključna razmatranja

Za kraj ovog pregleda savremenih metoda za prikupljanje podataka kod digitalnog modela terena može se dati jedna kraća uporedna analiza u pogledu prednosti i nedostataka svake od njih, što ujedno može da predstavlja i uputstvo za izbor odgovarajuće metode za konkretni projekat. U ovim razmatranjima podrazumeva se da je cilj izrada DMT-a koji pokriva veću površinu tako da se neće uzimati u obzir terenske metode snimanja, jer su one za takve potrebe neracionalne.

Jedan od odlučujućih faktora pri izboru odgovarajuće metode je svakako kvalitet DMT-a koji se zahteva. Za projekte gde se zahteva tačnost reda par decimetara, može se sa sigurnošću reći da se najviši stepen efikasnosti i ekonomičnosti postiže LiDAR metodom snimanja terena. Ovo posebno važi za područja koja su prekrivena umereno gustom vegetacijom. U ovim područjima primena fotogrametrije je izuzetno otežana, dobija se DMT vrlo lošeg kvaliteta, a neretko primena ove metode nije ni moguća. Kada je u pitanju ekonomičnost LiDAR-a u odnosu na fotogrametriju kod realizacije projekata gde se zahteva tačnost merenja visina do pola metra i vrlo visoka gustina tačaka na terenu (do 10m), uštede kod primene LiDAR-a idu i do 2/3 ukupnih troškova (*Petzold 1999*). Sve ovo je uticalo da pojedine države ovu metodu izaberu kao jedinu prihvatljivu za izradu visoko kvalitetnih DMT-a.

Za veća područja i tamo gde se traži nešto niža tačnost (polumetarska i metarska), gde bi primena LiDAR-a inače bila neracionalna s obzirom na troškove, primena fotogrametrijske metode je i dalje vrlo opravdana i prihvatljiva. Najbolji rezultati se naravno postižu primenom digitalnih fotogrametrijskih sistema. Njihova primena je jedino otežana kod izrade DMT-a za terene pokrivene vegetacijom i za gusto naseljena mesta. U tim slučajevima efikasnost ovih sistema značajno opada i približava se efikasnosti koja se ostvaruje analitičkim ili čak analognim instrumentima. Pa ipak, već sada se može konstatovati da je primenu analognih, pa čak i analitičkih instrumenata, osim ako se ne radi o upošljavanju već postojećih kapaciteta, vrlo teško opravdati na ovim poslovima. Jedan od primera gde je upotreba ovih instrumenata donekle opravdana, su poslovi na ažuriranju postojećeg DMT-a. Tu se pre svega misli na ažuriranje manjih područja i na dopunu podataka (podizanje kvaliteta postojećeg DMT-a) prikupljanjem podataka koji se odnose na karakteristične tačke i strukturne linije terena po metodi selektivnog samplinga.

U većini slučajeva gde je prihvatljiva primena fotogrametrijske metode i automatsko merenje DMT-a na digitalnim fotogrametrijskim sistemima, može se sa još većom efikasnošću i nižom cenom koštanja koristiti i aero InSAR metoda snimanja terena. Jedan od glavnih nedostataka kod primene radarske metode predstavljaju visoki inicijalni troškovi za nabavku sistema za aero InSAR snimanje i obradu podataka, kao i ovladavanje tehnologijom od strane novih korisnika. Za razliku od nje, primena fotogrametrijske metode u okviru neke ustanove može se usavršavati postepeno nabavkom novijih komponenti sistema za aerofotogrametrijsko snimanje i obradu podataka. Zato se danas usluge radarskog snimanja uglavnom naručuju kod nekoliko firmi koje nude ove usluge na tržištu. I InSAR i fotogrametrija u odnosu na LiDAR imaju i dodatnu prednost, jer se mogu dobiti i drugi proizvodi kao što je ortofoto i vektorski sadržaj. Cene DMT-a dobijenog korišćenjem ovih metoda su, kada je u pitanju tačnost podataka koja odgovara srednjim razmerama (1:5000 - 1:50000) vrlo slične (Tabela 2-5). Pa ipak, čini se da je za sitnije razmere snimanja InSAR u prednosti. Jedno je sasvim sigurno – InSAR aero snimanje je daleko efikasnije od fotogrametrije. Kao što je već rečeno, kod snimanja teritorije Velike Britanije primenom avio IfSAR-a postignuta je cena od 5 USD/km<sup>2</sup>, uz tačnost oko 0.5m za teren bez vegetacije i objekata (*Dowman 2004*).

Na tržištu se danas može naći veliki broj proizvoda dobijenih iz brojnih satelitskih misija, tako da ovo svakako i fotogrametriju i radarsku metodu čini atraktivnim kada je u pitanju izrada DMT-a za veća područja. Fotomaterijal dobijen na osnovu optičkih senzora visoke rezolucije (*IKONOS* i *QuickBird*) po ceni odgovara ili je skuplji od aerofotogrametrijskih snimaka istog kvaliteta, pa se postavlja pitanje opravdanosti njegovog korišćenja za ove svrhe. Sa druge strane, izrada DMT-a na osnovu satelitskih misija *SPOT5*, *RADARSAT* i *ERS 1/2* je vrlo ekonomična i konkurentna u odnosu na ostale metode. Jedini nedostatak ovako dobijenog DMT-a je limitirana tačnost koja se kreće u rasponu od 5-10m.

Digitalizacija postojećih podloga, je metoda koja pruža najnižu tačnost, ali je veoma ekonomična i vrlo prihvatljiva u uslovima kada se raspolaze sa relativno kvalitetnim i ažurnim kartografskim podlogama i kada postoji mogućnost angažovanja većeg broja operatera. U situacijama kada se ne planiraju znatnija finansijska ulaganja u projekat formiranja DMT-a, ova metoda je i jedina prihvatljiva opcija. Njena primena može doći u pitanje u slučajevima kada se traži visoka tačnost DMT-a ili, pak, kod formiranja DMT-a niske tačnosti kada kao alternativa dolazi u obzir i nabavka podataka koji su prikupljeni u okviru neke od satelitskih misija. U tom smislu posebno su interesantni podaci prikupljeni u okviru *SRTM* i *ERS 1/2* misije.



Tabela 2-5 sadrži okvirne cene prikupljanja DMT podataka u zavisnosti od izvora i metode prikupljanja podataka, kao i od tačnosti podataka. Vrednosti iz tabele treba uzeti sa rezervom, jer cene dosta zavise i od veličine područja na koje se DMT podaci odnose, od licence, tj. prava korišćenja, stepena obrade (DMT ili DMP) itd. Pa ipak, na osnovu tih vrednosti može se steći relativno dobra slika o tome šta se može generalno očekivati od pojedinih metoda i izvora podataka.

	1:500 0.10m	1:1000 0.30m	1:2500 0.50m	1:5000 1m	1:10000 2m	1:25000 3m	1:50000 6m	1:100000 10m	1:300000 15m
LiDAR	600+	300	200	-	-	-	-	-	-
Aerofotogrametrija	1000+	500	150	50	25	15	10	-	-
Aero InSAR	-	-	-	7*-80	5*-40	?	?	-	-
IKONOS	-	-	-	-	20*-100*	17 <sup>°</sup> -?	14 <sup>°</sup> -?	-	-
QuickBird	-	-	-	-	?	?	?	-	-
SPOT5 HRS	-	-	-	-	-	-	?	2.3*	-
SRTM	-	-	-	-	-	-	-	?	0
RADARSAT	-	-	-	-	-	-	5 <sup>°</sup>	3 <sup>°</sup>	-
ERS 1/2	-	-	-	-	-	-	5 <sup>°</sup>	3 <sup>°</sup>	-
Digitalizacija TK	-	250**	70**	45**	10**	5**	2**	-	-

\* Cene se odnose na jednokorisničke licence korišćenja, a ne na cene izrade DMT-a. Uglavnom se radi o cenama za proizvode iz arhive.

\*\* Cena se odnosi samo na troškove prevođenja podataka u digitalni oblik i formiranje DMT-a. Troškovi inicijalnog prikupljanja podataka i izrade karata nisu uključeni, kao ni troškovi naknadnog ažuriranja podataka.

■ Podaci su u formi DMP-a (ne odnose se samo na površ terena, već uključuju i vegetaciju)

Tabela 2-5 : Okvirne cene DMT-a u zavisnosti od izvora i metode prikupljanja podataka i tačnosti (cene su izražene u USD/km<sup>2</sup>)

### 3 FORMIRANJE I ANALIZA DMT-A

Sam naziv i definicija DMT-a koji glasi da je to "matematička (statistička) predstava kontinualne površi terena na osnovu reprezentativnog seta podataka u formi tačkaka, linija i drugih informacija prikupljenih o terenu" ukazuju na to da je reč o "modelu" terena. To podrazumeva da se moraju obezbediti takve metode i postupci koji će površ terena egzaktno matematički definisati, tj. omogućiti dobijanje vrednosti funkcionala površi u svim tačkama terena, a ne samo u tačkama u kojima su izvršena merenja. Ovo se obično izvodi primenom neke od metoda interpolacije. Kada se ovaj uslov obezbedi moguće je nad tako definisanom površi terena izvoditi sve željene proračune (visina za datu poziciju u horizontalnom smislu, vrednost nagib u zadatoj tački, pravac maksimalnog nagiba, krivina (zakrivljenost) površi u zadatoj tački, vizuelizacija modela terena, statističke analize, i sl.) korišćenjem manje-više standardnog matematičkog aparata, softvera i postupaka za računarsku obradu i vizuelizaciju.

Formiranje DMT-a, dakle, ima za cilj formiranje matematičkog modela površi terena koji će površ terena verno predstaviti i omogućiti razne analize dobijenog modela. Da bi se te analize mogle izvoditi efikasno, a imajući u vidu da se DMT obično sastoji iz velike količine podataka, potrebna je posebna organizacija i struktuiranje podataka. U suštini, sam proces formiranja DMT-a se sastoji iz izbora i implementacije odgovarajuće **strukture i organizacije podataka** i odgovarajuće **metode interpolacije**. Najčešće su ove dve stvari vrlo tesno povezane i izbor jedne od njih automatski određuje i izbor druge.

Zadatak da se realna površ terena na osnovu prikupljenih podataka što vernije rekonstruiše i matematički predstavi nije nimalo trivijalan, s obzirom da je površ terena relativno složena, a da su podacima prikupljeni različitim metodama i tehnikama rada (poglavlje 2). Ti podaci su:

- dati u različitoj formi (tačke, linije i površine terena, vrednosti normala na površ terena u datim tačkama, prekid glatkosti preko prelomnih linija terena i drugi uslovi koje površ terena treba da zadovolji);
- rezultati merenja koji su opterećeni greškama, pa ih treba tretirati kao stohastičke veličine;
- manje-više neravnomerno raspoređeni po površi terena i vrlo često se radi o uzorku podataka koji nije ni približno optimalan
- masivni – radi se o nekoliko hiljada do nekoliko miliona tačkaka sa poznatim visinama.

Interpolacija se kod DMT-a koristi i u fazi formiranja DMT-a, ali i kasnije kod njegove analize. Kvalitetna metoda interpolacije, kada je reč o primenama za digitalno modeliranje terena, treba da zadovolji nekoliko uslova:

- tačnost i kvalitet predikcije vrednosti modelirane površi u nepoznatim tačkama;
- robustnost i fleksibilnost s obzirom na podatke i tipove terena;
- filtriranje grešaka i šumova u podacima;
- mogućnost direktne ocene funkcionala (izvoda) površi kao što su pravac i vrednost maksimalnog nagiba, krivina);
- primenljivost na velike setove ulaznih podataka;
- efikasnost proračuna;
- jednostavnost upotrebe.



Postoji više kriterijuma po kojima se vrši podela i karakterizacija metoda interpolacije. Neki od najvažnijih su:

- globalne i lokalne metode;
- tačne i aproksimativne metode;
- stohastičke i determinističke metode;
- tačkaste i površinske metode.

Globalne metode su one metode kod kojih površ terena u nekoj tački zavisi od svih tačaka sa poznatim visinama. To obično znači da se čitava površ terena predstavlja jednom jedinstvenom funkcijom. Lokalne metode su one metode kod kojih je uticaj tačaka na model površi terena striktno lokalni. Globalne metode se mogu koristiti za modeliranje terena samo u slučaju da uticaj tačaka sa poznatim visinama na modeliranje površi u nekoj tački terena asimptotski opada sa udaljenošću od posmatrane tačke, tako da je uticaj udaljenih tačaka praktično beznačajan.

Tačne metode su one kod kojih modelirana površ terena prolazi kroz tačke sa poznatim visinama (interpolira date tačke), dok su aproksimativne one kod kojih modelirana površ terena odstupa od tačaka sa poznatim visinama. I jedne i druge se mogu primenjivati za digitalno modeliranje terena. Aproksimativne metode su prihvatljive, pa čak i poželjne, ukoliko one obezbeđuju da su odstupanja modelirane površi terena u datim tačkama u granicama grešaka merenja.

Stohastičke metode su one koje površ terena modeliraju na osnovu statističke analize međusobne zavisnosti (korelisanosti) rezultata merenja, dok se kod determinističkih metoda unapred usvaja oblik matematičkih funkcija kojima se površ terena predstavlja. Kroz postupak modeliranja se zatim samo određuju vrednosti pojedinih parametara (koeficijenata) tih funkcija.

Tačkaste metode interpolacije su metode kod kojih se formalno ne dobija eksplicitna matematička predstava površi terena, već se samo, koristeći određene numeričke postupke, visina terena može dobiti u svakoj tački sa zadatim  $(x,y)$  koordinatama. Skup svih tako određenih tačaka praktično implicitno određuje modeliranu površ terena. Sa druge strane, rezultat proračuna kod površinskih metoda interpolacije je površ terena data eksplicitno preko jedne ili više funkcija, ili na neki drugi način.

Modelirana površ terena često treba da zadovolji određene uslove. Veliki deo tih uslova površ mora da zadovolji da bi bila korektna u geomorfološkom smislu (Wood 1996). Ovo je sasvim razumljivo s obzirom da je površ terena posledica dejstva geomorfoloških sila, procesa i agenasa (Anđelić 1990). Rezultat dejstva tih procesa je postojanje velikog broja formi terena. U nekim slučajevima da bi model površi terena bio prihvatljiv za određene analize on mora da zadovolji i dodatne uslove (koji su opet posledica geomorfološkog karaktera površi terena). Tipičan primer je uslov odvodnjavanja kod hidroloških analiza, pa se često govori i o hidrološki korektnom modelu terena, tj. modelu terena bez depresija (Hutchinson 1988, Prodanović 1999, ESRI 2004).

Zato se kod ocene kvaliteta DMT-a ne može govoriti samo o njegovoj tačnosti i pouzdanosti u smislu visina koje se mogu dobiti interpolacijom, već i o tačnosti i pouzdanosti čitavog niza morfometrijskih parametara kojima je određena površ terena:

- visina;
- nagib i pravac maksimalnog nagiba (engl. *aspect*);
- krivina površi u ravni i po profilu.

Navedeni parametri odgovaraju grupama diferencijala površi nultog, prvog i drugog reda respektivno. Procenjuje se da izvodi višeg reda nemaju značaja u smislu geomorfometrije površi terena (Wood 1996). Površ terena, pa samim tim i morfometrijski parametri kojima se ona karakteriše su posledica geomorfoloških procesa. Zato, da bi modelovana površ terena odgovarala realnoj površi terena i vrednost ovih parametara treba da odražava rad geomorfoloških procesa. Sa druge strane, razumevanje i proučavanje rada ovih procesa kroz analizu DMT-a, podrazumeva da su taj DMT, odnosno pomenuti parametri, korektni u geomorfološkom smislu.

Zbog svega navedenog kvalitet DMT-a se ne meri samo tačnošću visina koje se mogu interpolovati na osnovu DMT-a u zadatim tačkama, već i vernošću predstave površi terena u smislu njegovih geomorfoloških karakteristika. U teoriji i praksi je prihvaćeno da se kvalitet DMT-a meri i tačnošću ostalih morfometrijskih parametara površi terena. Štaviše, za mnoge primene, tačna predstava oblika terena je važnija nego apsolutna visinska tačnost. U tom smislu je tačnost nagiba terena podjednako važna, ako ne i važnija od tačnosti apsolutnih visina u modelu.

Kompleksnost prikupljenih podataka o površi terena i kompleksnost realne površi terena uslovljavaju da je problem modeliranja (rekonstrukcije) te površi vrlo složen i zavistan upravo od karaktera tih podataka i površi terena na koju se odnosi. Zato je za izbor odgovarajućih metoda neophodno dobro poznavanje prednosti i nedostataka pojedinih metoda, ali i iskustvo i znanje vezano za podatke, njihovu tačnost, metode kojima su prikupljeni i karakteristike i prirodu terena na koji se oni odnose.

### 3.1 Struktura i organizacija DMT-a

Površ terena se najčešće predstavlja preko skupa tačaka i linija raspoređenih po površi terena na odgovarajući način i uređenih u odgovarajuću strukturu radi lakšeg rukovanja tim podacima. Sastavni deo DMT-a su i metode kojima se, uz datu strukturu podataka, definiše površ terena u geometrijskom smislu.

Generalno površ terena se može predstaviti na tri načina:

- izohipsama;
- preko funkcija dveju varijabli;
- volumetrijskim (zapreminskim) modelom.

**Predstavljanje terena izohipsama** koje predstavljaju presek površi terena i horizontalnih ravni postavljenih na odgovarajućim visinama je najčešće korišćen način kada je reč o predstavljanju terena na analognim kartografskim podlogama. Ovakav način predstavljanja površi terena karakteriše visok kvalitet u geomorfološkom smislu, jer su sve važnije geomorfološke karakteristike površi terena na ovaj način obuhvaćene. Iskusan stručnjak može na osnovu karata sa izohipsama da uoči i izdvoji sve elementarne oblike reljefa zemljišta i njegove karakteristike (*Andelic 1990*). Razvijene su i posebne tehnike za direktno merenje izohipsi, kao što je to slučaj sa direktnim izvlačenjem izohipsi na fotogrametrijskom instrumentu. Kada se teren matematički predstavlja izohipsama (u digitalnom obliku) površ terena nije data eksplicitno, već je ona data implicitno preko preseka te površi sa horizontalnim ravnima. Zato ovakav način modeliranja površi terena nije dovoljno egzaktno, jer se postavlja pitanje: šta se dešava sa površinom terena između dve susedne izohipse? Ova dilema je posebno izražena na mestima gde se pojavljuju karakteristični zemljišni oblici kao što su vrhovi, dna, vodoslavnice, vododelnice, doline i slično. Da bi se ovaj nedostatak donekle ublažio izohipse se na topografskim podlogama dopunjavaju kotama, tj. tačkama sa ispisanim visinama. Pored toga, da bi se površ terena u ravničarskim područjima bolje definisala, obično se, pored izohipsi na osnovnom visinskom intervalu (ekvidistancija), daju i izohipse na polovini i četvrtini intervala. Međutim, i uz sve ove modifikacije, ovakav način predstavljanja površi terena je nepodesan za digitalnu obradu, jer takva struktura podataka ne omogućava egzaktno defnisanje površi terena i efikasno procesiranje podataka.

Najčešći način predstavljanja površi terena u digitalnom obliku je **korišćenje funkcije dveju varijabli**, pri čemu te varijable pripadaju odgovarajućem domenu. Najčešće su to funkcije kod kojih se za zadatu lokaciju (obično planimetrijske koordinate  $X$  i  $Y$  lokalnog koordinatnog sistema, državnog koordinatnog sistema ili čak geografske koordinate) dobija jednoznačna vrednost visine. U tom slučaju radi se o 2.5D (2D+1D) modelu. Površ terena predstavlja skup tačaka  $(x \ y \ z)^T$ , gde je

$$z = f(x, y) \quad (3-1)$$

eksplicitna forma funkcije  $f$  nad domenom  $D \subset \mathbb{R}^2$ . Kao što se iz izraza može zaključiti  $x$  i  $y$  su argumenti (nezavisne varijable), dok je visina  $z$  vrednost funkcije površi (zavisna varijabla). U eksplicitnom obliku površ je data preko izraza  $f(x, y) - z = \tilde{f}(x, y, z) = 0$ .

Modeli koji omogućavaju predstavljanje površi kod kojih se za jednu  $X, Y$  lokaciju može dobiti više visina, tj. površi za koje funkcija površi  $f(x, y)$  ima vrednost u vidu vektora, nazivaju se 3D modeli. Kod ovih modela sve tri koordinate su potpuno ravnopravne. Površ terena se tada opisuje preko funkcije:



$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = f(u, v) = \begin{pmatrix} f_x(u, v) \\ f_y(u, v) \\ f_z(u, v) \end{pmatrix}, \quad (3-2)$$

pri čemu  $(u, v) \in D$ ,  $D \subset \mathbb{R}^2$ . Postupak se, dakle, sastoji u tome da se prvo izvrši parametrizacija domena, pa se onda vrednosti svake od funkcija  $f_x$ ,  $f_y$ ,  $f_z$  vrši kao u slučaju 2.5D modeliranja.

Funkcija kojom se modelira površ terena je, zbog složenosti same površi terena, obično vrlo složenog oblika. Zato se vrši diskretizacija kontinualne površi terena, odnosno deljenje površi terena na manje segmente, pa se onda za te segmente koriste funkcije koje su jednostavnijeg oblika. Digitalni model terena se u tom slučaju sastoji od odgovarajuće podele terena na manje elemente (deljenje domena na poddomene – za 2.5D model to se radi u ravni XOY) i određivanja funkcija površi terena definisanih za te elemente. Kontinualna površ terena je predstavljena skupom svih vrednosti funkcija za sve element. Proračun visine za neku tačku terena se onda sastoji u tome da se prvo odredi u koji element DMT-a pada ta tačka po svom položaju u XOY ravni, da se odrede parametri funkcije za taj element i da se konačno sračuna sama visina korišćenjem zadatih parametara (koordinata) kao argumenata funkcije. S obzirom da se sam DMT obično sastoji iz tačaka koje su na odgovarajući način raspoređene po području na koje se odnosi DMT, može se reći da se problem određivanja visine iz DMT-a na ovaj način svodi na problem interpolacije. Najpoznatiji i u praksi najčešći modeli terena zasnovani na ovim principima su digitalni modeli zasnovani na gridnoj (rasterskoj) strukturi i digitalni modeli bazirani na TIN (engl. *Triangular Irregular Network*) strukturi podataka. Kao što je već rečeno, u nekim primenama se može zahtevati mogućnost predstavljanja takvih površi koje kao rezultat za zadate vrednosti argumenata funkcije mogu imati više vrednosti funkcije (tunel, nadvožnjak, pećina i sl.). Jedan od načina na koji se ovaj problem može rešiti je formiranje DMT-a na bazi 3D triangulacije. Kod ovakvog DMT-a osnova za predstavljanje površi su prostorni trouglovi koji su međusobno povezani u kontinuitetu i čija temena čine tačke površi sa poznatim vrednostima. Projekcije trouglova 3D triangulacije u XOY ravni se mogu međusobno preklapati. Ovo istraživanje je ograničeno na predstavljanje površi terena funkcijama dveju varijabli kod kojih se za bilo koju zadanu vrednost argumenata is skupa mogućih vrednosti dobija jednoznačna vrednost funkcije. Naime, algoritmi za formiranje i analizu DMT-a koji nemaju ovo ograničenje su znatno složeniji, procesiranje podataka je zahtevnije, a softverski alati koji ovo podržavaju su relativno retki, pa bi to, i inače vrlo obiman posao oko formiranja nacionalnog DMT-a, dodatno opteretilo. Ovakve dodatne napore bi bilo teško opravdati s obzirom da su mesta na kojima se realna površ terena ne može predstaviti funkcijama koje vraćaju jednu vrednost za zadate argumente vrlo retka.

Kada je u pitanju predstavljanje površi terena funkcijom dveju varijabli, vrlo je važan pojam kontinualnosti površi terena. Prvi i osnovni zahtev je svakako da je funkcija površi terena kontinualna, tj. neprekidna ( $C^0$  kontinualnost površi). Ako je površ neprekidno diferencijabilna zaključno sa izvodima reda  $n$  za celokupan domen, onda se kaže da površ ima  $C^n$  kontinualnost ( $C^1$ ,  $C^2$  kontinualnost). Često se zahteva samo kontinualnost u geometrijskom smislu. Ovo znači da sama funkcija površi ne mora da bude diferencijabilna, ali da su geometrijska svojstva koja odgovaraju izvodima odgovarajućeg reda (tangentna ravan, krivina površi) kontinualna. U tom slučaju se još kaže da je površ  $G^1$  kontinualna za kontinualnost tangentne ravni,  $G^2$  kontinualna za kontinualnost krivina površi, itd. Kada je u pitanju površ terena, a s obzirom na njen geomorfološki karakter, opravdano se može postaviti zahtev da površ bude  $G^1$  kontinualna svuda sem na eksplicitno zadatim mestima. Ovo znači da za svaku tačku na površi terena, sem za eksplicitno zadat skup tačaka (tačke na prelomnim linijama terena, oštar vrh), postoji jedna i samo jedna tangentna ravan.

Poslednji način za predstavljanje površi terena je **korišćenje volumetrijskog modela**, gde se objekti prostora predstavljaju zapreminskim elementima. Jedan od tipičnih primera je korišćenje vokseli (zapreminski elementi, najčešće kocke) dovoljno malih dimenzija. Ovo je analogno predstavljanju pojava na digitalnim rasterskim slikama (ili kod rasterskog GIS-a), s tom razlikom što se kod digitalnih slika radi o 2D prikazu. Kao što je kod rasterskih slika linija koja razdvaja dve površine koje predstavljaju pojave (pojave su predstavljene pikselima sa istom digitalnom vrednošću) implicitno određene pikselima koji se nalaze na granicama tih pojava, tako je i kod volumetrijskih modela površina terena određena vokselima koji se nalaze na granicama terena i vazduha. U ovim modelima teren je predstavljen kao telo sastavljeno od skupa međusobno povezanih vokseli. Korišćenjem ovakvog modela mogu se vrlo jednostavno predstaviti tuneli, pećine i sl. Drugi tip volumetrijskih modela su modeli zasnovani na predstavljanju tela u prostoru korišćenjem podele prostora na nepreklapajuće tetraedre. Ovo je analogno korišćenju TIN-a za predstavljanje pojava u 2.5D modelima sa funkcijama dveju varijabli. Treba na kraju reći i da su



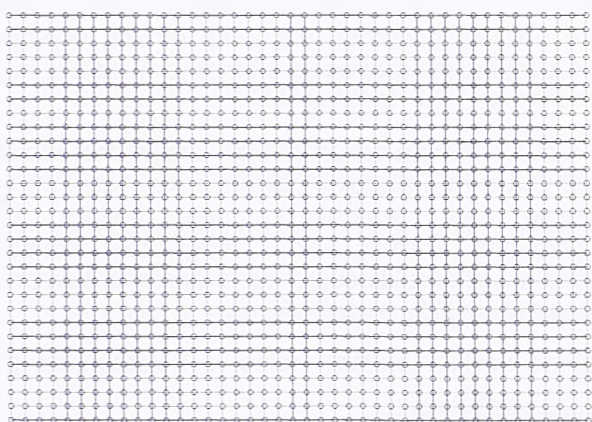
volumetrijski modeli uglavnom zastupljeni u medicini, geofizici i nekim drugim disciplinama i da se veoma retko koriste za modeliranje površi terena.

S obzirom na količinu podataka koja se očekuje kod formiranja DMT-a za teritoriju države, kao i na trenutno stanje u pogledu stepena razvoja algoritama, numeričkih postupaka i softverskih alata za digitalno modeliranje ovo istraživanje je ograničeno na drugu grupu metoda za modeliranje terena, tj. na metode kojima se površ terena predstavlja funkcijama dveju varijabli. Štaviše, kao što je to već naglašeno, istraživanje je ograničeno na funkcije dveju varijabli koje za zadatak vrednost argumenata daju samo jednu vrednost. Za to su najpogodniji 2.5D modeli. Naravno, s obzirom da se najveća količina do sada prikupljenih podataka nalazi u formi izohipsi iscrtanih na postojećim podlogama, velika pažnja je posvećena ovakvom načinu predstavljanja površi terena. Posebno su analizirane metode i postupci za prelazak sa ovakvog načina predstavljanja površi terena na predstavljanje preko funkcija dveju varijabli.

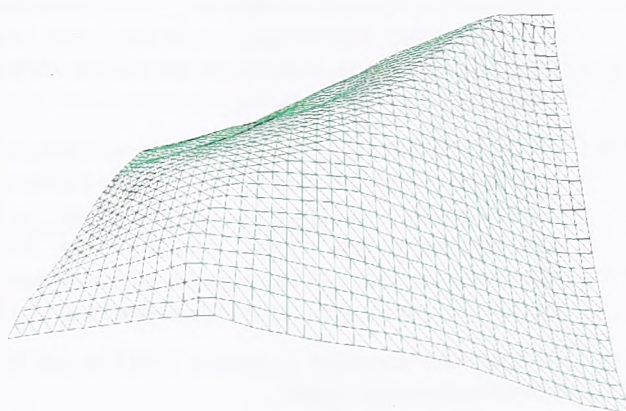
U ovom poglavlju se daje sveobuhvatan prikaz modeliranja terena korišćenjem podataka uređenih u jednu pravilnu, manje-više uniformnu strukturu podataka (grid, raster) i podataka nepravilno raspoređenih po terenu i uređenih u TIN strukturu.

### 3.1.1 DMT u formi grida (rastera)

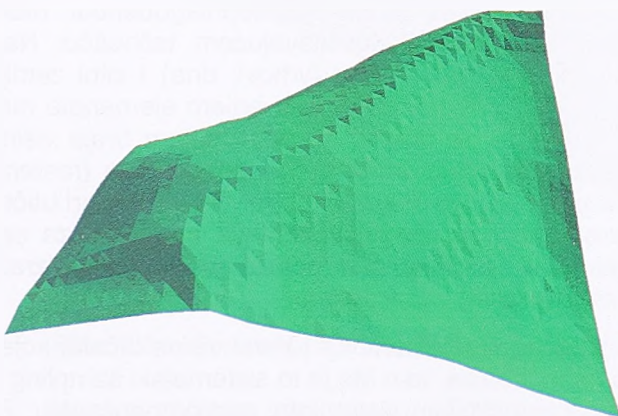
Grid (pravilna mreža) ili raster predstavlja najjednostavniji način za predstavljanje površi terena. Predstavljanje terena preko grida se sastoji u tome da se površ terena predstavi preko skupa tačaka sa poznatim visinama uređenim u pravilnu mrežu tačaka. Na taj način je površ terena u stvari predstavljena digitalnim modelom koji se naziva digitalni model visina - DMV (engl. *DEM: Digital Elevation Model*).



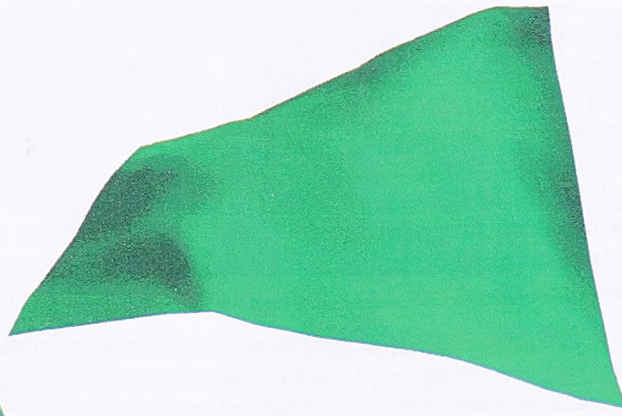
a) Grid u XOY ravni



b) Perspektivni prikaz grida, žičani model, preko trouglova



c) Perspektivni prikaz grid, solid model, trougaone facete



d) Perspektivni prikaz grida, solid model, glatka površ

Slika 3.1 : Primer uniformnog grid DMT-a



Kod predstavljanja površi terena preko rastera, koristi se princip sličan kao kod digitalnih rasterskih slika gde se površ predstavlja preko kvadratnih elemenata – piksela. Svakom pikselu rastera se dodeljuje odgovarajuća vrednost. U slučaju kada taj raster predstavlja DMT, vrednost piksela je visina terena u toj tački. Prednost ovakvog načina predstavljanja terena je da se za manipulaciju sa ovakvim DMT-om mogu koristiti operacije i formati zapisa podataka koji se standardno primenjuju u oblasti digitalne obrade slika ili GIS alata.

Kao što se može zaključiti grid i rasterski način modeliranja DMT-a su vrlo slični. I kod jednog i kod drugog načina model terena je dat u vidu jednostavne strukture podataka - matrice visina. Jedina razlika je u tome što se kod rastera visina odnosi na površinski element (piksel), dok se visine kod grida odnose na tačke grida. Nije potrebno čuvati nikakvu topologiju za podatke. Ona je implicitno data preko položaja tačaka u matrici visina. Površ terena modelirana rasterskim DMT-om u opštem slučaju ima diskontinuitet na granicama svakog rasterskog elementa (sem u slučajevima kada su vrednosti visina susednih elemenata jednake). Kod grid modela potrebno je odrediti interpolacione funkcije kojima se matematički definiše svaki element grida. Tom prilikom se standardno postavljaju uslovi da dobijena površ prolazi kroz (interpolira) tačke grida i da je površ kontinualna preko elemenata grida. Načini da se to ostvaru su podela svakog elementa grida na trougaone facete (dva ili četiri prostorna trougla) ili predstavljanje elementa grida bilinearnim površinskim elementom. Jednostavnim numeričkim postupcima može se ispuniti i zahtev da površ bude  $G^1$  ( $C^1$ ) kontinualna. Tada se svaki element predstavlja polinomom višeg reda (najčešće kubni polinom) ili preko Bézier-ovih splajn funkcija. U oba slučaja korišćenjem susednih tačaka mreže (12, odnosno 16 tačaka) zadovoljava se uslov da tangentna ravan u svakoj tački grida bude ista za sve elemente grida koji se susište u toj tački.

Glavna prednost predstavljanja površi terena preko visina u pravilnom rasporedu ogleda se u:

- primeni jednostavnih algoritama za rukovanje i analizu DMT-a;
- uštedama u pogledu memorije – memorišu se samo visine tačaka (piksela), dok su njihove planimetrijske koordinate implicitno date preko pozicije početnog elementa mreže, orijentacije mreže u prostoru, dimenzija elementa mreže i pozicije posmatranog elementa mreže u matrici visina;
- mogućnosti korišćenja algoritama, softverskih alata i formata za arhiviranje i razmenu podataka koji se standardno koriste za analizu rasterskog GIS-a i za digitalnu obradu slika; posebno su tu interesantne jednostavne algebarske operacije nad elementima grida (rastera) čijom kombinacijom se mogu ostvariti vrlo komplikovane analize, kao i mogućnost korišćenja standardnih rasterskih formata za čuvanje digitalnih slika, uključujući tu i napredne kompresije podataka i piramide zapisa za predstavljanje terena u različitim rezolucijama;
- mogućnost čuvanja i obrade DMT-a sa izuzetno velikim brojem visina, a korišćenjem gore-pomenutih mogućnosti.

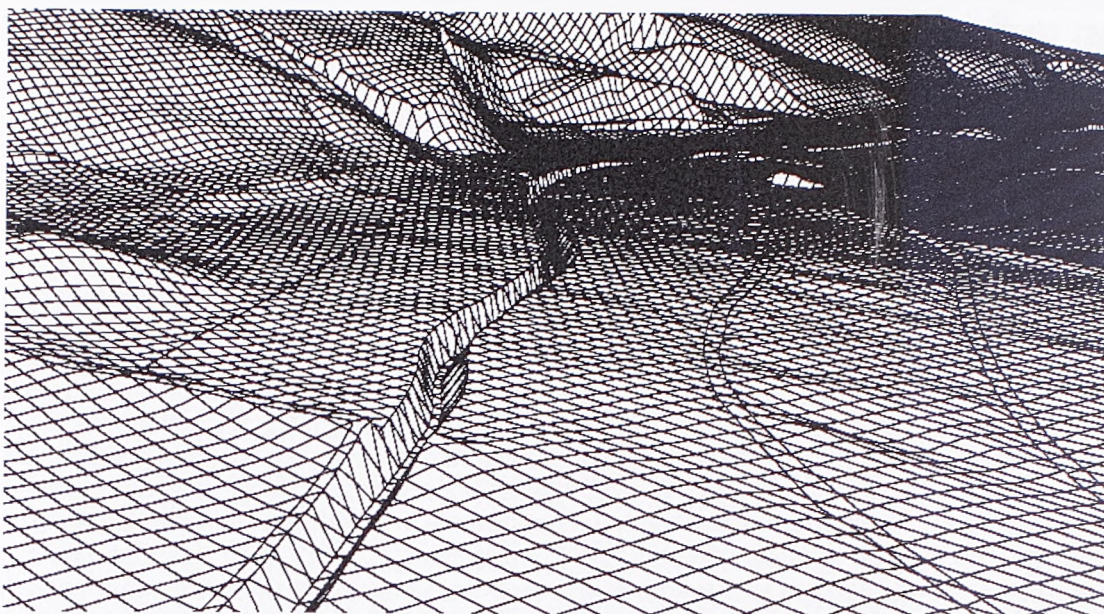
Slika 3.2 sadrži primer jednostavnog formata zapisa grid DMT-a u tekstualnoj datoteci - *ESRI ArcView ASCII grid format*.

Glavni nedostatak ovakvog načina predstavljanja površi terena je neprilagođenost modela podataka za predstavljanje karakterističnih zemljišnih oblika sa zadovoljavajućom tačnošću. Naime prelomne linije terena, vododelnice i vodoslivnice, lokalni ekstremumi (vrhovi, dna) i sitni zemljišni oblici ne mogu se na ovaj način dovoljno tačno modelirati. Naravno, sa smanjivanjem elemenata mreže tačnost predstavljanja ovih zemljišnih oblika se povećava, ali sa drastičnim povećanjem broja visina u modelu, što komplikuje obradu podataka. Zato je izbor optimalne veličine elemenata grida (rastera) s obzirom na tip terena, zahtevanu tačnost i predviđene primene vrlo bitan faktor, jer u velikoj meri utiče na kasniju obradu podataka u pogledu računarskog vremena i memorijskih zahteva potrebnih za samo procesiranje, ali i u pogledu kvaliteta dobijenih rezultata. Ovi nedostaci grid modela sve su manje izraženi s obzirom na napredak u performansama računara i memorijskim kapacitetima.

Drugi nedostatak grid modela je što nije uvek jednostavno izmeriti na terenu visine tačaka koje su raspoređene po terenu u formi pravilnog grida. Samo neke tehnike, kao što je to sistematski sampling koji se koristi na analitičkim instrumentima i digitalnim fotogrametrijskim sistemima, ovo omogućavaju. Zato se kod formiranja grid DMT-a prvo vrši proračun visina u tačkama grida koristeći sve raspoložive ulazne podatke. Pri tome se može istovremeno vršiti i filtriranje podataka u smislu otkrivanja i odstranjivanja grešaka merenja, odnosno dobijana glatke i generalisane predstave površi terena. Za neke primene, a posebno krupnorazmerne, gde su visine tačaka na terenu određene vrlo precizno, ovo nije poželjno.







Slika 3.4 : Perspektivni prikaz hibridnog DMT-a sa gridom i ugrađenim prelomnim i strukturnim linijama terena (Briese 2003)

Kada se modifikacije odnose samo na promenljivu veličinu elemenata grida, situacija nije tako drastična i mogu se dosta uspešno koristiti i standardni softverski alati i formati zapisa, a sve je veći broj softvera, posebno za 3D vizuelizaciju podataka koji podržavaju ovakav način predstavljanja površi terena. Kad se radi sa DMT-om sa promenljivom veličinom elemenata mreže onda se uglavnom koriste procedure za rad sa podacima uređenim u hijerarhijsku strukturu podataka korišćenjem kvadratnog stabla (engl. *quadtree*) (Pajarola 2002, Gerstner 1999).

### 3.1.2 DMT na osnovu TIN-a

Mreže povezanih elemenata se standardno koriste kod **metoda konačnih elemenata** (engl. *FEM – Finite Element Method*). Kod ovih metoda problem rešavanja parcijalnih diferencijalnih jednačina kojima se modelira neka pojava se svodi na to da se izvrši diskretizacija domena na konačan broj tačaka u kojima su dati granični uslovi. Pored toga, sve tačke su međusobno povezane elementima. Ovi elementi mogu biti trouglovi ili četvorouglovi ako je reč o pojavi u dve dimenzije, ili tetraedri ili heksaedri ako se radi u tri dimenzije. Nekoliko elemenata ima jednu zajedničku tačku mreže koja se naziva čvor. Skup svih elemenata i čvorova se naziva mreža konačnih elemenata. Mreže konačnih elemenata se koriste za modeliranje mehaničkih deformacija, prenosa toplote, tečenja fluida, prostiranja elektromagnetskih talasa i druge primene.

Mreže se generalno dele na **struktuurane** i **nestruktuirane**. Strukturane mreže imaju pravilnu (uniformnu) topološku strukturu, pri čemu geometrija elemenata mreže ne mora biti pravilna. Nestruktuirane mreže nemaju uniformnu ni topologiju ni geometriju. TIN pripada grupi nestruktuiranih mreža.

Korišćenje TIN-a za modeliranje površi terena je veoma zastupljeno u brojnim softverskim paketima za formiranje i analizu DMT-a. Kod modeliranja površi terena čvorovi TIN-a su tačke sa poznatim visinama. Trouglovi TIN-a su međusobno povezani u kontinuitetu tako da što bolje aproksimiraju površ koja se modelira. Razlikujemo 2D ili 3D triangulaciju.

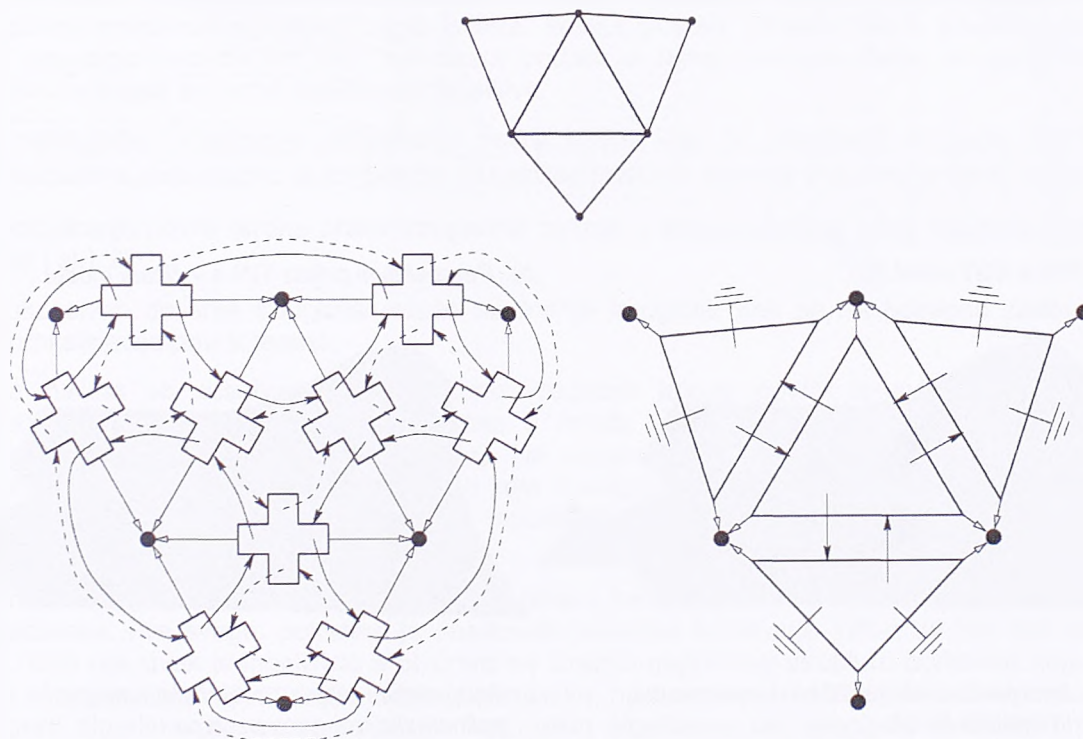
Kod 2D triangulacije vrši se podela (engl. *tesselation*) područja koje pokriva ulazni set podataka u XOY ravni na nepreklapajuće trouglove. Drugim rečima, triangulacija skupa tačaka  $V$  je skup trouglova  $T$  čija temena čine skup  $V$ , čije unutrašnjosti se međusobno ne seku i čija unija kompletno pokriva konveksno telo skupa  $V$ . Istovremeno, korišćenjem i vrednosti visina u tačkama mreže, dobijaju se prostorni trouglovi koji aproksimiraju površ terena. Treba napomenuti da na ovaj način nije moguće predstavljanje površi koja za neku lokaciju  $X, Y$  ima više visina (tunel, pećina, i sl.).



Postoji čitav niz kriterijuma i algoritama za formiranje 2D TIN-a. Najčešće se formira **2D Delaunay-jeva triangulacija** koja ima posebno interesantna geometrijska svojstva (Cvijetinić 1995, Shewchuk 1997). Delaunay-jeva triangulacija maksimizira minimalni ugao trouglova mreže, tj. njome se eliminišu tanki izduženi trouglovi mreže, naravno ukoliko je moguće, s obzirom na raspored ulaznih podataka. U praksi se za modeliranje površi terena, neretko koriste i modifikacije Delaunay-jeve triangulacije da bi se ostvarili neki specifični zahtevi u cilju dobijanja što vernije predstave površi terena. Pored Delaunay-jeve, koriste se i drugi tipovi triangulacije kao što je to triangulacija sa minimalnom sumom stranica trouglova mreže, triangulacija sa minimalnim maksimalnim uglom i sl. U nekim slučajevima zahteva se i ugradnja obaveznih linija i poligona (strukturne i prelomnih linija terena, izohipse, i sl.) u sam TIN, tako da ove linije obavezno budu predstavljene stranicama trouglova TIN-a. U tom slučaju reč je o triangulaciji sa uslovima (engl. *constrained triangulation*). Ukoliko kriterijum za formiranje triangulacije zavisi od vrednosti visina u tačkama iz ulaznog seta, onda se dobija **triangulacija zavisna od podataka** (engl. *data-dependent triangulation*). Razvijeni su brojni algoritmi za formiranje 2D TIN-a, odnosno triangulaciju ulaznog seta podataka. Delaunay-jeva triangulacija, njena svojstva i algoritmi za njeno formiranje detaljnije su razmatrani poglavlju 3.3.1.

3D triangulacija se sastoji od prostornih trouglova čije se projekcije u XOY ravni u opštem slučaju mogu seći, tj. preklapati. Do 3D triangulacije se najčešće dolazi preko tetraedralizacije kojom se konveksno 3D telo definisano ulaznim setom tačaka razbija i deli na međusobno povezane i nepreklapajuće tetraedre. Nakon toga se iz skupa svih stranica (trouglova) tetraedara biraju trouglovi koji aproksimiraju površ terena. Kao i u slučaju 2D triangulacije, i ovde se najčešće koriste **Delaunay-jeva tetraedralizacija**, odnosno **3D Delaunay-jeva triangulacija**. Metode modeliranja površi koje se baziraju na 3D TIN-u nisu posebno razmatrane u okviru ovog rada. U daljim razmatranjima pod pojmom TIN (triangulacija) podrazumevaće se 2D TIN (2D triangulacija).

Struktura podataka kojom se predstavlja TIN može biti bazirana na čuvanju podataka o stranicama trouglova (engl. *triangle edges*) ili na čuvanju podataka o samim trouglovima (Slika 3.5). Drugim rečima, pored tabele koja sadrži tačke (čvorove) TIN-a, potrebno je čuvati i tabelu sa stranicama trouglova za prvi pristup, odnosno tabelu sa trouglovima TIN-a za drugi pristup. U oba slučaja se informacije koje se ne čuvaju direktno (podaci o trouglovima, odnosno o stranicama mreže) mogu dobiti na osnovu topologije mreže.



Slika 3.5 : Primer TIN-a (gore) sa predstavljanjem strukture preko stranica, tj. quad-edge struktura (dole levo) i trouglova (dole desno), strelice označavaju pokazivače (Shewchuk 1997)

Popularni način za predstavljanje triangulacije preko stranica trouglova je struktura četvornih stranica (engl. *quad-edge*). Kod ovog načina za svaku stranicu TIN-a se čuvaju pokazivači (indeksi, identifikatori) za dva čvora TIN-a koji definišu stranicu i četiri pokazivača (indeksa, identifikatora) na četiri stranice koje formiraju trouglove sa leve i desne strane posmatrane stranice TIN-a. To znači da se



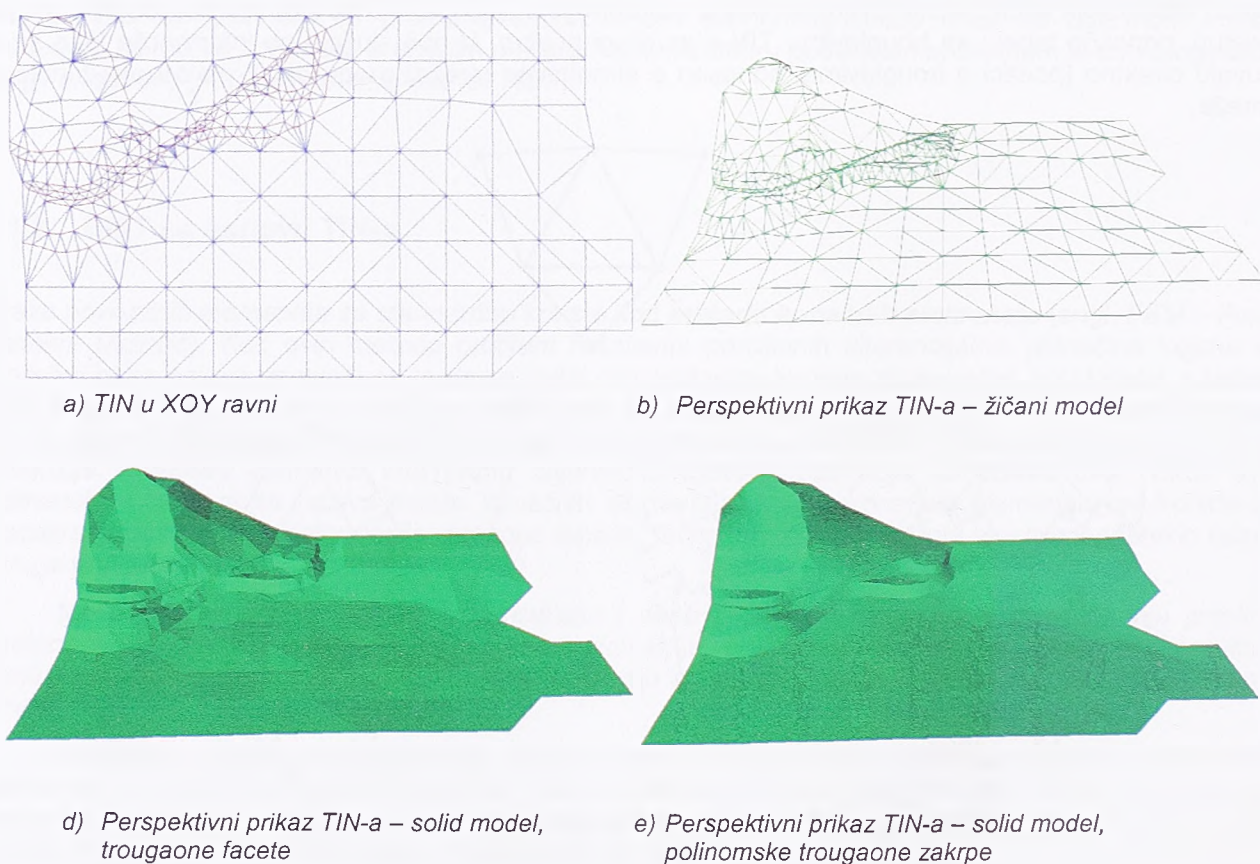
ukupno za svaku stranicu čuva šest pokazivača (indeksa, identifikatora). Prema tome, trouglovi TIN-a su predstavljeni implicitno preko stranica i čvorova TIN-a.

Kod predstavljanja TIN-a preko trouglova, za svaki trougao se vode pokazivači (indeksi, identifikatori) za tri čvora koji čine taj trougao i za tri susedna trougla, tj trouglove koji imaju zajedničke stranice sa posmatranim trouglom.

Kao što se može zaključiti, u oba slučaja se koristi isti broj pokazivača (indeksa, identifikatora). Prednost predstavljanja TIN-a preko trouglova je u tome što je odnos broja trouglova prema broju stranica TIN-a dva naprema tri. Na sledećoj slici je prikazan TIN i šematski prikaz strukture podataka kada se koriste stranice ili trouglovi TIN-a.

Glavna prednost TIN strukture podataka za modeliranja površi terena u odnosu na grid (raster) ogleda se pre svega u tome što se TIN vrlo lako prilagođava svim vrstama ulaznih podataka i raznim tipovima terena. Naime, struktura TIN-a omogućava direktno i jednostavno korišćenje podataka o terenu prikupljenih primenom bilo koje strategije prikupljanja uzorka (selektivni, sistematski, progresivni, kompozitni sampling ili izohipse). Fleksibilna struktura TIN DMT-a omogućava vrlo jednostavno ugrađivanje podataka merenja u vidu karakterističnih tačaka i linija površi terena u sam model. Naravno, podrazumeva se da algoritam za formiranje TIN-a mora obezbediti da sve linije iz ulaznog seta podataka budu predstavljene u TIN-u preko stranica trouglova. Za razliku od grida, u okviru TIN DMT-a mogu se čuvati originalne, tj. izmerene visine. Na ovaj način se postiže optimalno modeliranje površi terena s obzirom na:

- zahtevanu tačnost modeliranja;
- karakteristike terena;
- količinu prikupljenih podataka.



Slika 3.6 : Modeliranje terena korišćenjem TIN-a

Ovo istovremeno TIN DMT čini vrlo podesnim za razvoj funkcija za verifikaciju prikupljenih podataka, jer se uspostavlja direktna veza između DMT-a i prikupljenih podataka što nije moguće ostvariti kod grid DMT-a. Modeliranje površi terena korišćenjem TIN-a je uglavnom lokalnog karaktera, a implementacija lokalnog korigovanja TIN-a (i DMT-a) kroz izmene postojećih podataka ili dodavanje novih

podataka se jednostavno implementira. Sve ovo omogućava da se korišćenjem ovog pristupa može obezbediti softverska podrška za takozvano on-line interaktivno generisanje i verifikacija DMT-a.

Da bi se u okviru DMT-a sačuvala i informacije vezane za tačke, linije i površine koje mogu biti od značaja za modeliranje površi terena, za elemente TIN-a (čvorove, stranice i trouglovi) potrebno je, pored njihove geometrije i topologije, voditi i odgovarajuće atribute. Za čvorove TIN-a taj atribut se može odnositi na to da li taj čvor predstavlja tačku terena koja je vrh, dno ili obična tačka. Atributom se može specificirati i tačnost visine u toj tački, odnosno pripadnost klasi tačaka sa određenom tačnošću. Ta informacija se može iskoristiti za eventualno filtriranje grešaka merenja, tj. proračun površi terena koja ne mora prolaziti kroz (interpolovati) date tačke. Za stranice TIN-a treba voditi atribute kao što su: prelomna linija, strukturalna linija, vododelnica, vodoslivnica, padna linija, linija izohipse, granica interpolacije i sl. Umesto ovih atributa može se voditi pokazivač (indeks, identifikator) koji određuje pripadnosti stranice trougla nekoj liniji iz ulaznog seta podataka. Na osnovu atributa koji bi se onda vodili za te linije, bili bi određeni i svi atributi stranica trouglova. Za površine trouglova se mogu voditi atributi kao što su: područje u kome ne treba računati visine (engl. *dead area*), područje koje pripada kosoj ili horizontalnoj ravni (jezero) i sl. Kod strukture TIN-a koja je data preko trouglova ovo se realizuje relativno jednostavno. Pošto se za čvorove i trouglove TIN-a već vode odgovarajuće tabele treba ih samo proširiti za odgovarajuće atribute. Atributi koji se odnose na linije se mogu voditi direktno uz trouglove, tako da se ovi atributi odnose na stranice trougla koji razdvajaju trougao od njegovih suseda. Druga opcija je da se uz trougao vode samo pokazivači (indeksi, identifikatori) koji stranicu trougla povezuju sa linijama terena za koje se vodi posebna tabela.

Na osnovu formiranog TIN-a i informacija koje se vode uz čvorove, stranice i trouglove tog TIN-a (visine u čvorovima i atributi pomenutih elementa TIN-a) može se manje-više verno predstaviti površ terena.

Najjednostavniji način je da se površ terena predstavi prostornim trouglovima TIN-a. Ovakav način modeliranja terena je implementiran u većini softvera koji podržavaju formiranje i analizu DMT-a korišćenjem TIN-a. Metod je pogodan za neke analize kao što su proračun zapremina, jednostavna 3D vizuelizacija, i sl. Za konstruisanje izohipsi kartografskog kvaliteta ovaj pristup najčešće nije prihvatljiv. Dobijena površ terena je kontinualna ( $C^0$  kontinualnost), ali nije  $C^1(G^1)$  kontinualna što je za mnoge analize vrlo bitno. Posebno su problematične vrednosti funkcionala površi koji se dobijaju iz takvog modela (pravci maksimalnog pada, nagib terena, krivina površi). Ovakav način predstavljanja površi terena je posebno neprikladan ako su ulazni podaci u formi izohipsi. Tada se javlja veliki broj horizontalnih trouglova što je po pravilu neprihvatljivo.

Za naprednije i kvalitetnije modeliranje površi terena koje će obezbediti dobijanje površi koja je  $G^1(C^1)$  kontinualna, neophodno je korišćenje drugačijeg pristupa. Postoje dva načina da se to postigne:

- modeliranje površi terena preko trougaonih zakrpa u formi polinoma višeg stepena (treći, četvrti, peti i sl.), ili
- sukcesivno deljenje trouglova mreže na manje trouglove dok se ne postigne zadovoljavajuća aproksimacija površi terena.

Oba načina se zasnivaju na proračunu vrednosti izvoda površi terena u čvorovima TIN-a korišćenjem položaja i visina susednih tačaka u mreži, kao i svih drugih informacija koje su na raspolaganju (atributi tačke, linija i trouglova). Na osnovu ovog proračuna mogu se, koristeći razne tehnike, sračunati parametri trougaonih zakrpa koje dovoljno dobro aproksimiraju površ terena, ili izvršiti dodatno razbijanje trouglova TIN-a na manje delove. Ove metode su detaljnije obrađene u poglavlju 3.3.2.

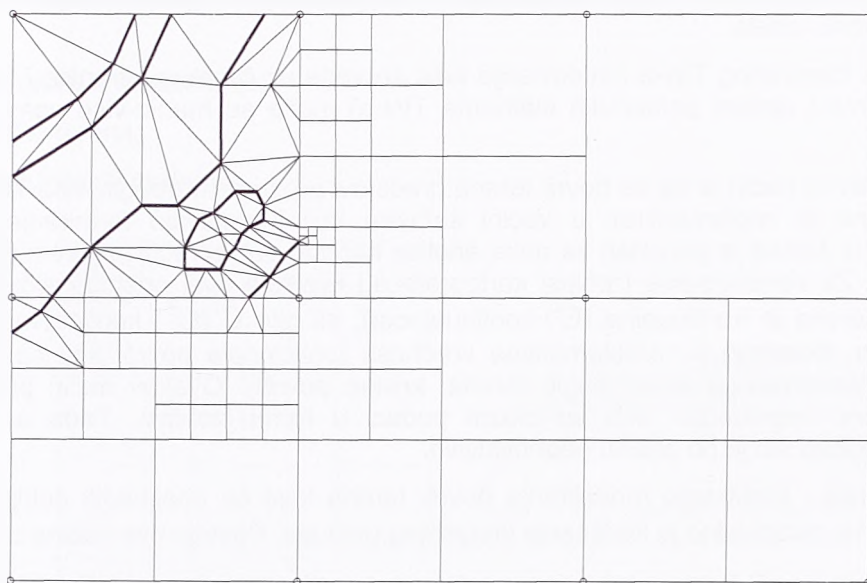
Osnovni nedostatak kod modeliranja površi terena korišćenjem TIN-a su komplikovani algoritmi za obradu podataka. Pre svega, potrebno je obezbediti korektno formiranje TIN-a za bilo koji set ulaznih podataka. Ovo nije uvek jednostavno s obzirom na izrazito nepravilnu strukturu podataka koja se može očekivati i specijalne slučajeve (duple ili vrlo bliske tačke, niz kolinearnih tačaka). Sve ovo postavlja velike zahteve pred algoritme za triangulaciju, jer kod nekih algoritama ovi specijalni slučajevi i nepravilan raspored ulaznih podataka mogu prouzrokovati loše rezultate ili neuspeh. Pored toga, algoritmi za modeliranje površi, bilo da se radi o trougaonim zakrpama ili sukcesivnom deljenju trouglova TIN-a su takođe komplikovani i osetljivi na greške merenja i nepravilan raspored podataka. Dugi, izduženi trouglovi TIN-a su posebno problematični kada je u pitanju modeliranje površi terena trougaonim površinskim zakrpama. Najzad, i sve druge analize koje se kasnije sprovode nad TIN DMT-om su, zbog relativno složene i nepravilne strukture takvog modela, znatno komplikovanije nego iste analize nad grid DMT-om. Sve ovo čini da je implementacija softverskih alata za podršku visoko kvalitetnom digitalnom modeliranju



terena korišćenjem TIN-a veliki izazov. Ovo posebno važi za primene gde se zahteva formiranje i analiza DMT-a sa vrlo velikom količinom podataka (više stotina hiljada ili više miliona visina).

### 3.1.3 DMT sa hibridnom strukturom podataka

U ovu grupu spadaju digitalni modeli terena koji se baziraju na hibridnoj strukturi podataka. Uslovno govoreći, i grid DMT u koji su ugrađene karakteristične tačke i linije terena se može smatrati DMT-om sa hibridnom strukturom podataka. U pravom smislu te reči, hibridni DMT je onaj koji se bazira na kombinaciji grid i TIN strukture podataka. Ovakva struktura podataka koristi dobre strane i gridne i TIN strukture podataka. Sa jedne strane, celokupna oblast koju pokriva DMT se deli na hijerarhijski grid (grid promenljive veličine), a sa druge, unutar pojedinih elemenata grida se, po potrebi, kreira lokalna triangulacija. Na taj način, pravilna struktura omogućava vrlo brzo lociranje i pristup podacima u okviru velikog DMT-a, a istovremeno se struktura podataka efikasno prilagođava karakteristikama terena uz vrlo malu redundantnost podataka. Primer implementacije ovakvog modela podataka je softer *HIFI-88* (Ebner 1988).



Slika 3.7 : DMT sa hibridnom strukturom podataka

## 3.2 Formiranje grid DMT-a

Kao što je to već rečeno prvi korak kod formiranja grid DMT-a je da se sračunaju visine u svim tačkama grida. Izuzetak je, naravno, kada su podaci već prikupljeni u formi grida čiji parametri odgovaraju parametrima grida ciljnog DMT-a (korak grida, orijentacija grida i koordinate početne tačke).

Za interpolaciju visina u tačkama grida mogu se koristiti praktično sve metode interpolacije kojima se na osnovu visina datih u proizvoljno raspoređenim tačkama može sračunati visina za bilo koju zadata tačku koja pada u područje pokriveno ulaznim podacima. Neke od ovih metoda su specijalno razvijene za interpolaciju visina u tačkama grida. Metode koje se mogu primeniti za formiranje grid DMT-a su:

- interpolacija korišćenjem pokretnih površi (interpolacija lokalnim polinomima, metoda inverznih rastojanja - IDW, metoda kose ravni);
- geostatističke metode interpolacije (kolokacija - linearna predikcija po metodi najvećih kvadrata i kriging);
- metod konačnih elemenata;

- metode sa varijacionim pristupom (metoda minimalne krivine sa konačnim razlikama - MINQ, splajnovanje tankim pločama - TPS, splajn sa tenzijom, regularizovani splajn za tenzijom - RST, kompletno regularizovani splajnovi - CRS, multikvadratne funkcije);
- formiranje TIN DMT-a na osnovu ulaznih podataka i interpolacija visina za tačke grida iz njega;
- pretprocesiranje podataka korišćenjem TIN-a, sa ciljem formiranja dodatnog seta podataka (strukturne linije terena i tačke u delovima sa retkim polaznim podacima) i njihovo korišćenje za interpolaciju DMT-a primenom neke od prethodnih metoda interpolacije.

Izbor odgovarajuće metode nije jednostavan i zahteva dobro poznavanje karakteristika površi koja se modelira, karakteristika ulaznih podataka i karakteristika raspoloživih metoda interpolacije.

U ovom poglavlju su obrađene prve četiri grupe metoda interpolacije. Metode iz pete i šeste grupe metoda interpolacije su obrađene u poglavljima koja se bave formiranjem TIN DMT-a (poglavljje 3.3) i formiranjem DMT-a na osnovu izohipsi (poglavljje 3.4), respektivno.

### 3.2.1 Metode interpolacije korišćenjem pokretnih površi

Ove metode se zasnivaju na proračunu matematičke površi za svaku tačku u kojoj se interpoluje vrednost. U opštem slučaju sračunata površ menja svoju orijentaciju i oblik idući od jedne do druge interpolovane tačke, pa su zato ove metode i dobile naziv metode pokretnih površi (Cvijetinović 1995).

Vrednost u interpolovanoj tački se računa kao visina za površ koja je sračunata za tu tačku. Površ može biti horizontalna ravan, kosa ravan ili površ drugog reda. U opštem slučaju određuju se jedan ili više koeficijena jednačine:

$$z(r)=z(x,y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 \quad (3-3)$$

Ove jednačine se formiraju za određeni broj referentnih tačaka na lokacijama  $s_i$  koje se nalaze u neposrednoj blizini interpolovane tačke i za koje su vrednosti  $z_i=z(s_i)$  poznate. Težine koje se dodeljuju visinama referentnih tačaka se dobijaju na osnovu unapred usvojene funkcije. Ova funkcija se bira tako da bude monotono opadajuća funkcija rastojanja referentne tačke od interpolovane tačke. Na osnovu ovih jednačina koeficijenti nepoznate površi se određuju po metodi najmanjih kvadrata. Ako se usvoji lokalni koordinatni sistem za početkom u interpolovanoj tački, dovoljno je sračunati koeficijent  $a_0$ , koji ujedno predstavlja i traženu vrednost u toj tački. Ova metoda se još zove i **interpolacija lokalnim polinomima**.

Najjednostavniji i istovremeno najgrublji način je primena horizontalne ravni, sa jednakim težinama za sve referentne tačke. Znatno bolji rezultati se postižu uvođenjem težina, koje obično predstavljaju inverzne vrednosti rastojanja referentnih tačaka i interpolovane tačke podignutog na neki stepen. Najčešće je to kvadrat rastojanja. Tada se tražena vrednost dobija praktično kao opšta aritmetička sredina vrednost susednih referentnih tačaka po formuli:

$$z(s) = \sum_{i=1}^m w_i \cdot z(s_i) = \frac{\sum_{i=1}^m \frac{z(s_i)}{|s - s_i|^p}}{\sum_{j=1}^m \frac{1}{|s - s_j|^p}}, \quad (3-4)$$

gde su:

$s$  - lokacija na kojoj treba sračunati vrednost površi (najčešće data preko  $x,y$  koordinata,  $s=(x,y)$ ),

$s_i$  - lokacije referentnih tačaka,

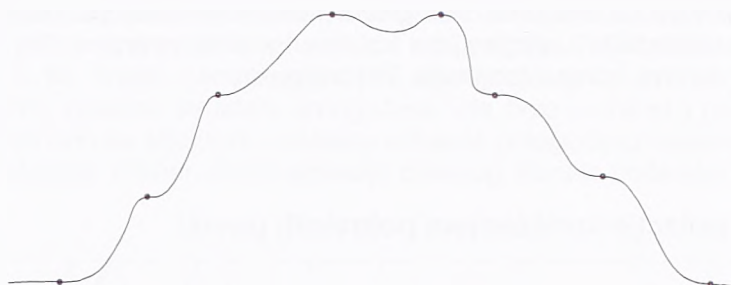
$z(s_i)$  - vrednosti u referentnim tačkama,

$p$  - parametar (najčešće  $p=2$ ).



Ovaj metod je u literaturi poznat kao *metod inverznih rastojanja sa težinama* (engl. *IDW - Inverse Distance Weighted*).

Metod često ne reprodukuje lokalni oblik površi određen ulaznim podacima i proizvodi lokalne ekstremume na referentnim tačkama, tj. interpolovane vrednosti su limitirane vrednostima na referentnim tačkama. Ono što kod ove metode predstavlja najveći problem u praktičnim primenama, je da je vrlo teško izbeći stepenast izgled DMT-a koji je posledica neravnomernog rasporeda tačaka koji pripadaju izohipsama, kao što se to vidi na sledećoj slici.



Slika 3.8 : Primer profila terena površi određene metodom inverznih odstojanja na osnovu podataka u vidu izohipsi

Još bolji rezultati se postižu korišćenjem kose ravni ili površi drugog reda, ali se povećava i broj neophodnih referentnih tačaka koje učestvuju u izravnanju, pa samim tim i broj računskih operacija. Upotreba površi drugog ili čak trećeg reda može biti i problematična, a naročito je to izraženo u delovima gde ne postoji dovoljan broj referentnih tačaka.

Najvažniji faktori koji utiču na interpolovanu vrednost po ovoj metodi su izbor funkcije na osnovu koje se računaju težine i izbor referentnih tačaka koje se uzimaju u obzir pri proračunu površi u interpolovanoj tački. Izbor ovih tačaka se reguliše preko sledećih parametara:

- maksimalan broj izabranih referentnih tačaka;
- prečnik kružnice (ređe parametri elipse) centrirane u interpolovanoj tački unutar koje moraju pasti sve izabrane referentne tačke;
- uslov da u svakom sektoru mora biti dovoljan broj tačaka.

Obično se usvaja isto maksimalno rastojanje za sve interpolacije. Sve tačke koje padaju unutar kružnice sa centrom u interpolovanoj tački i čiji je poluprečnik jednak tom rastojanju se uzimaju za proračun površi. Težine se zatim predstavljaju kao funkcije argumenta  $r$ , koji predstavlja odnos rastojanja interpolovane i referentne tačke i usvojenog maksimalnog rastojanja. Neki primeri ovih funkcija su:

$$w = \frac{(1-r)^2}{r^2}$$

$$w = \frac{1}{r^p}, \quad p > 0$$

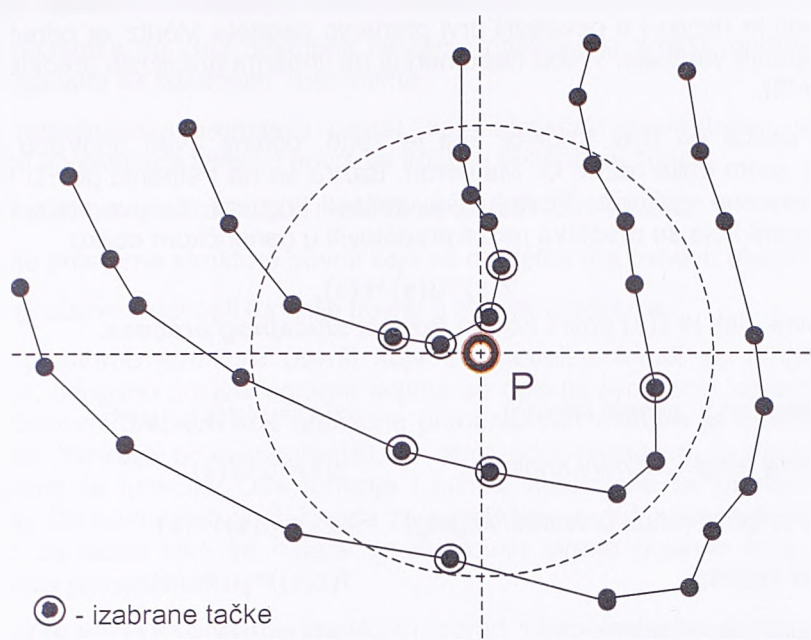
$$w = 1 - 0.9r^2 \quad (3-5)$$

$$w = e^{-ar^2}$$

$$w = 1 - 2r^2 \quad (r \leq 0.5)$$

$$w = 2(1-r)^2 \quad (r \geq 0.5)$$

Pri izboru relevantnih tačaka izohipsi najbolje rezultate daje onaj način biranja tačaka gde se koristi kriterijum ravnomernog broja tačaka po definisanim sektorima (Cvijetinović 1995).



Slika 3.9 : Izbor relevantnih tačaka po sektorima

Algoritam za interpolaciju visina u tačkama pravilne mreže po metodi pokretnih površi se vrlo lako može implementirati, i najčešće je već podržan u okviru postojećih softvera za DMT i GIS. Prednost korišćenja ovog algoritma je što je vrlo brz i robustan, tako da se najčešće koristi za preliminarne analize podataka, a posebno za otkrivanje grubih grešaka u ulaznim podacima za formiranje DMT-a. Većina softverskih rešenja za podršku digitalnom modeliranju terena koja su analizirana u okviru ovog istraživanja - *ArcGIS*, *Geomedia* i *SCOP* poseduju implementaciju ovog algoritma. Uglavnom se radi o IDW algoritmu, sa opcijama za izbor broja i rasporeda referentnih tačaka, ali su nekad podržane i metode interpolacije korišćenjem drugih oblika lokalnih polinoma.

U softverskim alatima se korisniku nudi mogućnost da metodom **krosvalidacije** dođe do optimalnih parametara za izbor referentnih tačaka i načina računanja njihovih težina. Krosvalidacija je postupak gde se korišćenjem izabranih parametara interpolacije (i metod interpolacije) interpoluje visina (vrši predikcija visine) u jednoj referentnoj tački, s tim da ta tačka ne učestvuje u interpolaciji. Zatim se računa razlika između interpolovane i poznate visine. Ovaj postupak se ponavlja za ostale referentne tačke. Na osnovu svih razlika dobija se ukupna ocena tačnosti interpolacije. Softver varira parametre za izabranu metodu interpolacije

Za potrebe formiranja DMT-a na osnovu podataka digitalizacije postojećih podloga, algoritmi iz ove grupe su praktično neupotrebljivi za iole ozbiljnije primene. Razlozi su očigledni i sa prethodne slike. Pored toga, algoritam nije u stanju da respektuje informacije o strukturi površi terena, bilo da su te informacije date eksplicitno kroz karakteristične tačke i strukturne linje terena, ili da su one implicitno predstavljene samim izohipsama. Ovaj metod interpolacije ne daje dobre rezultate kod ovako struktuiranih podataka čak i kada se kao pokretna površ koristi površ sa više stepeni slobode, kao što je kosa ravan, kvadratna ili kubna površ, upravo zbog neravnomernog rasporeda podataka. Zato je njegova primena i ograničena samo na preliminarne analize i za otkrivanje grubih grešaka u podacima.

### 3.2.2 Geostatističke metode

Teoretski, najkorektnije rezultate kod modeliranja neke površi na osnovu izmerenih vrednosti u referentnim tačkama treba očekivati kod primene geostatističkih metoda (*Hardy 1990, Mitas 1999, Moritz 1978*). Ove metode su poznate kao:

- kolokacija po metodi najmanjih kvadrata, i
- kriging.



Kolokacija po metodi najmanjih kvadrata, odnosno linearna predikcija po metodi najmanjih kvadrata je metod koji je razvio i u geodeziji prvi primenio geodeta Moritz za određivanje anomalija sile zemljine teže i odstupanja vertikalna. Treba napomenuti da linearna predikcija predstavlja specijalan slučaj kolokacije (*Moritz 1978*).

Naziv kriging potiče od D.G Krige-a, koji je 1966. godine uveo upotrebu pokretnih sredina u rudarstvo. Metodu je zatim dalje razvio G. Matheron. Bazira se na tretiranju površi interpolacije u skladu sa teorijom regionalizovane varijable. Postoji više varijanti kriginga. Za sve vrste kriginga polazi se od pretpostavke da se površ koja se modelira može predstaviti u generičkom obliku

$$z(\mathbf{s}) = \mu(\mathbf{s}) + \epsilon(\mathbf{s}), \quad (3-6)$$

gde je  $\mu(\mathbf{s})$  *trend* površ, dok je  $\epsilon(\mathbf{s})$  površ koja je rezultat *slučajnog procesa*.

Razlikuju se:

- *prosti kriging* (engl. *simple kriging*)  $z(\mathbf{s}) = \mu + \epsilon(\mathbf{s}), \quad \mu = C$
- *obični kriging* (engl. *ordinary kriging*)  $z(\mathbf{s}) = \mu + \epsilon(\mathbf{s})$
- *univerzalni kriging* (engl. *universal kriging*)  $z(\mathbf{s}) = \mu(\mathbf{s}) + \epsilon(\mathbf{s})$
- *disjunktivni kriging*  $f(z(\mathbf{s})) = \mu_1 + \epsilon(\mathbf{s})$
- *kokriging* (engl. *kokriging*)  $z_1(\mathbf{s}) = \mu_1(\mathbf{s}) + \epsilon_1(\mathbf{s}), \quad z_2(\mathbf{s}) = \mu_2(\mathbf{s}) + \epsilon_2(\mathbf{s})$

Prosti kriging bazira se na pretpostavci da je kovariogram opadajuća funkcija rastojanja. Ovo je rezultat pretpostavke o stacionarnosti posmatrane funkcije. Trend je predstavljen konstantnom vrednošću koja je unapred poznata. Kod običnog kriginga polazi se od pretpostavke kvazi-stacionarnosti. Tu se samo zahteva da su priraštaji funkcije stacionarni, ali ne i sama funkcija. Trend je konstantan i nepoznat je, pa ga treba oceniti na osnovu podataka.

Univerzalni kriging je manje restriktivan od prostog i običnog kriginga i on pretpostavlja samo stacionarnost priraštaja regionalizovane varijable i to samo u susedstvu posmatrane tačke. Polazi se od pretpostavke da se može odrediti trend funkcije koja se modelira.

Kod disjunktivnog kriginga trend je nepoznata konstanta dok je  $f(z(\mathbf{s}))$  proizvoljna funkcija.

Kokriging koristi informacije za nekoliko varijabli. Glavna varijabla je  $z_1$ , a autokorelacija za  $z_1$  i kros-korelacija između  $z_1$  i  $z_2$  se koristi da bi se problem predikcije bolje rešio. Kod prostog kokriginga trend je predstavljen sa nepoznatim konstantama  $\mu_1$  i  $\mu_2$ . Kokriging se javlja i u svim ostalim varijantama u kojima se javlja i kriging (obični kokriging, univerzalni kokriging, disjunktivni kokriging) (*ESRI 2004*).

Obe ove metode koriste iste ili vrlo slične pretpostavke u vezi površi koja se modelira i matematički aparat (*Hardy 1990*). Prema tome, njihovom primenom dobijaju se identični rezultati. Obe metode su nastale otprilike u isto vreme, a razlike u nazivima su posledica toga što su metode razvijene i korišćene u različitim disciplinama (rudarstvo i geodezija).

Primenom ovih metoda dobija se model površi koja poseduje dva vrlo bitna svojstva:

- svojstvo minimalne norme, i
- svojstvo najbolje aproksimacije.

Prvo svojstvo znači da je ta površ "najglatkija" od svih mogućih površi koje prolaze kroz (interpoliraju ili aproksimiraju) referentne tačke, tj. ona minimizira kvadrat drugog izvoda. Drugo, isto tako značajno svojstvo znači da ukupna greška interpolacije primenom geostatističkih metoda treba da bude manja nego kod bilo koje druge metode. Teoretski dobija se najbolja linearna nepomerena ocena.

Ove metode imaju najbolje teoretsko uporište, jer se zasnivaju na statističkoj analizi prikupljenih podataka kojima se opisuje površ koja se modelira. Ovakav pristup je sasvim logičan s obzirom da su ovi podaci rezultat niza merenja koja su neminovno opterećena greškama. Pored toga, ovi podaci u najvećoj meri predstavljaju jedan statistički uzorak na osnovu koga treba rekonstruisati, tj. matematički predstaviti površ koja se modelira.

Uslovi koje modelirana površ mora ispuniti da bi bila podesna za korišćenje geostatističkih metoda su:

- da se površ može tretirati kao stacionarna slučajna funkcija dve varijable, i
- da je funkcija površi izotropna.

Kroz statističku analizu koja se sprovodi geostatističkim metodama ostvaruju se dva cilja:

- iz ulaznih podataka se kroz postupak filtriranja odstranjuju greške merenja i koriguju merenja koja nisu saglasna sa susednim merenjima
- dobija se matematička predstava površi, koja statistički posmatrano, sa visokim stepenom verovatnoće aproksimira stvarnu površ za koju su prikupljeni podaci.

Interpolacija primenom geostatističkih metoda se izvodi u dva koraka:

- kvantifikacija prostorne strukture površi koja se modelira (na osnovu ulaznih podataka), i
- predikcije, tj. ocene vrednosti funkcije površi u zadatim tačkama.

Kvantifikacija prostorne strukture površi koja se modelira izvodi se empirijskim određivanjem kovarijacione funkcije, odnosno poluvariograma kojima se opisuje prostorna zavisnost vrednosti funkcije u tačkama površi. Osnovni problem kod praktične primene ovih metoda je upravo izbor odgovarajuće kovarijacione funkcije (funkcije poluvariograma), tj. izbor odgovarajućeg modela funkcije i empirijsko određivanje parametara te funkcije. Ove funkcije i njihovi koeficijenti se moraju posebno odrediti za različite tipove terena. Diskontinuiteti prvih izvoda za površi terena duž prelomnih linija terena se uzimaju u obzir tako što se za tačke koje se nalaze sa suprotnih strana ovakvih linija uzima da je njihova međusobna kovarijanca jednaka nuli.

Kod kriginga, a to važi i za linearnu predikciju, pored interpolacionih vrednosti, dobijaju se i ocena greške i interval poverenja za interpolovanu vrednost, što se ne može dobiti drugim metodama.

Kriging se često implementira u paketima koji služe za geostatističke analize. Primeri takvih softverskih alata su *ArcGIS Geostatistical Analyst*, *ArcGIS Spatial Analyst* i *ArcGIS 3D Analyst* američke firme *ESRI* koji se isporučuju kao ekstenzije ArcGIS softverskog paketa (*w33*) i *Geomedia Grid* američke firme *Intergraph*. Implementacije kriginga u okviru ovih softverskih alata su vrlo kvalitetne i obezbeđuju napredne alate za izbor oblika funkcije (eksponencijalna, sferna, Gausova, Bessel-ova, i dr.) kojom se modelira kovariogram, odnosno kovarijaciona funkcija, kao i za ocenu i verifikaciju parametara te funkcije u analitičkom i grafičkom obliku. Ovi paketi nude podršku i za optimizaciju parametara te funkcije primenom krosvalidacije i validacije. Ovo u velikoj meri pomaže manje iskusnim korisnicima da odrede parametre ove funkcije što je i najkompliciraniji deo posla kod korišćenja geostatističkih metoda interpolacije. Implementacije geostatističkih metoda u okviru paketa *ArcGIS* i *Geomedia* ne podržavaju respektovanje prelomnih linija, tj. linija koje definišu diskontinuitet glatkosti interpolovane površi.

Najpoznatiji softver za DMT kod koga je implementirana metoda linearne predikcije po metodi najmanjih kvadrata svakako je *SCOP (Stuttgart Contour Interpolation Program)*. Ovaj softver je ujedno i softverski paket koji se vrlo često koristi kao softver za podršku upravljanju velikim DMT-ovima koji pokrivaju teritorije čitavih država (*SCOP 1991, w14, Hochstöger 1996*). Podržana je efikasna interpolacija za velike skupove ulaznih podataka deljenjem područja interpolacije na jednake pravougaone segmente sa oko 1000 tačaka po jednom segmentu i odgovarajućim prekolopm između susednih celina da bi se izbegle razlike u interpolaciji na granicama segmenata. U okviru ovog softvera podržano je i respektovanje prelomnih linija terena tako što se kod proračuna vrednosti kovarijanca za tačke koje su razdvojene prelomnom linijom uzima da je kovarijanca jednaka nuli. Za ovaj softver su urađena i brojna proširenja koja imaju za cilj kvalitetniju obradu i pretprocesiranje podataka koji dolaze iz raznih izvora, kao što je to slučaj sa LIDAR podacima (*Pfeifer 2001*) ili podacima digitalizacije postojećih podloga (*Heitzinger 2001*). Sve u svemu, ovaj softver predstavlja jedno zaokruženo softversko okruženje sa svim neophodnim funkcijama za visoko kvalitetno formiranje DMT-a i naknadne analize.

Kada je u pitanju primena ovih metoda za rekonstrukciju površi terena na osnovu podataka dobijenih digitalizacijom postojećih podloga treba istaći da ovde poseban problem predstavlja izuzetno neravnomeran raspored referentnih tačaka. Naravno, uglavnom su to tačke koje čine izohipse. Sa druge strane, metode su generalnog tipa i nisu u stanju da iskoriste sve informacije koje su implicitno date preko izohipsi. Nije moguće, bez posebne modifikacije, ekstrapolovati vrednosti u oblastima ograničenim jednom izohipsom, gde se očekuje postojanje vrha brda ili dna doline. Ovaj problem ne postoji u slučaju kada se u ulaznim podacima, pored digitalizovanih izohipsi, nalaze i visine za tačke koje predstavljaju lokalne ekstremume. Ovo je svakako najpovoljniji slučaj kada su u pitanju i sve druge metode za rekonstrukciju površi terena na osnovu podataka digitalizacije postojećih podloga. Ako se ulazni podaci dopune podacima u vidu strukturnih linija terena, dobijenim direktnim merenjima ili analizom i pretprocesiranjem ulaznih podataka sa izohipsama, onda se kod primene linearne predikcije po metodi najmanjih kvadrata mogu očekivati vrlo dobri rezultati.



### 3.2.2.1 Kvantifikacija prostorne strukture površi

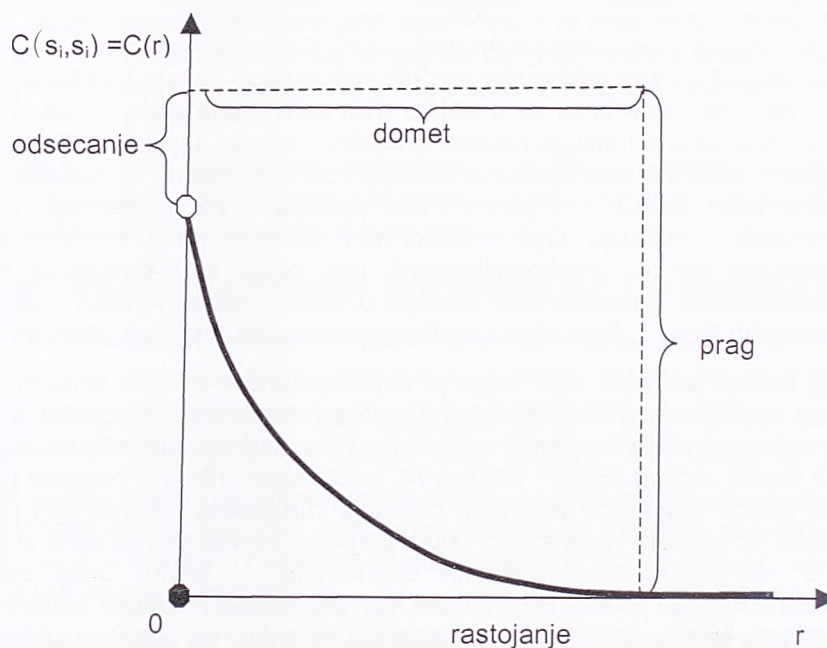
Pre interpolacije nepoznatih vrednosti u proizvoljnim tačkama (najčešće su to tačke pravilne mreže koje će se kasnije koristiti za definiciju modela površi) neophodno je poznavanje stohastičkih osobina obeju komponenata (i korelisane i nekorelisane) koje učestvuju u poznatim vrednostima na referentnim tačkama. Ove osobine se mogu odrediti empirijski na osnovu poznatih vrednosti u referentnim tačkama, ili na osnovu nekih prethodno utvrđenih pretpostavki. Ove osobine se predstavljaju kovarijacionom funkcijom ili poluvariogramom.

Ako je površ realizacija slučajne funkcije sa određenom prostornom kovarijancom onda je:

$$C(s_i, s_j) = \text{Cov}\{z(s_i) - z(s_j)\}, \quad (3-7)$$

i ako je površ stacionarna onda vrednosti u tačkama površi zavise samo od međusobnog rastojanja (vektora)  $r$  između posmatranih tačaka, a ne i od njihovog položaja. Koristeći date vrednosti  $z(s_i)$  u referentnim tačkama na lokacijama  $s_i$  dobija se da je:

$$C(r) = \text{Cov}\{z(s_i) - z(s_j)\} = \text{Cov}\{z(s+r) - z(s)\} \approx \frac{1}{N_r} \sum_{(ij)} z(s_i) \cdot z(s_j) \quad (3-8)$$

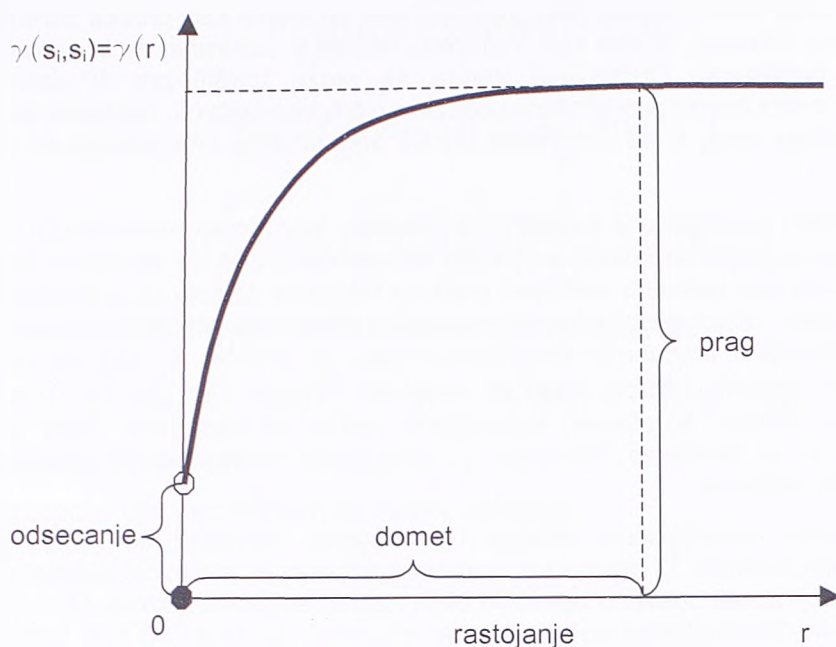


Slika 3.10: Kovarijaciona funkcija zavisnosti vrednosti od rastojanja između tačaka

Pored kovarijacione funkcije, za ocenu karakteristika površi koja se modelira u smislu ocenjivanja i kvantifikacije prostorne zavisnosti, koristi se i poluvariogram  $\gamma(r)$ . Kao i u slučaju kovarijacione funkcije koristeći date vrednosti  $z(s_i)$  u referentnim tačkama na lokacijama  $s_i$  i pretpostavke u vezi stacionarnosti funkcije može se oceniti poluvariogram koji se definiše kao:

$$\gamma(r) = \frac{1}{2} \text{Var}\{z(s_i) - z(s_j)\} = \frac{1}{2} \text{Var}\{z(s+r) - z(s)\} \approx \frac{1}{2N_r} \sum_{(ij)} [z(s_i) - z(s_j)]^2 \quad (3-9)$$

Tipičan izgled ovog poluvariograma je dat na sledećoj slici.



Slika 3.11 : Poluvariogram

Veza između poluvariograma i prostorne kovarijance je data formulom:

$$\gamma(r) = C(0) - C(r), \quad (3-10)$$

pri čemu je  $C(0)$  vrednost poluvariograma u beskonačnosti (iza praga).

U praksi se, s obzirom da kovarijaciona funkcija, odnosno poluvariogram, nisu unapred poznati, vrši empirijsko određivanje ovih funkcija, a na osnovu datih vrednosti  $z(s_i)$  u referentnim tačkama na lokacijama  $s_i$ . Kod računanja empirijske kovarijance i poluvariograma sumiranje se vrši za svih  $N_r$  parova tačaka koje su na udaljenosti  $r \pm \Delta r$ , gde je  $\Delta r$  korak kod histograma kojim se predstavlja frekvencija pojavljivanja parova tačaka na rastojanju  $r$ .

Za kovarijacionu funkciju se najčešće uzima Gausova zvonasta kriva:

$$C(r) = Ce^{-K^2 r^2}, \quad (3-11)$$

ali to mogu biti i druge funkcije, kao što su to sferne, eksponencijalne, kvadratne, Bessel-ove i druge funkcije. Neki primeri ovih funkcija su:

$$\begin{aligned} C(r) &= Ce^{-K^2 |r|} \\ C(r) &= \frac{C}{e^r + e^{-r}} \\ C(r) &= \frac{C}{2|r|} \\ C(r) &= C \cos(K^2 \pi^r) \end{aligned} \quad (3-12)$$

Kao što je to već rečeno, po ovoj metodi interpolaciona površ se tretira kao stacionarna slučajna funkcija dve varijable. Da bi se moglo poći od jedne ovakve pretpostavke, potrebno je iz vrednosti u referentnim tačkama prethodno odstraniti uticaj trenda, tako da se u tim tačkama dobiju srazmerno male apsolutne vrednosti i da im je aritmetička sredina bliska nuli. Tada se može pretpostaviti da su ove vrednosti sastavljene iz korelisano (sistematskog) dela koji se još naziva i signal i nekorelisano (slučajnog) dela koji predstavlja šum (Moritz 1978, Mihajlović 1985, Cvijetinović 1995, SCOP 1991). Zadatak predikcije je da se u svakoj tački na osnovu poznatih referentnih vrednosti odredi korelisana, sistematska komponenta. Interpolovana visina se zatim dobija kao zbir prethodno odstranjene trend



vrednosti u toj tački i ovog sistematskog dela. Slučajni deo se tretira kao greška određivanja (merjenja) vrednosti na referentnim tačkama, ili kao šum koji treba filtrirati tj. odstraniti da bi se dobila glatka površ sa željenim nivoom detaljnosti. Otklanjanje trenda se može izvršiti pre ili uporedo sa samom interpolacijom. Ovo se može izvesti proračunom i oduzimanjem trend površi. Najčešće se ova trend površ modelira polinomom nižeg reda, ili se čak može izvršiti preliminarna interpolacija sa relativno visokim stepenom glačanja.

Nepoznati parametri kovarijacione funkcije (za Gausovu krivu to su parametri  $C$  i  $K$ , pri čemu je  $r$  rastojanje između tačaka) mogu se utvrditi empirijski ako se raspolaže sa dovoljnim brojem referentnih tačaka, tako što se na osnovu poznatih vrednosti sračuna varijanca za koju se pretpostavlja da je ista za sve referentne tačke, kao i odgovarajuće kovarijance za različite intervale rastojanja između referentnih tačaka. Na osnovu empirijski sračunatih kovarijanci mogu se grafički ili računski odrediti nepoznati parametri kovarijacione funkcije. Slučaj kada je vrednost funkcije  $C(r)$  za  $r=0$  (parameter  $C$ ) kod Gausove krive jednaka varijanci korelisanih komponenti, naziva se takozvana "čista" predikcija. Što je ova vrednost manja, to je izraženije filtriranje, tj. odstupanje interpolovanih vrednosti od poznatih vrednosti na referentnim tačkama.

Upravo određivanje kovarijacione funkcije i predstavlja najvažniji ali i najosetljiviji deo kod korišćenja geostatističkih metoda. U praktičnim primenama često je potrebno podeliti set podataka na delove za koje se u daljoj obradi posebno određuju oblik i parametri kovarijacione funkcije. Podrazumeva se da je to uslovljeno karakteristikama površi koja se modelira. Za svaki od ovih setova treba izabrati odgovarajući oblik kovarijacione funkcije (poluvariograma) i na osnovu samih podataka softver proračunava vrednosti parametara.

### 3.2.2.2 Predikcija

Ako nepoznatu vrednost u nekoj tački predstavimo preko linearne kombinacije  $N$  vrednosti na referentnim tačkama:

$$z(s) = \sum_{i=1}^N \lambda_i \cdot z(s_i) = \sum_{i=1}^N \lambda_i \cdot z_i = \lambda_1 z_1 + \lambda_2 z_2 + \dots + \lambda_N z_N, \quad (3-13)$$

tada nepoznate koeficijente  $\lambda_i$  možemo odrediti pod uslovom da je kvadrat srednje greške interpolovane vrednosti  $z(s)$  minimalan. Detaljno izvođenje formula na osnovu kojih se vrši predikcija može se naći na više mesta u literaturi (*Hardy 1984, Moritz 1978, Mihajlović 1984*).

Kao što je to već rečeno, u opštem slučaju (univerzalni kriging i kolokacija) polazi se od pretpostavke da se funkcija površi terena  $z(s)$  može predstaviti kao suma dve površi, i to trend površi  $\mu(s)$  i površi  $\epsilon(s)$  koja fluktuirá i koja je rezultat slučajnog procesa:

$$z(s) = \mu(s) + \epsilon(s). \quad (3-14)$$

Ako se počne od pretpostavke da je trend površ:

$$\mu(s) = 0, \quad (3-15)$$

onda se na osnovu (3-6) i (3-15) dobija da je:

$$z(s) = \epsilon(s). \quad (3-16)$$

Matematičko očekivanje kvadrata razlike između ocenjene vrednosti površi  $\hat{z}(s)$  i stvarne vrednosti  $z(s)$  u nekoj tački  $s=(x,y)$  je:

$$E[\hat{z}(s) - z(s)]^2 = E\left\{ [z(s)]^2 - 2z(s) \sum_{i=1}^N \lambda_i z(s_i) + \sum_{i=1}^N \lambda_i z(s_i) \sum_{k=1}^N \lambda_k z(s_k) \right\} \quad (3-17)$$

$$E\{[z(s)]^2\} = \text{Var}[z(s)] = \sigma^2(s) \quad (3-18)$$

$$-2E\{z(s) \sum_{i=1}^N \lambda_i z(s_i)\} = -2 \sum_{i=1}^N \lambda_i C(s_i, s) \quad (3-19)$$

$$E\left\{\sum_{i=1}^N \lambda_i z(s_i) \sum_{k=1}^N \lambda_k z(s_k)\right\} = \sum_{i=1}^N \lambda_i \lambda_k C(s_i, s_k) \quad (3-20)$$

Uvrštavanjem prethodnih jednačina u jednačinu (3-17) dobija se:

$$E[\hat{z}(s) - z(s)]^2 = \sigma^2(s) - 2\lambda^T k(s) + \lambda^T K \lambda = E_{ss}, \quad (3-21)$$

gde je  $K=C(s_i, s_k)$ , a  $k(s)=C(s_i, s)$ .

Diferenciranjem i izjednačavanjem sa nulom, dobija se:

$$\frac{\partial E_{ss}}{\partial \lambda_i} = -2k(s) + 2K\lambda \quad (3-22)$$

$$\lambda = K^{-1}k(s) = k(s)^T K^{-1} \quad (3-23)$$

Ako sad zamenimo  $\lambda_i$  u jednačini (3-13) dobija se ocena vrednosti u nekoj tački s:

$$\hat{z}(s) = k(s)^T K^{-1} z(s_i) \quad (3-24)$$

gde je:

$k(s)$  - vektor kovarijanci između vrednosti funkcije u interpolovanoj tački i vrednosti funkcije u referentnim tačkama,

$K$  - kovarijaciona matrica vrednosti u referentnim tačkama (element  $K_{ij}$  predstavlja vrednost kovarijacione funkcije za rastojanje između i-te i j-te tačke),

$z(s_i)$  - vektor vrednosti u referentnim tačkama.

Formula za standardnu grešku predikcije glasi (Hardy 1984):

$$\sigma_E^2(s) = \sigma^2(s) - k(s)^T K^{-1} k(s) \quad (3-25)$$

Gore izvedena formula važi za slučaj kada je trend površ  $\mu(s) = 0$ . Univerzalni kriging podrazumeva postojanje trend površi koju je potrebno oceniti na osnovu poznatih vrednosti  $z(s_i)$  u tačkama  $s_i$ . Postupak je sledeći:

- vrši se ocenjivanje trend površi preko izabranog modela (najčešće polinom izabranog stepena) tako da dovoljno dobro aproksimira vrednosti u datim tačkama;
- računaju se greške (popravke) između izmerenih vrednosti u referentnim tačkama i vrednosti u tim tačkama na osnovu sračunate trend površi, i
- računa se predikcija vrednosti  $\hat{z}(s)$  u nekoj tački  $s_i$ .

Koristeći prethodne formule i gore izneto, formula (3-14) postaje:

$$\hat{z}(s) = \hat{\mu}(s) + \hat{\varepsilon}(s) \quad (3-26)$$

što znači da ocena predikcije  $\hat{z}(s)$  zavisi od pretpostavljenog ili ocenjenog trenda (sistematskog dela)  $\hat{\mu}(s)$ , kao i od preostalog šuma (slučajnog dela)  $\hat{\varepsilon}(s)$ , tj. ocene slučajnog procesa. Ako gornju jednačinu napišemo u drugom obliku:



$$\hat{z}(s) - \hat{\mu}(s) = \hat{\varepsilon}(s) \quad (3-27)$$

gde ocenu slučajnog procesa  $\hat{\varepsilon}(s)$  treba tretirati kao razliku između totalne varijacije površi i ocenjenog trenda. Vrednosti ovih razlika, tj. diskretne vrednosti za slučajni proces  $\hat{\varepsilon}(s)$  u referentnim tačkama možemo dobiti korišćenjem formule:

$$W_N = z(s_i) - f(s_i)^T \beta \quad (3-28)$$

gde je:

- $W_N$  - vektor razlika poznatih vrednosti površi u referentnim tačkama i vrednosti trend površi;
- $z(s_i)$  - vektor vrednosti u referentnim tačkama;
- $\beta$  - vektor koeficijenata polinoma kojim se predstavlja trend površ koji se ocenjuju iz uslova da je  $W_N^T W$  minimalno;
- $f(s_i)^T$  - matrica koeficijenata polinoma koja zavisi od vrednosti koordinata u referentnim tačkama  $i$ , naravno, oblika i stepena polinoma kojim se modelira trend površ  $1, x_i, x_i^2, x_i^3, y_i^2, y_i^3, x_i y_i, x_i^2 y_i^2$  i slično).

U tom slučaju jednačina (3-27) se može napisati kao:

$$\hat{z}(s) - \hat{\mu}(s) = k(s)^T K^{-1} W_N \quad (3-29)$$

Ocenjeni trend u tački u kojoj se vrši predikcija je:

$$\hat{\mu}(s) = f(s)^T \beta, \quad (3-30)$$

pa je konačna formula za predikciju vrednosti u nekoj tački  $r$ :

$$\hat{z}(s) = f(s)^T \beta + k(s)^T K^{-1} W_N \quad (3-31)$$

Ako uvedemo da je  $F=f(x_i)^T$ , onda se vrednost standardne greške predikcije može dobiti po formuli:

$$\sigma_E^2(s) = [\text{Var}(z(s) - k(s)^T K^{-1} k(s))] + [(f(s)^T - k(s)^T K^{-1} F) A^{-1} (f(s)^T - k(s)^T K^{-1} F)^T] \quad (3-32)$$

gde je  $A^{-1} = (F^T K^{-1} F)^{-1}$ .

Da bi se izbegla inverzija matrice  $K$  velikih dimenzija, u praksi se vrši deljenje područja interpolacije na manje celine. Pri tome se po pravilu obezbeđuje dovoljan preklap između ovih celina, da bi se izbegao diskontinuitet interpolovane površi. Za sve interpolovane tačke unutar jedne celine računa se i invertuje matrica  $K$  samo jednom, dok se za svaku interpolovanu tačku posebno računaju samo vektor  $k(s)$  i vrednost  $z(s)$ .

### 3.2.3 Metod konačnih elemenata

Ideja na kojoj se bazira ova metoda se sastoji u tome da se površ terena aproksimira dovoljno malim elementima koji su međusobno povezani u kontinuitetu, a koji minimalno odstupaju od datih tačaka. Uglavnom se koriste elementi pravougaonog, ili još češće kvadratnog oblika. Svaki pravougaoni element se može predstaviti posebnim polinomom nižeg stepena. U praksi se najčešće koriste bilinearni ili potpuni bikubni polinom. Bilinearni polinom predstavlja funkcija oblika:

$$z(x,y) = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y + a_{11}xy, \quad (3-33)$$

dok bikubni ima sledeći oblik:

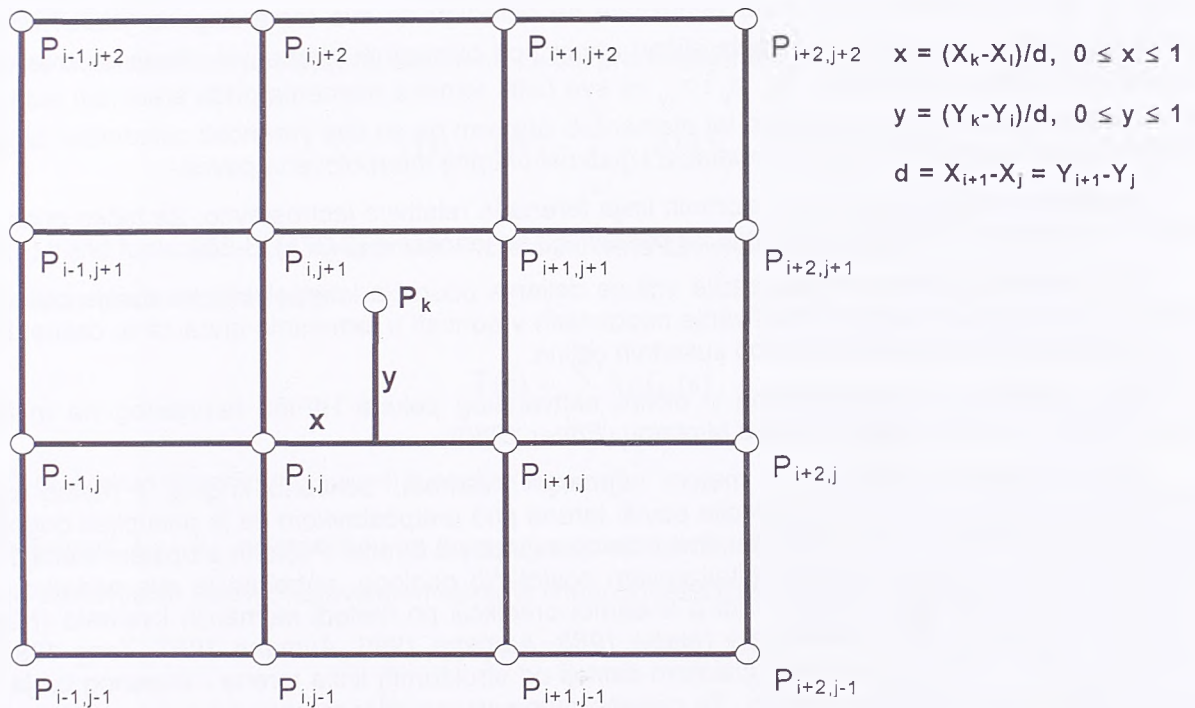
$$z(x,y) = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y + a_{20}x^2 + a_{11}xy + a_{02}y^2 + a_{30}x^3 + a_{21}x^2y + a_{12}xy^2 + a_{03}y^3 + a_{22}x^2y^2 + a_{13}xy^3 + a_{32}x^3y^2 + a_{23}x^2y^3 + a_{33}x^3y^3 \quad (3-34)$$

Za svaki pravougaoni element su nepoznati parametri polinoma  $a_{ij}$ , i potrebno je odrediti ih na osnovu vrednosti u referentnim tačkama koje su u opštem slučaju nepravilno raspoređene po području interpolacije. Koeficijenti polinoma se određuju postavljanjem dva uslova:

- da je suma kvadrata popravaka na referentnim tačkama minimalna, i
- da je suma koja izražava zakrivljenost ukupne površi minimalna.

Na osnovu ovih uslova formiraju se jednačine popravaka po metodi posrednog izravnjanja sa odgovarajućim težinama koje se biraju prema greškama vrednosti u referentnim tačkama. Sa ovih jednačina se po poznatom postupku prelazi se na sistem normalnih jednačina. Drugi uslov, zaravnjenost površi u tačkama grida, uvodi se zato da bi se izbegao singularitet matrice normalnih jednačina, ali i da bi se izvršilo filtriranje podataka. Sa bilinearnim elementima se dobija ukupna površ koja je kontinualna, ali nije obezbeđena glatkost prelaza iz jednog u drugi element ( $C^0$  kontinualnost), dok je kod bikubnih elemenata obezbeđena i kontinualnost i glatkost površi ( $C^1$  kontinualnost).

Ovde će se dati samo primer formiranja jednačina za metodu bilinearnih elemenata. Ako se za neki element grida usvoji jedan normalizovani lokalni koordinatni sistem, kod koga su vrednosti za  $x$  i  $y$  koordinate u četiri temena grida 0 ili 1 (Slika 3-11a),



Slika 3-11a : Bilinearni pravougaoni element

Računanje vrednosti u nekoj tački se u tom slučaju može izvršiti postavljanjem četiri jednačine (3-33) za svako teme  $P_{ij}$ . Rešenje sistema predstavljaju nepoznati koeficijenti  $a_{ij}$ . Kao krajnji rezultat dobija se formula:

$$z_k = z_{ij} + (z_{i+1,j} - z_{i,j})x + (z_{i,j+1} - z_{i,j})y + (z_{i,j} - z_{i+1,j} - z_{i,j+1} + z_{i+1,j+1})xy \quad (3-35)$$

gde su  $z_{ij}$  vrednosti u temenima grida.



Za svaku referentnu tačku se, dakle, može napisati jedna jednačina popravke:

$$v_k = (1-x)(1-y)z_{ij} + x(1-y)z_{i+1,j} + (1-x)y z_{i,j+1} + xyz_{i+1,j+1} - z_k, \quad k = 1, 2, \dots, s, \quad (3-36)$$

gde je  $s$  ukupan broj referentnih tačaka.

Za glačanje ukupne površi postavljaju se i jednačine za minimalizaciju krivina (uslov zaravnjenosti površi) u svim unutrašnjim temenima grida, po  $X$  i  $Y$  pravcu:

$$v_{xxij} = z_{i-1,j} - 2z_{ij} + z_{i+1,j} - 0, \quad i=2, 3, \dots, m-1, \quad j=1, 2, \dots, n \quad (3-37)$$

$$v_{yyij} = z_{i,j-1} - 2z_{ij} + z_{i,j+1} - 0, \quad i=1, 2, \dots, m, \quad j=2, 3, \dots, n-1 \quad (3-38)$$

gde su  $n$  i  $m$  broj vrsta, odnosno kolona matrice grida. Drugi izvodi površi  $z_{xx}$  i  $z_{yy}$  za koje se formiraju ove jednačine predstavljaju u ovom slučaju fiktivna merenja sa vrednošću nula. Ovim merenjima se obično daju težine oko deset puta manje od onih koje se dodeljuju merenim vrednostima u referentnim tačkama. Od odnosa ovih težina zavisi i stepen filtriranja podataka, tj. odstupanje interpolovane površi od vrednosti u referentnim tačkama. Ukupan broj jednačina je prema tome:

$$N = s + 2n(m-2) + 2m(n-2) = 4mn + s - 4(n+m), \quad (3-39)$$

pri čemu broj nepoznatih vrednosti u temenima grida iznosi  $m \cdot n$ . Kod digitalnog modeliranja terena prekidne (prelomne) linije se uzimaju u obzir tako što se prvo sračunaju visine presečnih tačaka ovih linija i linija pravilne mreže. Za ove visine se takođe postavljaju jednačine popravaka, ali ne i jednačine kojima se zahteva zaravnjenost površi u ovim tačkama.

Kod bikubnih elemenata nepoznate predstavljaju vrednosti  $z_{ij}$ , prvi izvodi  $z_x$ ,  $z_y$  i mešoviti drugi izvod  $z_{xy}$  za sva temena grida. Ove nepoznate se određuju za sva temena grida jednovremeno, po metodi posrednog izravnanja, na način sličan onom kod bilinearnih elemenata. Kada su ove vrednosti poznate, nije teško na osnovu  $z$ ,  $z_x$ ,  $z_y$  i  $z_{xy}$  za sva četiri temena elementa grida sračunati jednoznačno svih 16 parametara bikubne površi za taj element. S obzirom da su ove vrednosti zajedničke za susedne elemente grida, obezbeđena je kontinualnost i glatkost ukupne interpolovane površi.

Respektovanje strukturnih i prelomnih linija terena je relativno jednostavno. Za tačke grida koje se nalaze na suprotnim stranama ovih linija ne postavljaju se jednačine (3-37) i (3-38)

Kod praktične softverske realizacije vrši se deljenje područja interpolacije na manje celine, pa se onda vrši posebno izravnanje i određivanje nepoznatih vrednosti u temenima grida za te celine. Pri tome se mora obezbediti neophodan preklap susednih celina.

Ova metoda je implementirana u okviru softverskog paketa HIF188 razvijenog na Institutu za fotogrametriju Tehničkog univerziteta u Minhenu (Ebner 1980).

Kao i linearna predikcija po metodi najmanjih kvadrata, odnosno kriging, i metod konačnih elemenata pristupa problemu interpolacije površi terena pod pretpostavkom da je prikupljen odgovarajući reprezentativan uzorak sa tačkama i linijama koje opisuju površ terena. Pošto to u opštem slučaju ne važi kada su u pitanju podaci dobijeni digitalizacijom postojećih podloga, potrebno je ove podatke dopuniti dodatnim informacijama, bilo da se radi o linearnoj predikciji po metodi najmanjih kvadrata (Heitzinger 2001) ili o metodi konačnih elemenata (Inaba 1988, Aumann 1990, Aumann 1992, Tang 1992, Tang 1992, Tang 1991). Ova dopuna se uglavnom sastoji od strukturnih linija terena i izvesnog broja rasutih tačaka u oblastima gde nema izohipsi. Za potrebe automatskog generisanja ovih informacija na osnovu digitalizovanih izohipsi razvijaju su posebni algoritmi koji su razmatrani poglavljima 3.4.2 i 4.5.2.

### 3.2.4 Metode sa varijacionim pristupom

Zajedničko za sve metode sa varijacionim pristupom je to što se interpolaciona funkcija određuje uz uslov da se minimalizuje odgovarajući funkcional površi koji predstavlja neku meru glatkosti same površi.

Polazi se od pretpostavke da interpolaciona funkcija (model površi) treba da prolazi (ili bar vrlo blizu) kroz date (referentne) tačke i da je glatka koliko je to moguće. Ova dva zahteva se kombinuju u jedan jedinstveni uslov kojim se minimizira suma odstupanja od datih tačaka i funkcija kojom se meri glatkost funkcije (Mitas 1999):

$$\sum_{j=1}^N |z_j - F(s_j)|^2 w_j + w_0 I(F) = \text{minimum}, \quad (3-40)$$

pri čemu su  $w_i, w_j$  pozitivne težine a  $I(F)$  označava glatkost funkcije.

Ako se zahteva da interpolaciona funkcija u datima tačkama ima zadate vrednosti, onda se postavljeni uslovi mogu iskazati kao:

$$z(s_j) = z_j, \quad j=1,2,\dots,N \quad (3-41)$$

$$I(F) = \text{minimum} \quad (3-42)$$

Mera glatkosti funkcije  $F(z)$ , za  $d$ -dimenzionalni prostor domena  $s=(x_1,x_2,\dots,x_d)$  može se izraziti preko (Mitasova 1993):

$$I(F) = \sum_{\alpha} B_{\alpha} \int_{\Omega} \dots \int \left[ \frac{\partial^{|\alpha|}}{\partial x_1^{\alpha_1} \partial x_2^{\alpha_2} \dots \partial x_d^{\alpha_d}} F(s) \right]^2 dx_1 dx_2 \dots dx_d, \quad (3-43)$$

gde je  $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_d)$  niz nenegativnih celobrojnih,  $|\alpha| = \sum_i \alpha_i$ ,  $\Omega$  je posmatrani region  $d$ -

dimenzionalnog prostora, a  $B_{\alpha}$  su nenegativne konstantne. Za slučaj da je funkcija  $F$  funkcija dveju varijabli ( $F(s) = F(x,y)=z(x,y)$ ) što je slučaj kod digitalnog modeliranja površi terena onda u fomulama treba uzeti da je  $d=2$ .

Površ koja ispunjava postavljene uslove može biti predstavljena kao suma dve komponente:

$$F(s) = T(s) + \sum_{j=1}^N \lambda_j R(s, s_j), \quad (3-44)$$

gde je  $T(s)$  trend funkcija, a  $R(s,s_j)$  bazna funkcija čija forma zavisi od izbora  $I(F)$ .

Trend se može napisati kao:

$$T(s) = \sum_{k=1}^M a_k f_k(s), \quad (3-45)$$

gde je  $\{f_k(s)\}$  skup linaerno nezavisnih funkcija (monomi).

Koeficijenti  $\lambda_j$  i  $a_k$  se određuju na osnovu vrednosti u referentnim tačkama na lokacijama  $s_j$  i uz korišćenje postavljenih uslova, rešavanjem sistema linearnih jednačina (Mitasova 1993):

$$z(s_j) = z_j, \quad j=1,2,\dots,N \quad (3-46)$$

$$\sum_{j=1}^N \lambda_j f_k(s_j) = 0, \quad k=1,2,\dots,M \quad (3-47)$$

U gornjim jednačinama uslov minimizacije sume odstupanja interpolacione funkcije od referentnih tačaka je zamenjen uslovom da interpolaciona funkcija prolazi kroz referentne tačke.

Različiti pristupi kod izbora funkcije  $I(F)$  (preko izbora koeficijenata  $B_{\alpha}$ ), tj. funkcije  $R(s,s_j)$  rezultirali su pojavom više metoda sa varijacionim pristupom (za funkcije dveju varijabli, tj.  $d=2$ ) od kojih su najpoznatije:

- splajn tankim pločama – TPS;
- splajn sa tenzijom;
- regularizovani splajn (regularizovani splajn tankim pločama);



- regularizovani splajn sa tenzijom - RST (ili kompletno regularizovani splajn sa tenzijom – CRS);
- metod minimalne krivine – MINQ sa numeričkim rešenjem po metodi konačnih razlika.

Kod svih ovih metoda funkcija  $R(s, s_j)$  je u stvari funkcija rastojanja  $r_j$ ,  $j$ -te referentne tačke (tačke sa poznatom vrednošću funkcije) od tačke u kojoj se računa vrednost pa je onda:

$$R(s, s_j) = R(|s - s_j|) = R(r_j) \quad (3-48)$$

Zato se ove metode još nazivaju i metode sa **radijalnim baznim funkcijama** (engl. *Radial Basis Functions*). Metode sa varijacionim pristupom su formalno ekvivalentne krigingu (kolokaciji), pri čemu je izbor kovarijacione funkcije određen izborom funkcije  $I(F)$  (Mitas 1999, Hardy1984).

**Metod minimalne krivine** – MINQ se u suštini zasniva na interpolaciji primenom splajna tankih ploča. Specifičnost ove metode je u tome što se numeričko rešenje zasniva na metodi konačnih razlika. Ovde će posebno biti obrađene samo splajn metode.

**Splajn tankim pločama** (engl. *TPS – Thin Plate Spline*) za formalizaciju uslova glatkosti koristi funkciju dve varijable u kojima figurišu kvadrati drugih izvoda:

$$I(F) = \int [F_{xx}^2 + F_{yy}^2 + 2F_{xy}^2] ds, \quad (3-49)$$

na osnovu čega se dobija da je:

$$R(s, s_j) = R(|s - s_j|) = R(r_j) = r_j^2 \log r_j \quad (3-50)$$

TPS funkcija minimizira glatkost površi (minimizira ukupnu zakrivljenost površi) i imitira čeličnu ploču koja je prisiljena da prođe kroz date tačke. Površ je glatka (kontinualna i diferencijabilna), uključujući tu i kontinualnost prvih izvoda. Ovakav pristup ima dva ozbiljna nedostatka kod primene:

- krutost ploče prouzrokuje lokalne ekstremume sa prevelikim ili premalim vrednostima funkcije u područjima gde se na osnovu ulaznih podataka dobijaju veliki gradijenti, i
- izvodi drugog reda divergiraju u referentnim tačkama, što dovodi do poteškoća kod analize geometrije površi.

Funkcional koji se takođe često koristi kod metoda kojima se vrši minimalizacija ograničene energije površi je takozvani funkcional **elastične membrane**:

$$I(F) = \int [F_x^2 + F_y^2] ds \quad (3-51)$$

Da bi se prvi problem (problem lokalnih ekstremuma) kod TPS-a eliminisao u  $I(F)$  se mogu dodati prvi izvodi iz funkcionala za elastičnu membranu:

$$I(F) = \int \left\{ \phi^2 [F_x^2 + F_y^2] + [F_{xx}^2 + F_{yy}^2 + 2F_{xy}^2] \right\} ds \quad (3-52)$$

čime se krutost ploče smanjuje. Ova metoda interpolacije se naziva **splajn sa tenzijom**

Na ovaj način se karakter interpolovane površi može menjati pogodnim izborom parametra tenzije  $\phi$ . Ovim parametrom se praktično postiže modeliranje terena koje odgovara korišćenju tankih ploča ( $\phi=0$ ), elastične membrane ( $\phi=\infty$ ), ili nešto između. Za  $\phi=0$  dobija se površ koja po svojim karakteristikama, uključujući tu i nedostatke, odgovara TPS interpolaciji. U varijanti kada  $\phi$  ima dovoljno veliku vrednost, dobija se površ koja je glatka, ali prvi izvodi površi su kontinualni, ali ne i glatki. Ovaj parametar se u praksi određuje empirijski, iskustveno ili primenom krosvalidacije (validacije).

Interpolacija splajna sa tenzijom koja je implementirana u okviru ArcGIS softvera firme ESRI (w33), tj. odgovarajućih ekstenzija ovog softvera zasniva se na formulama (ESRI 2004):

$$T(s) = T(x, y) = a_1 \quad (3-53)$$

$$R(r) = -\frac{1}{2\pi\phi^2} \left[ \ln\left(\frac{r\phi}{2}\right) + C_E + K_o(r\phi) \right], \quad (3-54)$$

gde je  $C_E$  Ojlerova konstanta ( $C_E=0.577215\dots$ ), a  $K_0$  modifikovana Bessel-ova funkcija.

Svojstva površi mogu biti dalje popravljena dodavanjem trećih izvoda u  $I(F)$ , čime se dobija interpolacija sa **regularizovanim splajnom** (tj. regularizovani splajn tankim pločama):

$$I(F) = \int \left\{ F_{xx}^2 + F_{yy}^2 + \dots \right\} + \tau^2 \left\{ F_{xxx}^2 + F_{yyy}^2 + \dots \right\} ds \quad (3-55)$$

Na ovaj način se dobija glatka površ sa glatkim izvodom prvog reda. Parametar  $\tau$  predstavlja težinu koja se dodeljuje članovima u  $I(F)$  koji predstavljaju treće izvode površi. Na taj način se, kroz minimizaciju, dobija površ koja je manje ili više glatka. Za veće vrednosti parametra, logično, dobija se glatkija površ.

Interpolacija korišćenjem regularizovanog splajna koja je implementirana u okviru *ArcGIS* softvera firme *ESRI* zasniva se na formulama (*ESRI 2004*):

$$T(s) = T(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y \quad (3-56)$$

$$R(r) = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{r^2}{4} \left[ \ln\left(\frac{r}{2\tau}\right) + C_E - 1 \right] + \tau^2 \left[ K_0\left(\frac{r}{\tau}\right) + C_E + \ln\left(\frac{r}{2\pi}\right) \right] \right\} \quad (3-57)$$

Svojstva površi se mogu popraviti i dodavanjem viših izvoda (čak do beskonačnosti) u  $I(F)$  koji se koristi kod splajna sa tenzijom:

$$I(F) = \sum_{mn} c_{mn}(\phi) \int [F_{x^n y^m}]^2 ds, \quad (3-58)$$

Na ovaj način se dobija **regularizovani splajn sa tenzijom - RST** ili, kako se još naziva u literaturi, **kompletno regularizovani splajn - CRS** (*Mitasova 1993, Mitas 1999*). Na ovaj način se dobija površ sa regularnim drugim, ali i izvodima višeg reda. Formule za CRS glase:

$$T(s) = T(x, y) = a_1 \quad (3-59)$$

$$R(r) = - \left\{ \ln \left[ \left( \frac{\phi \cdot r}{2} \right)^2 \right] + E_1 \left[ \left( \frac{\phi \cdot r}{2} \right)^2 \right] + C_E \right\}, \quad (3-60)$$

gde je  $\phi$ , kao i u prethodnim formulama parametar tenzije,  $C_E$  Ojlerova konstanta, a  $E_1$  eksponencijalna integralna funkcija. Ova metoda je implementirana u okviru *Geomedia Grid* modula GIS softvera *Geomedia* firme *Intergraph* (*Intergraph 2004*).

CRS metod interpolacije poseduje neke bitne karakteristike (*Mitasova 1993*)

- visoku tačnost u poređenju sa drugim metodama interpolacije;
- fleksibilnost u smislu prilagođavanja karakteristikama površi kroz izbor parametra tenzije;
- regularne izvode svih redova, sa jednostavnim proračunom;
- lokalno ponašanje (omogućava procesiranje podataka po segmentima).

U praktičnim primenama kod modeliranja površi terena, gde se po pravilu radi o velikim količinama ulaznih podataka, vrši se interpolacija po segmentima. Na taj način se izbegava rešavanje velikog sistema jednačina. Postupak se sastoji u tome da se površ interpolacije deli na mrežu pravougaonika. Određivanje splajn funkcije se izvodi za svaki pravougaonik posebno, s tim što se za proračun koriste svi podaci iz tog pravougaonika plus svi podaci iz susednih pravougaonika. Skup pravougaonika iz kojih se uzimaju podaci za određivanje splajn funkcije se može proširivati sve dok se ne dobije količina ulaznih podataka (tačaka) veća od specificirane. Optimalna veličina pravougaonika se dobija tako što se postavi uslov da količina podataka u pravougaoniku zajedno sa podacima iz svih susednih pravougaonika ne prelazi neku specificiranu vrednost. U softverskim aplikacijama segmentirano procesiranje podataka se obavlja automatski, s tim što korisnik može zadati neke od parametara procesiranja (minimalan broj tačaka za proračun splajn funkcije, veličinu pravougaonika, broj susednih pravougaonika koje svakako treba uzeti u obzir i sl.).



Implementacije metoda splajn interpolacije, kao i drugih metoda sa radijalnim baznim funkcijama, se obično mogu naći u standardnim GIS softverskim paketima kao što si *ArcGIS* firme *ESRI* i *Geomedia* firme *Intergraph*.

### 3.2.5 Multikvadratne funkcije

Geometrijska formulacija interpolacije primenom geostatističkih metoda se može predstaviti kao sumiranje onoliko površi koliko ima referentnih tačaka. Svaka površ je površ evolucije, centrirana na referentnoj tački i sa vertikalnom osom simetrije. Ona se dobija množenjem kovarijacione funkcije sa komponentom vektora  $\mathbf{K}^{-1}\mathbf{z}(s)$  (3-24) koji ima isti redni broj kao i referentna tačka i rotiranjem rezultujućeg grafa oko vertikalne osovine. Zato se za ovu metodu kaže da pripada grupaciji metoda sumacije površi. U opštem slučaju, kod ovih metoda za računanje matrice  $\mathbf{K}$  i vektora  $\mathbf{k}(s)$  ne mora biti korišćena kovarijaciona funkcija, već je dovoljno da to bude neka pogodna funkcija rastojanja (radijalna bazna funkcija). Za slučaj kada je ta funkcija oblika:

$$F(r) = R(r, r_j) = R(r) = (r^2 + C)^p, \quad (3-61)$$

pri čemu je  $p=1/2$  metoda se naziva multikvadratno-biharmonijska (engl. *multiquadratic-biharmonic*) (*Hardy 1984, Mitas 1999*). Za vrednost parametra  $p$  se može usvojiti i  $p=-1/2$ .

S obzirom da je  $r_j = (s - s_j)$ , dobija se da se površ terena predstavlja funkcijom:

$$z(s) = z(x, y) = \sum_{j=1}^N \lambda_j F(r_j) = \sum_{j=1}^N \lambda_j \left[ (x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 + C^2 \right]^p \quad (3-62)$$

Kao i kod geostatističkih metoda i metoda sa varijacionim pristupom, koeficijenti  $\lambda_j$  se određuju postavljanjem uslova da površ interpolacije prolazi kroz referentne tačke:

$$z(s_i) = z(x_i, y_i) = \sum_{j=1}^N \lambda_j F(r_j) = \sum_{j=1}^N \lambda_j \left[ (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + C^2 \right]^p, \quad (3-63)$$

čime se dobija linearni sistem od  $N$  jednačina sa  $N$  nepoznatih. Nakon određivanja koeficijenata  $\lambda_j$ , predikcija vrednosti  $z(s)$  na nekoj lokaciji izvodi se krajnje jednostavno po formuli (3-61).

Istraživanja i sprovedeni eksperimenti pokazali su da se primenom ove metode interpolacije postižu vrlo dobri rezultati (*Hardy 1984, Mitasova 1993*). Pri tome, za razliku od geostatističkih metoda (kriging i kolokacija) i varijacionih metoda sa splajn funkcijama, interpolacija sa korišćenjem multikvadratnih funkcija je daleko jednostavnija za implementaciju i korišćenje, a proračun je brži.

### 3.2.6 Modeliranje površi terena korišćenjem grid DMT-a

Kada je grid DMT formiran na osnovu proračuna visina u svim tačkama grida onda se lako mogu odrediti funkcije odnosno pravougaoni površinski elementi preko kojih se modelira površ terena unutar svakog elementa grida. Neke od najčešće korišćenih mogućnosti za to su:

- predstavljanje elementa grida preko dva prostorna trougla dobijena deljenjem elementa grida po dijagonali, ili preko četiri prostorna trougla dobijena ubacivanjem jedne tačke u centru elementa;
- predstavljanje svakog površinskog elementa grida preko jedne funkcije dve varijable u vidu polinoma, pri čemu se koeficijenti polinoma određuju uz uslov da funkcija interpolira tačke elementa grida (i eventualno susedne tačke u mreži);
- predstavljanje elementa grida preko bilinearnog površinskog elementa.

Nakon proračuna vrednosti u tačkama grida, može se relativno jednostavno izvršiti interpolacija vrednosti za bilo koju tačku koja pada unutar područja interpolacije. Prvo se određuje element grida u koji ta tačka pada, pa se zatim vrši proračun koeficijenata tog površinskog elementa. Tražena vrednost se dobija uvrštavanjem  $X, Y$  koordinata interpolovane tačke u dobijenu jednačinu površi.

Za bilinearni element to je krajnje jednostavno, jer se visina praktično računa po formuli (3-33.), sa prethodnom transformacijom apsolutnih koordinata  $X, Y$  u lokalni koordinatni sistem elementa grida  $x, y$ . Na ovaj način se obezbeđuje kontinualnost površi terena ( $C^0$  kontinualnost) ali ne i kontinualnost prvih izvoda površi terena ( $C^1$  kontinualnost).

Za bikubni element se to može uraditi na sledeći način. Jednačina (3-34) u matričnom obliku glasi:

$$z(x, y) = \begin{bmatrix} 1 & x & x^2 & x^3 \end{bmatrix} \mathbf{A} \begin{bmatrix} 1 & y & y^2 & y^3 \end{bmatrix}^T, \quad (3-64)$$

gde je element matrice  $\mathbf{A}$  u  $i+1$  vrsti i  $j+1$  koloni koeficijent bikubnog polinoma  $a_{ij}$ .

Diferenciranjem jednačine (3-43) dobijaju se formule za izvode  $z_x, z_y$  i  $z_{xy}$ . Ako se visina i izvodi za sva četiri temena elementa grida urede u jednu matricu  $\mathbf{Z}$ :

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{00} & \mathbf{Z}_{10} \\ \mathbf{Z}_{01} & \mathbf{Z}_{11} \end{bmatrix}, \quad \text{gde je } \mathbf{Z}_{ij} = \begin{bmatrix} z & z_x \\ z_y & z_{xy} \end{bmatrix} \quad (3-65)$$

i prelaskom na lokalni koordinatni sistem elementa grida, onda se matrica  $\mathbf{Z}$  može napisati u matričnom obliku kao:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{XAY}^T, \quad (3-66)$$

gde je

$$\mathbf{X} = \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 3 \end{bmatrix}. \quad (3-67)$$

Koeficijenti  $a_{ij}$  se nakon toga mogu sračunati po formuli:

$$\mathbf{A} = \mathbf{X}^{-1} \mathbf{Z} (\mathbf{Y}^{-1})^T \quad (3-68)$$

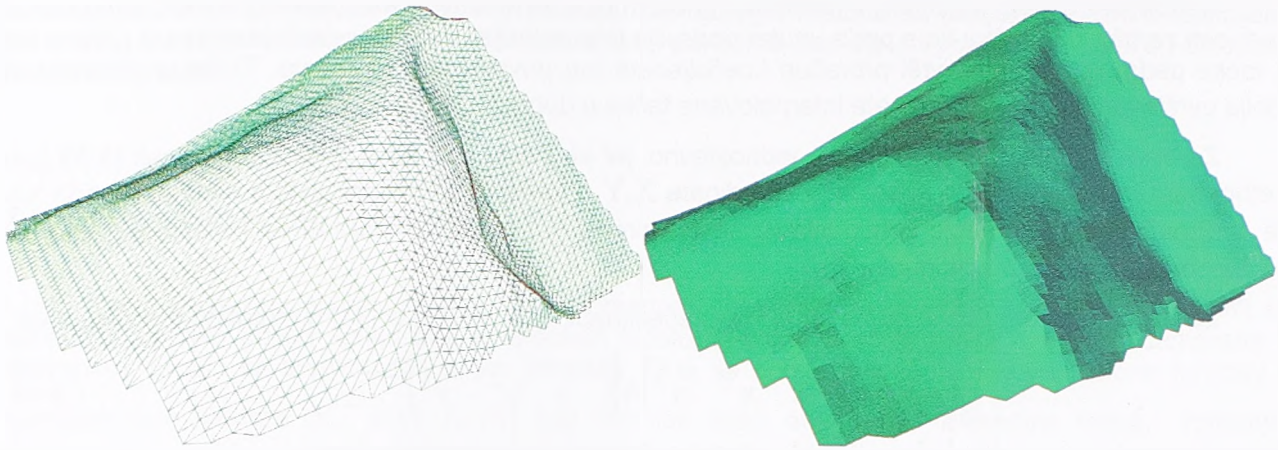
gde je

$$\mathbf{X}^{-1} = \mathbf{Y}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -3 & -2 & 3 & -1 \\ 2 & 1 & -2 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3-69)$$

Pored opisanog bilinearnog i bikubnog polinoma koriste se i drugi kao što su bikubni polinom sa 12 koeficijenata, bikvadratni polinom sa 8 koeficijenata i drugi.

Za interpolaciju površi preko mreže pravilnih pravougaonih elemenata mogu se koristiti i postupci koji su razvijeni za potrebe kompjuterski podržanog geometrijskog modeliranja – CAGD. Ovi postupci uključuju i metode splajnovanja sa Bézierovim, B-splajn i NURBS tenzor produkt površima. Bézier-ove krive i površi su detaljno obrađene u poglavlju 3.3.2.3 i dodatku A, gde je razmatrana njihova primena za modeliranje površi terena formiranjem TIN-a i proračunom trougaonih površinskih zakrpa. Korišćenje Bézier-ovih površi, i njihovih generalizacija, B-splajn i NURBS površi je inače jednostavnije kada se radi sa pravouglim elementima nego sa trougaonim elementima. Gore opisano modeliranje korišćenjem bilinearnih pravouglinih elemenata u stvari predstavlja primenu tenzor produkt B-splajn površi stepena 1. Slično tome, i bikubni element pripada porodici tenzor produkt površi. Ovi postupci se neće u okviru ovog rada posebno obrađivati.





Slika 3.12 : Perspektivni pogled grid DMT-a (žičani model - levo, solid model - desno), gde se modeliranje površi terena vrši razbijanjem elementa grida na dva trougla

### 3.3 Formiranje TIN DMT-a

Formiranje DMT-a na bazi TIN-a se sastoji od:

- formiranja TIN-a, i
- modeliranja površi terena na osnovu TIN-a.

Prva faza se sastoji u tome da se na osnovu ulaznih podataka formira odgovarajuća triangulacija. Podrazumeva se da se radi o nepreklapajućim trouglovima. Pored toga, sve tačke iz ulaznog seta podataka treba da budu zastupljene u triangulaciji u vidu temena trouglova TIN-a, sve linije iz ulaznog seta treba da budu zastupljene u vidu stranica trouglova TIN-a, a svi površinski entiteti iz ulaznog seta podataka treba u triangulaciji da budu predstavljeni preko skupa trouglova TIN-a. Triangulacija ulaznog seta podataka predstavlja potpunu podelu područja koje pokrivaju ulazni podaci, bez praznina, sem ukoliko ove praznine nisu posebno zadate.

Na osnovu formiranog TIN-a vrši se modeliranje površi terena. U najprostijem slučaju sam TIN, tj. povezane facete TIN-a (prostorni trouglovi TIN-a) predstavljaju dobru aproksimaciju površi terena. Površ terena je predstavljena poliedarskom površi čija temena čine referentne (date) tačke iz ulaznog skupa tačaka. Strukturne i prelomne linije terena koje su obično sadržane u ulaznom setu podataka obezbeđuju da trougaone facete TIN-a relativno dobro aproksimiraju površ terena.

U cilju kvalitetnije aproksimacije površi terena može se površ terena predstaviti trougaonim površinskim zakrpama. Ove zakrpe obično prolaze kroz date tačke (sem u slučajevima kad se vrši filtriranje grešaka iz podataka merenja), međusobno su povezane u kontinuitetu ( $C^0$  kontinualnost površi terena), a nekad je obezbeđena i glatkost prelaza modelirane površi preko stranica TIN-a, tj. kontinualnost prvih izvoda površi ( $C^1$ ,  $G^1$  kontinualnost površi terena). Da bi se sračunale površinske zakrpe neophodni su, pored poznatih vrednosti visina u čvorovima TIN-a, i dodatni uslovi koje površ terena treba da zadovolji. Najčešće se ti uslovi odnose na vrednosti normala na površ terena u čvorovima TIN-a, i uslovi kojima se zahteva minimalizacija zakrivljenosti površi terena. Neki od uslova mogu biti rezultat merenja (horizontalna tangentna ravan na površ terena u tački koja je lokalni ekstremum), ali se oni mnogo češće određuju iz podataka merenja posredno.

Ove dve faze kod formiranja TIN-a se mogu preplitati. Na primer, inicijalna triangulacija ulaznog seta podataka može da posluži kao osnov za proračun normala u čvorovima mreže na osnovu susednih čvorova u mreži. Na osnovu dobijenih normala mogu se sračunati trougaone površinske zakrpe. Ovako dobijene površinske zakrpe mogu poslužiti za dodatno prekorogovanje TIN-a, a u cilju vernije aproksimacije modelirane površi trougaonim facetama.

### 3.3.1 Formiranje TIN-a

Problem formiranja TIN-a nije trivijalan i on je već nekoliko decenija predmet istraživanja. Kvalitetan algoritam za formiranje TIN-a treba da ispuni sledeće zahteve:

- efikasnost, tj. veliku brzinu procesiranja i racionalno korišćenje računarskih resursa;
- robustnost s obzirom na moguće nepravilnosti i specijalne slučajeve u pogledu rasporeda ulaznih podataka (bliske tačke, tačka na liniji, presek linija, kolinearne tačke, itd.);
- prihvatanje podataka u formi tačaka, linija i površina;
- prilagodljivost i podrška za različite informacije o površi terena (prelomne linije, izohipse, atributi prostornih entiteta, i slično);
- formiranje triangulacije koja na najbolji mogući način aproksimira površ terena i istovremeno zadovoljava druge postavljene uslove (Delaunay-jev kriterijum);

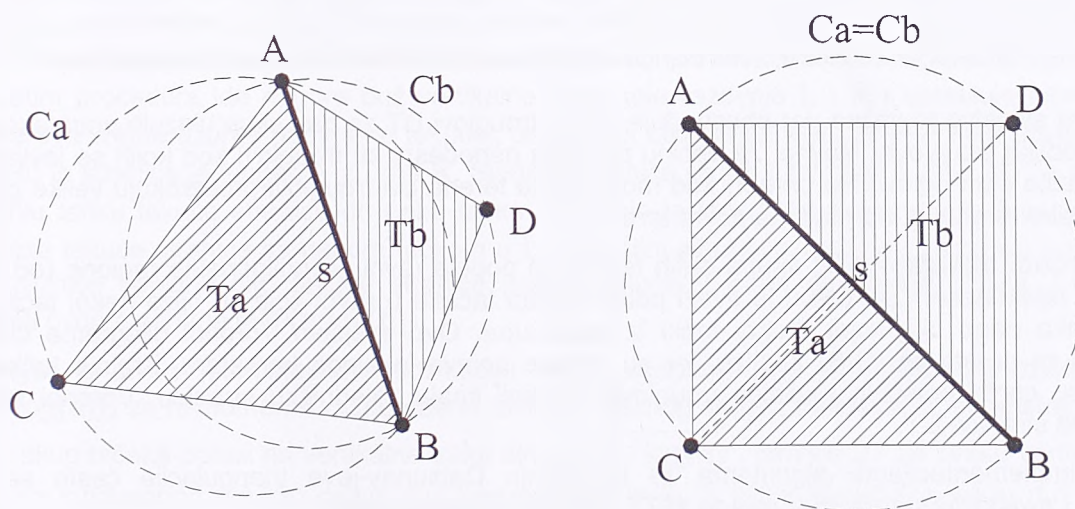
Kao što je to već rečeno u poglavlju 3.1.2 triangulacija skupa tačaka  $V$  je skup trouglova  $T$  čija temena čine skup  $V$ , čije unutrašnjosti se međusobno ne seku i čija unija kompletno pokriva konveksno telo (engl. *convex hull*) skupa  $V$ .

U praksi se najčešće implementiraju algoritmi koji formiraju **Delaunay-jevu triangulaciju (DT)** u ravni. Osnovni kriterijum za formiranje DT glasi:

- trougao je Delaunay-jev ako i samo ako kružnica opisana oko njega (kružnica koja prolazi kroz temena trougla) ne sadrži druge tačke triangulacije (tačke na kružnici su dozvoljene); Delaunay-jeva triangulacija je ona triangulacija kod koje su svi trouglovi Delaunay-jevi.

Drugim rečima, Delaunay-jeve triangulacija skupa tačaka je triangulacija kod koje nijedna tačka iz skupa tačaka ne pada u unutrašnjost opisane kružnice oko bilo kog trougla triangulacije.

Ovde se daju neka od pravila i svojstava Delaunay-jeve triangulacije, bez matematičkog formalizma i dokazivanja. Pravila data u formi lema i teorema sa dokazima mogu se naći drugde u literaturi (*Shewchuk 1997, Su 1997*). Stranica triangulacije je Delaunay-jeva ako i samo ako postoji kružnica koja prolazi kroz krajnje tačke stranice i ne sadrži nijednu drugu tačku triangulacije. Za stranicu triangulacije kažemo da je lokalno Delaunay-jeva ako postoji opisana kružnica oko te stranice koja ne sadrži temena trouglova formiranih nad tom stranicom.



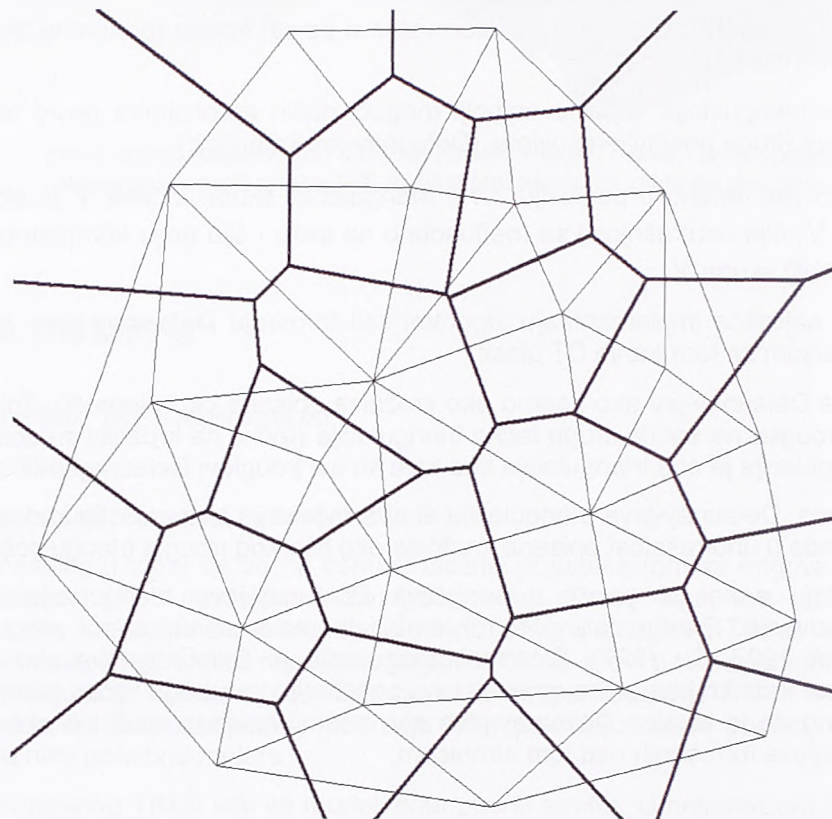
Slika 3.13: Kriterijum Delaunay-jeve triangulacije (lokalni Delaunay-jevi trouglovi i stranice)

Ako su sve stranice triangulacije lokalno Delaunay-jeve stranice, onda su te stranice i globalno Delaunay-jeve, pa je i sama triangulacija Delaunay-jeva.



Može se dokazati da ako su sve stranice triangulacije Delaunay-jeve, onda su i svi trouglovi triangulacije Delaunay-jevi, i obrnuto. DT poseduje neka vrlo bitna svojstva od kojih su najvažnija (Shewchuk 1997):

- DT maksimizira minimalni ugao u triangulaciji;
- DT minimizira najveću opisanu kružnicu oko trougla mreže;
- DT predstavlja geometrijski dual Voronoi dijagramu (Dirichlet teselaciji) skupa tačaka;
- DT za zadati set podataka je jedinstvena, sem u specijalnim slučajevima kada bar četiri tačke iz ulznog skupa leže na jednoj kružnici (primer desno, Slika 3.13).



Slika 3.14: Delaunay-jeva triangulacija (tanke linije) i Voronoi dijagram (debele linije)

Prvo svojstvo je važno, jer obezbeđuje da su trouglovi DT za dati skup ulaznih podataka optimalni u smislu oblika trouglova. Naime, za većinu primena nepodesni su trouglovi kod kojih se javljaju izrazito tupi ili izrazito oštri uglovi. Na primer, kod modeliranja terena ovi trouglovi prouzrokuju velike greške kod ocene nagiba terena, tj. normala na površ terena.

**Voronoi dijagram (VD)** skupa datih tačaka je podela ravni na poligonalne regione (od kojih neki mogu biti beskonačni), pri čemu je svaki poligon skup tačaka u ravni koje su bliže nekoj tački iz skupa datih tačaka nego bilo kojoj drugoj tački iz tog skupa. Ovo svojstvo Voronoi dijagrama čini ga vrlo podesnim za prostorne (GIS) analize, jer su mnoge pojave lokalnog karaktera. Krajnje tačke Voronoi stranica su centri opisanih kružnica trouglova DT koji imaju zajedničku stranicu. Voronoi stranice su upravne na stranice DT.

U implementacijama algoritama za formiranje Delaunay-jeve triangulacije često se koristi i takozvani Lawson-ov kriterijum (Lawson 1977, Sibson 1978) koji glasi:

*"Ako dva trougla u triangulaciji imaju zajedničku stranicu, onda oni definišu četvorougao sa tom zajedničkom stranicom kao dijagonalom. Ako je taj četvorougao striktno konveksan, onda zamena posmatrane dijagonale sa alternativnom ne sme povećati minimalni od šest mogućih uglova trouglova koji čine četvorougao. Ovo mora da važi za sve moguće konveksne četvorouglove u triangulaciji."*

Praktičan značaj prethodnog kriterijuma je da se njegovom primenom, ili primenom kriterijuma opisane kružnice (Slika 3.13) nad svim konveksnim četvorougaoima u nekoj triangulaciji, i **zamenom dijagonala** (engl. *edge flipping*) ako kriterijum nije zadovoljen, može, nakon konačnog broja testiranja i izmena, postići Delaunay-jevu triangulaciju.

### 3.3.1.1 Algoritmi za konstruisanje Delaunay-jeve triangulacije

Svojstva i vrlo dobra matematička utemeljenost Delaunay-jeve triangulacije doveli su do toga da je ova triangulacija daleko najzastupljenija u primenama, a da su algoritmi za njeno formiranje bili predmet brojnih ispitivanja i usavršavanja (Lee 1980, Bowyer 1981, Guibas 1985, Dwyer 1987, Fortune 1987, Tang 1991, Su 1995, Shewchuk 1996, Shewchuk 1997, Su 1997, Ruiz 2000).

Postojeći algoritmi se mogu podeliti u nekoliko osnovnih grupa:

- algoritmi tipa “podeli i osvoji” (engl. *divide-and-conquer*);
- algoritmi sa linijom čišćenja (engl. *sweep*);
- inkrementalni algoritmi sa insertovanjem tačaka (engl. *incremental insertion*).

Pored ovih algoritama postoje i neki drugi algoritmi. Neki od tih algoritama prvo formiraju Voronoi dijagram, pa onda na osnovu njega formiraju DT. Neki od tih algoritama su generalizovani za formiranje triangulacije u više dimenzija. Ovi algoritmi, kada je reč o Delaunay-jevoj triangulaciji u ravni, ne mogu da konkurišu po brzini rada ostalim algoritmima, pa ovde neće biti posebno razmatrani. Postoje i algoritmi kod kojih se formiranje DT vrši korišćenjem rasterskih operacija (Tang 1991), ali ni ovi algoritmi ovde neće biti posebno razmatrani.

U okviru ovog rada date su samo konceptualne postavke najpoznatijih algoritama. Detalji vezani za implementaciju ovih algoritama, rezultate uporednih testova i ostalo mogu se naći u literaturi (Su 1997, Shewchuk 1997).

Algoritmi tipa “**podeli i osvoji**” se zasnivaju na ideji da se ulazni skup podataka deli na manje celine i da se ceo problem svede na rekurzivno rešavanje, tj. formiranje DT za te manje celina (Lee 1980, Guibas 1985, Dwyer 1987, Shewchuk 1996, Shewchuk 1997, Su 1995, Su 1997). Dobijene triangulacije se zatim povezuju u veće celine. Ovaj algoritam su prvobitno razvili Lee i Schachter (Lee 1980). Guibas i Stolfi su predložili odgovarajuću strukturu podataka (quad-edge, poglavlje 3.1.2), osnovne algoritamske primitive koje se pri tome koriste i pseudo-kod za predstavljanje samog algoritma (Guibas 1985).

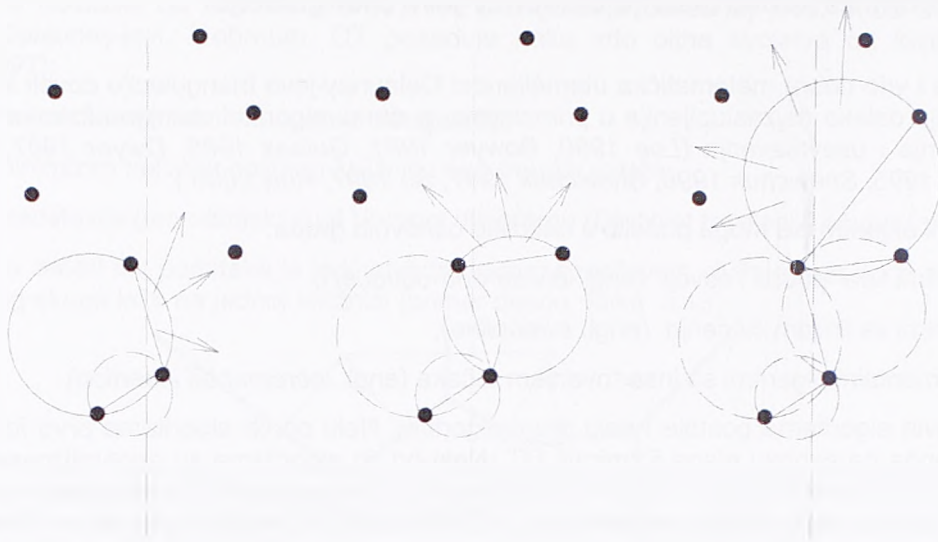
Algoritam započinje tako što se tačke sortiraju prema x koordinati i dele sve dok se ne dobiju tri ili manje tačaka u svakom regionu. Za ove prvobitne regione DT može biti tačka, stranica ili jedan trougao. Nakon toga započinje sukcesivno povezivanje regiona u veće celine. Zato je i najosetljiviji deo algoritama tipa “podeli i osvoji” upravo povezivanje manjih celina sa formiranom DT u veće celine.

Procedura za povezivanje dveju celina L i R sa formiranom DT mora obaviti dva zadatka. Prvo, mora obrisati sve stranice i u L i u R koje nisu validne Delaunay-jeve stranice. Drugo, mora formirati skup novih stranica koje povezuju L i R. Procedura započinje u donjem delu konveksnog tela dobijenog unijom L i R. Zatim procedura ide nagore duž vertikalne linije koja razdvaja L i R i detektuje nove stranice. Procedura sve vreme ažurira podatak o tekućoj, poslednjoj otkrivenoj novoj stranici koja povezuje L i R. Na početku ta stranica je tangenta iz L na R. Sledeća stranica će biti formirana ili tako što će se povezati levu krajnju tačku tekuće stranice do neke tačke u R koja je iznad tekuće stranice, ili će se povezati desna tačka tekuće stranice sa nekom tačkom u L. U suštini algoritam traži novu stranicu proširivanjem prazne kružnice opisane oko tekuće stranice prema poluravni iznad te stranice (Slika 3.15). Brzina izvršavanja ovog algoritma je  $O(n \cdot \log(n))$ .

Dwyer je uveo jednostavnu modifikaciju ovog algoritma koja je obezbedila izvršavanje za  $O(n \cdot \log(\log(n)))$  za ravnomerno raspoređene tačke iz ulaznog skupa. Modifikacija se sastoji u tome da se ulazni skup tačaka podeli na vertikalne trake širine  $\sqrt{n / \log(n)}$ , formira DT za svaku vertikalnu traku tako što se međusobno povežu delovi duž horizontalnih linija, a zatim konačno povežu duž vertikalnih linija sve trake u konačnu triangulaciju. Rezultati dobijeni u praksi pokazali su da je brzina rada algoritma praktično linearno zavisna od broja tačaka, naravno za ravnomerno raspoređene tačke u ulaznom skupu (Su 1995).

Shewchuk (w30) je umesto *quad-edge* strukture algoritam implementirao koristeći strukturu trouglova, tako da je i tu značajno ubzao rad algoritma (Shewchuk 1996, Shewchuk 1997). Navodi se da je to ubrzanje čak 50%, s tim što je programski kod dvostruko duži.





Slika 3.15 : Procedura otkrivanja novih Delaunay-jevih stranica koje povezuju levu i desnu celinu (Su 1997)

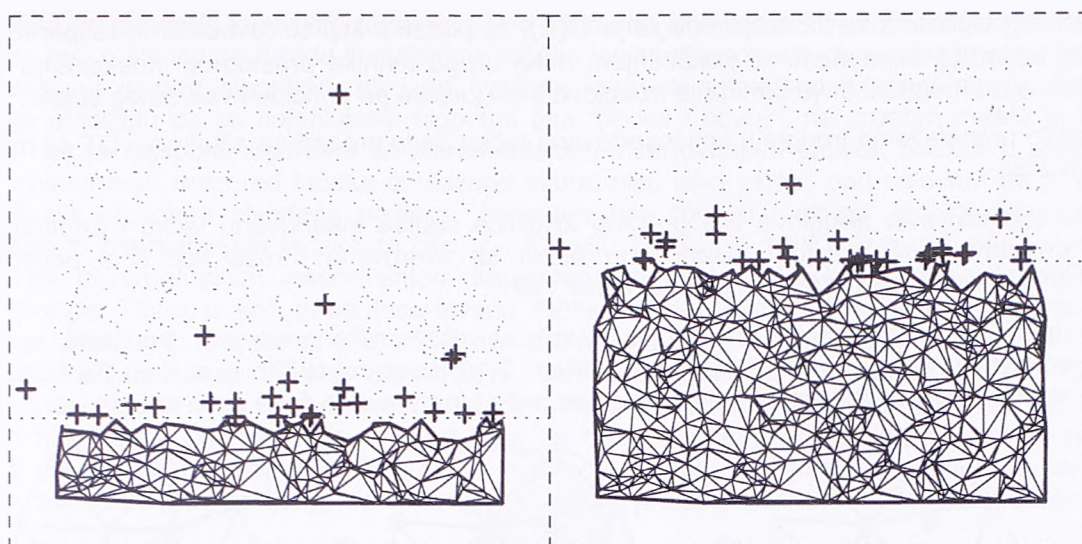
**Algoritam sa linijom čišćenja** se zasniva na tome da se DT formira korišćenjem fronta koji razdvaja celinu (skup ulaznih podataka) za koju je formirana DT, od preostalih podataka. Fortune je koncipirao takozvani *sweep line* (engl. *sweep line* - linija čišćenja) algoritam (Fortune 1987, Su 1995, Su 1997). Triangulacija se postepeno formira pomeranjem linije čišćenja odozdo na gore (Slika 3.16). Algoritam vodi računa o stanju dva skupa podataka. Prvi skup podataka se odnosi na listu stranica triangulacije koji predstavljaju granicu (engl. *frontier*) dijagrama. Ove stranice predstavljaju podskup DT i razdvajaju spoljašnost od nekompletne triangulacije. Drugi skup podataka je niz događaja koji se sastoji iz događaja sa tačkama (engl. *site event*) i događaja sa kružnicom (engl. *circle event*). Ovi događaji se čuvaju u formi reda (engl. *queue*) koji se još naziva i red prioriteta.

Događaj sa tačkom se dešava kada linija čišćenja stigne do tačke iz ulaznog seta podataka. Događaj sa kružnicom se dešava kad linija čišćenja stigne do vrha kruga formiranog na osnovu tri susedna čvora na granici. Svi događaji su poređani po rastućoj vrednosti  $y$  koordinate, tako da je svaki sledeći događaj u nizu onaj sa minimalnom  $y$  koordinatom. Algoritam radi tako što pomera liniju čišćenja odozdo nagore, pomerajući liniju čišćenja na  $y$  koordinatu koja odgovara prvom sledećem događaju i obrađujući taj događaj. U suštini, ovaj algoritam konstruiše korektne Delaunay-jeve stranice mreže, jednu po jednu.

Kod svakog događaja sa tačkom  $t$  (linija čišćenja prolazi kroz tačku  $t$ ) algoritam traži valjanu Delaunay-jevu stranicu  $s$  koja povezuje tu tačku  $t$  i neku tačku na granici. To se radi tako što se pronalazi tačka  $a$  na granici takva da kružnica konstruisana kroz tu tačku  $t$  i novu tačku događaja, a koja tangira liniju čišćenja ne sadrži druge tačke. Pronađena stranica se ubacuje u DT i u samu granicu. Istovremeno se ažurira niz događaja sa dodavanjem novih događaja sa kružnicom i brisanjem nekorektnih događaja sa kružnicom. Naime, dodavanjem stranice na granicu mogu se generisati novi, ali i izgubiti postojeći događaji sa kružnicama.

Kod svakog događaja sa kružnicom koja prolazi kroz tri sukcesivne tačke  $a$ ,  $b$  i  $c$  na granici brišu se stranice  $(a,b)$  i  $(b,c)$  sa granice, a dodaje stranica  $(a,c)$  u DT i na granicu. Nakon toga se vrši ažuriranje niza događaja sa kružnicama na isti način kao i kod obrade događaja sa tačkama.

Struktura podataka koja se koristi za rukovanje granicom je prosta uvezana lista stranica. Efikasno pretraživanje tačaka je podržano sortiranjem tačaka po  $x$  koordinati, korišćenjem *hash* funkcija i grupisanjem (engl. *bucketing*). Grupisanje, ali korišćenjem sortiranja po  $y$  koordinati, se radi i za događaje iz reda prioriteta. Događaji se raspoređuju u neku od grupa koje su ravnomerno raspoređene duž  $y$  ose. S obzirom da je usko grlo kod ovog algoritma upravo održavanje reda prioriteta, Su je pokušao da primeni *heap* strukturu da bi se povećala efikasnost izvršavanja algoritma (Su 1997), ali eksperimenti su pokazali da se na ovaj način u praktičnim primenama ne postiže nikakvo poboljšanje. Očekivano vreme izvršavanja ovog algoritma je  $O(n \cdot \log(n))$  (Fortune 1987, Su 1997).



Slika 3.16 : Prikaz formiranja DT kod sweepline algoritma, događaji sa kružnicama su označeni sa '+', a linija čišćenja je prikazana isprekidanom linijom (Su 1995)

**Inkrementalni algoritmi sa insertovanjem tačaka** su najjednostavniji algoritmi za implementaciju. Zasnivaju se na ideji da se inicijalno formira početna triangulacija od jednog ili dva trougla. Najčešće su to trouglovi koji sadrže sve tačke iz ulaznog skupa tačaka. Temena ovih trouglova su tačke koje ne pripadaju skupu ulaznih tačaka, već su to tačke koje algoritam sam uvodi u triangulaciju. Pri tome se mora voditi računa da te tačke budu tako izabrane da se obezbedi formiranje korektnih Delaunay-jevih trouglova na konveksnom granici ulaznog skupa tačaka. Nakon toga se sukcesivno u triangulaciju dodaje jedna po jedna tačka iz ulaznog skupa tačaka, vodeći računa da se nakon insertovanja tačke u triangulaciju dobije korektna DT. Na kraju se iz triangulacije brišu sve tačke koje je algoritam sam uveo u triangulaciju i svi trouglovi koji se oslanjaju na ove tačke.

Implementacija algoritma sa inkrementalnim insertovanjem tačaka se praktično svodi na realizaciju dve važne procedure. Prva je lociranje trougla u koji tačka pada, a druga je lokalno prekorogovanje mreže da bi se postigla Delaunay-jeva triangulacija.

Lociranje trougla triangulacije u koji tačka koja se insertuje pada je ujedno i najkritičniji deo kod ovog algoritma kada je u pitanju njegova brzina izvršavanja. Zato implementaciji ove procedure treba posebno posvetiti pažnju. Mogu se primeniti dva pristupa:

- za svaku tačku iz ulaznog skupa (koja nije insertovana u triangulaciju) se vodi informacija u koji trougao DT pada;
- na pogodan način se bira jedan od trouglova triangulacije i polazeći od njega pravolinijski, koristeći topologiju i geometriju mreže, ide se ka lokaciji tačke koja se insertuje i traženom trouglu.

Prvi pristup se implementira tako što se na početku triangulacije, kada se formiraju jedan ili dva inicijalna trougla, sve tačke iz ulaznog seta dodele ovim trouglovima s obzirom na to u koji trougao padaju. Sa svakim insertovanjem tačke i brisanjem/izmenom trouglova mreže, sve neinsertovane tačke se iz ovih trouglova preraspoređuju na nove trouglove s obzirom na izmenjeno stanje mreže. Dominantan trošak kod ovog algoritma je upravo ova preraspodela tačaka. Očekivano vreme ovog algoritma je  $O(n \cdot \log(n))$  (Shewchuk 1997).

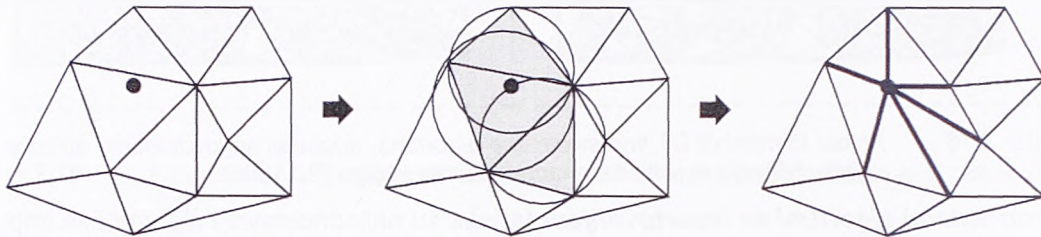
Kod drugog pristupa, ključni momenat za efikasnost lociranja trougla u koji tačka koja se insertuje pada je izbor početnog trougla od koga započinje hod kroz formiranu mrežu do traženog trougla. Najjednostavniji, ali i najmanje efikasan način je da izbor početnog trougla bude slučajan. Druga varijanta je da se elementi mreže prostorno indeksiraju, pa da se onda na osnovu tih informacija pronađe trougao koji je relativno blizu traženog trougla. Najjednostavniji način je da se izvrši podela područja koje se triangulira na uniformni grid (Su 1997). Za svaku tačku koja se ubaci u triangulaciju se vrši proračun u koji element grida pada. Za svaki element grida se vodi podatak koja je tačka poslednja upala u njega. Nije potrebno voditi listu svih tačaka koje su upale u element grida. Kada se nova tačka ubacuje u triangulaciju prvo se proverava u koji element grida pada. Ako u tom elementu ima neka tačka, onda se za početni trougao bira bilo koji trougao mreže kome ta tačka pripada. U protivnom vrši se spiralno pretraživanje susednih elemenata grida. Pretraživanje se prekida ukoliko se dostigne specificirani limit za broj testiranih elemenata grida. U tom slučaju se polazi od bilo kog trougla mreže. Očekivano vreme



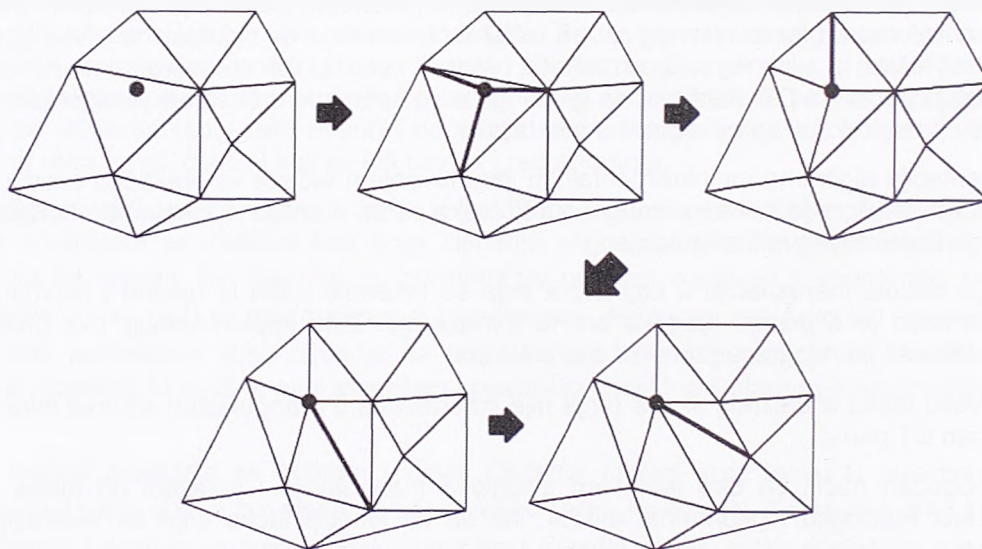
izvršenja ovog algoritma za lociranje trougla je  $O(n)$ , za podatke koji su ravnomerno raspoređeni. Slična procedura se može implementirati korišćenjem neke druge tehnike prostornog indeksiranja elemenata mreže. Jedna od mogućnosti je sortiranje trouglova triangulacije po principu kvadratnog stabla.

Nakon pronalazaženja trougla u koji insertovana tačka pada procedura ažuriranja DT se može obaviti na dva načina:

- brisanjem svih trouglova čije opisane kružnice sadrže insertovanu tačku i formiranjem novih trouglova povezivanjem insertovane tačke sa čvorovima mreže koji čine poliedar nastao brisanjem trouglova (Slika 3.17)(Bowyer 1981);
- razbijanjem trougla na tri trougla i sukcesivnim prekorigovanjem trouglova u susedstvu primenom Lawson-ovog kriterijuma (Slika 3.18)(Lawson 1977); u slučaju da tačka pada na stranicu postojećeg trougla, ta stranica se briše i formiraju se četiri nova trougla.



Slika 3.17: Insertovanje tačke sa brisanjem trouglova i triangulacijom poligona (Shewchuk 1997)



Slika 3.18: Insertovanje tačke korišćenjem Lawson-ovog kriterijuma (Shewchuk 1997)

Drugi način je nešto jednostavniji za implementaciju, između ostalog i zato što se zasniva na primitivama i strukturi podataka koje se inače koriste za druge procedure. Dodatna prednost je to što su numerički problemi usled grešaka zaokruživanja ređi nego kod prvog načina.

Za izrazito nepovoljan redosled insertovanja tačaka u triangulaciju i neravnomeran raspored tih tačaka, može se desiti da vreme izvršavanja algoritma u najgorem slučaju bude  $O(n^2)$ . Do ovog vremena se dolazi tako što sama operacija lociranja trougla iznosi  $O(n)$ , a operacija insertovanja neke tačke, u najgorem slučaju može prouzrokovati  $O(n)$  testova i zamena dijagonala u četvorouglovima. Istraživanja su pokazala da se ovi problemi uspešno rešavaju insertovanjem tačaka po slučajnom redosledu (Shewchuk 1997, Su 1995).

Za vrednovanje algoritama za formiranje TIN-a ključni su sledeći kriterijumi:

- brzina izvršavanja;
- robustnost;
- prikladnost za konkretnu primenu.

**Brzina izvršavanja** je sasvim razumljivo vrlo bitna kod formiranja TIN-a. S obzirom da se u nekim primenama radi o stotinama hiljada ili milionima tačaka logična je potreba za efikasnim algoritmima. Ova brzina zavisi od samog algoritma, ali i od kvaliteta njegove softverske implementacije. Sprovedena istraživanja pokazuju da su najefikasniji algoritmi tipa "podeli i osvoji", na drugom mestu je *sweep* algoritam, dok je najsporiji algoritam sa inkrementalnim insertovanjem tačaka. Razlike u efikasnosti za relativno ravnomeran raspored tačaka iz ulaznog skupa nisu tako velike, pod uslovom da je softverska implementacija algoritma izvedena pažljivo. Algoritam tipa "podeli i osvoji" je brži od algoritma sa inkrementalnim insertovanjem tačaka za oko 10-15% (Su 1995, Su 1997). Ovo važi pod uslovom da je algoritam sa inkrementalnim insertovanjem implementiran uz korišćenje naprednih tehnika za brzo lociranje trougla TIN-a u koji pada insertovana tačka. Primer takve tehnike je korišćenje grida za indeksiranje formiranih trouglova (Su 1997). U protivnom, ove razlike mogu biti mnogo značajnije (Shewchuk 1997). Brzina izvršavanja algoritma je direktno zavisna i od toga gde se čuvaju podaci tokom izvođenja triangulacije. Ako se svi podaci nalaze u radnoj memoriji računara onda su, uz korišćenje kvalitetnih algoritama, ostvareni glavni preduslovi za brzo formiranje triangulacije. Zato je neophodno obezbediti na računaru dovoljnu količinu radne memorije i takvu strukturu podataka koja će omogućiti efikasno i racionalno predstavljanje triangulacije u memoriji preko elemenata same mreže (čvor, stranica i trougao).

**Robustnost** se ogleda u tome da algoritam uspešno završi svoj rad, bez obzira na raspored tačaka iz ulaznog skupa. U tom smislu, problem predstavljaju degenerativni slučajevi raspodela tačaka iz ulaznog skupa:

- "duple" tačke (identične tačke ili tačke na vrlo bliskom rastojanju),
- kolinearne tačke, i
- četiri ili više susednih tačaka koje leže na jednoj kružnici.

Problem "duplih tačaka, može se rešiti ili prethodnim procesiranjem podataka ili za vreme samog formiranja TIN-a. Ovakve tačke se najčešće zamenjuju sa jednom tačkom. Drugi problemi zahtevaju posebne postupke. U principu, za korektno izvođenje triangulacije neophodan je, pored ostalog, tačan proračun i ispravno donošenje odluka za dva testa:

- da li tačka leži na kružnici opisanoj oko temena jednog trougla iz triangulacije, ili je izvan, ili unutar te kružnice;
- da li je tačka na orijentisanoj stranici mreže, ili je levo, ili desno u odnosu na nju.

Prvi test je neophodan da bi se zadovoljio osnovni kriterijum Delaunay-jeve triangulacije (Slika 3.13). Odluka da li se neka tačka  $d$  zaista nalazi na kružnici opisanoj oko tri tačke  $(a,b,c)$  ili je ona unutar, ili izvan nje može se doneti na osnovu vrednosti (predznaka) determinante:

$$\text{InCircle}(a, b, c, d) = \begin{vmatrix} a_x & a_y & a_x^2 + a_y^2 & 1 \\ b_x & b_y & b_x^2 + b_y^2 & 1 \\ c_x & c_y & c_x^2 + c_y^2 & 1 \\ d_x & d_y & d_x^2 + d_y^2 & 1 \end{vmatrix} \quad (3-70)$$

Nije potrebno da se vrednost determinante tačno sračuna. Dovoljno je da se sa sigurnošću utvrdi samo predznak te vrednosti. Za tačke koje leže na kružnici (ili vrlo malo odstupaju od kružnice) može doći do problema zbog grešaka u zaokruživanju prilikom proračuna. U tom slučaju vrednost determinante je bliska nuli, pa je i utvrđivanje predznaka nepouzđano. Tada treba sračunati grešku proračuna  $\epsilon$ , ukoliko je apsolutna vrednost determinante manja od greške proračuna, treba poboljšati proračun sa povećanjem broja bitova proračuna. Shewchuk je u svojoj disertaciji razvio algoritme za *adaptivnu preciznu aritmetiku* koji se zasnivaju na ovom pristupu (Shewchuk 1996, Shewchuk 1997). Na ovaj način prevazilaze se pomenuti problemi kod proračuna ovog testa za formiranje TIN-a, koji inače mogu biti fatalni za ishod triangulacije. Za slučaj kada četiri ili više bliskih tačaka iz ulaznog skupa leže na jednoj kružnici Delaunay-jeva triangulacija nije jedinstvena. Pa ipak, bilo koji konačan izbor mogućih trouglova sa desnog primera (Slika 3.13) daje korektnu triangulaciju.

Položaj tačke  $c$  u odnosu na orijentisanu stranicu mreže  $(a,b)$  se može odrediti na osnovu vrednosti (predznaka) determinante:



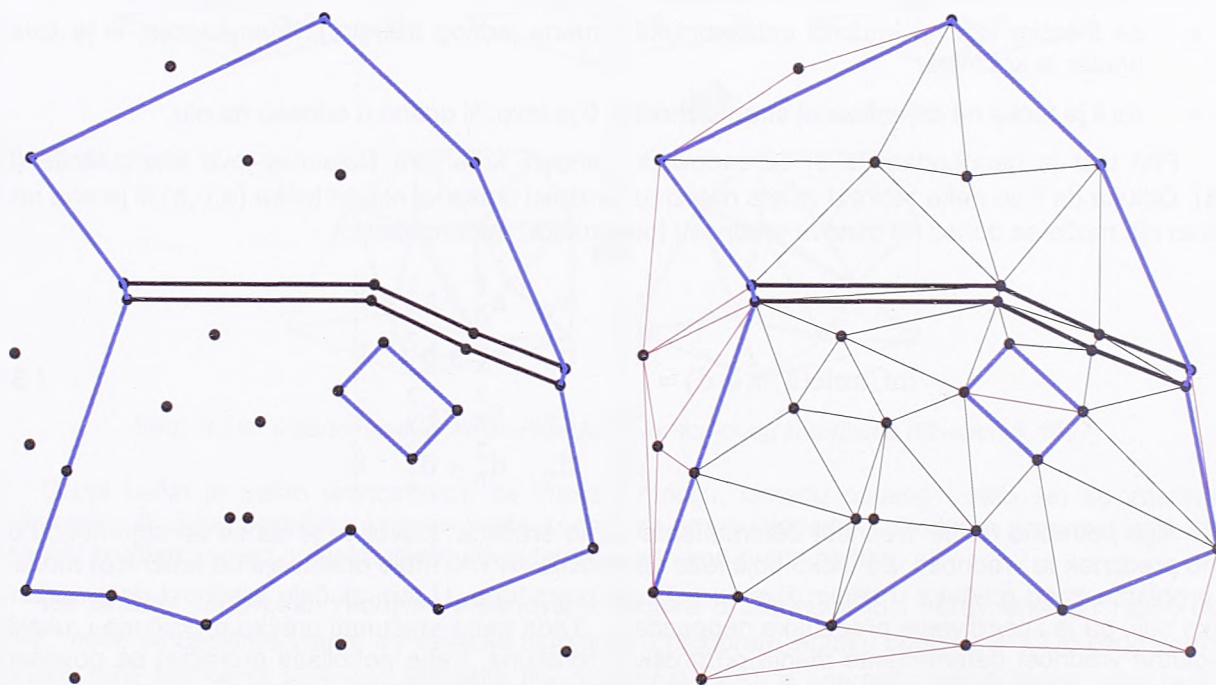
$$\text{Orient2D}(a, b, c) = \begin{vmatrix} a_x & a_y & 1 \\ b_x & b_y & 1 \\ c_x & c_y & 1 \end{vmatrix} \quad (3-71)$$

I kod ovog testa bitan je predznak vrednosti determinante za donošenje odluke. Za prevazilaženje problema koji nastaju ako su tačke kolinearne (ili skoro kolinearne) važe ista pravila i koriste se isti postupci (*adaptivna precizna aritmetika*) kao i kod testiranja položaja tačke u odnosu na kružnicu postavljenu kroz temena trougla.

**Prikladnost algoritma za pojedine primene** se ogleda u specifičnim zahtevima koji se javljaju kod nekih primena. Na primer, neki algoritmi su prikladniji od drugih u situacijama kada se radi o količini podataka koja se ne može smestiti u radnu memoriju računara (engl. *RAM – Random Access Memory*), već se moraju koristiti spoljne jedinice memorije (diskovi) koji su za nekoliko redova veličina sporiji. Drugi zahtevi se mogu odnositi na potrebu dinamičkog kreiranja i ažuriranja TIN-a. U tom slučaju potrebno je omogućiti efikasne procedure za povremeno ubacivanje ili izbacivanje veće količine tačaka (i linija) iz TIN-a.

### 3.3.1.2 Obavezne linije TIN-a

U praktičnim primenama ulazni skup podataka se ne sastoji samo od tačaka, već i od linija i površina (zatvoreni pologoni). Ovaj skup ulaznih podataka se najčešće daje u formi **planarnog grafa sa pravim linijama** (engl. *PSLG – Planar Straight Line Graph*). Po definiciji PSLG mora sadržati krajnje tačke svih segmenata koje sadrži, a segmenti mogu seći tačke i druge segmente samo na svojim krajnjim tačkama. Pored toga, sve površine unutar PSLG moraju biti ograničene segmentima (Slika 3.19).



Slika 3.19 : Ulazni skup sa podacima u formi planarnog grafa sa pravim linijama (PSLG) - levo; granice površina koje predstavljaju domen triangulacije predstavljene su plavo; CDT triangulacija PSLG - desno; crveno su označene stranice trouglova koje treba brisati (ili posebno označiti), jer padaju van domena triangulacije

Sve elemente iz PSLG je potrebno respektovati kod formiranja TIN-a. To podrazumeva da zadate linije i površine budu zastupljene u triangulaciji preko stranica, odnosno skupa trouglova mreže respektivno. Trouglovi koji čine zadate površine mogu biti brisani iz same mreže, ukoliko se to zahteva. Naravno, za površine je dovoljno obezbediti da sve linije koje formiraju granicu površine budu zastupljene

u triangulaciji preko stranica mreže. Nakon toga je samo potrebno odgovarajućim atributima odrediti pripadnost trouglova datoj površini. Zato se problem u oba slučaja svodi na obezbeđivanje uslova da zadate linije (uključujući tu i linije na granici površina) iz ulaznog skupa budu zastupljene u triangulaciji.

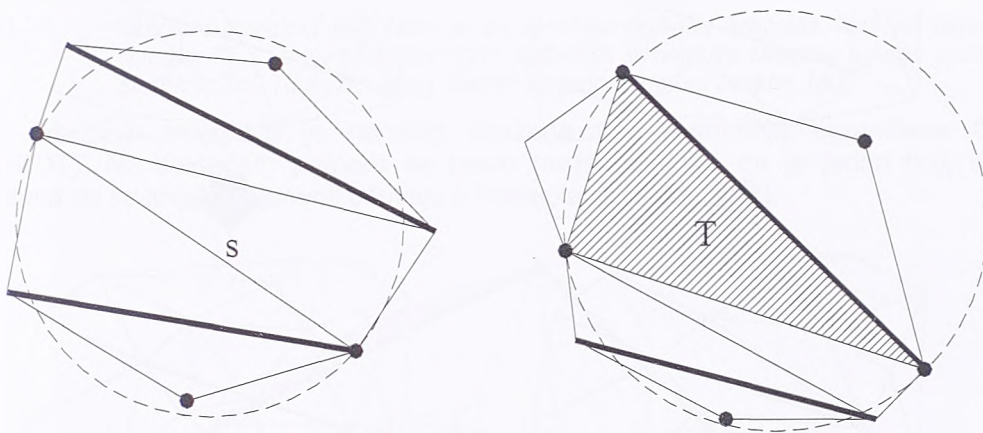
Za slučaj Delaunay-jeve triangulacije postoje dve mogućnosti za postizanje prethodnog uslova:

- ograničena (uslovljena) Delaunay-jeva triangulacija,
- konformna Delaunay-jeva triangulacija.

**Ograničena Delaunay-jeva triangulacija** (engl. *CDT – Constrained Delaunay Triangulation*) je slična Delaunay-jevoj triangulaciji, s tim da se svaki linijski segment iz ulaznog skupa javlja kao stranica mreže u triangulaciji. Stranica (trougao) mreže je ograničena Delaunay-jeva stranica (trougao) ako zadovoljava sledeća dva uslova:

- tačke te stranice (trougla) su međusobno vidljive;
- postoji kružnica opisana oko tačaka posmatrane stranice (trougla) i ta kružnica ne sadrži tačke triangulacije koje su *vidljive* iz unutrašnjosti stranice (trougla) (Slika 3.20).

Tačke su međusobno *vidljive* ako se između njih ne nalazi neki zadati linijski segment. Svi zadati linijski segmenti su takođe ograničene Delaunay-jeve stranice.



Slika 3.20 : Primeri ograničenih Delaunay-jevih stranica ( $s$ ) i trouglova ( $T$ ); zadati linijski segmenti su predstavljeni debelim linijama

Najčešći način da se postigne ograničena Delaunay-jeva triangulacija je da se postupak formiranja CDT sprovede kroz sledeće faze (Slika 3.21, levo):

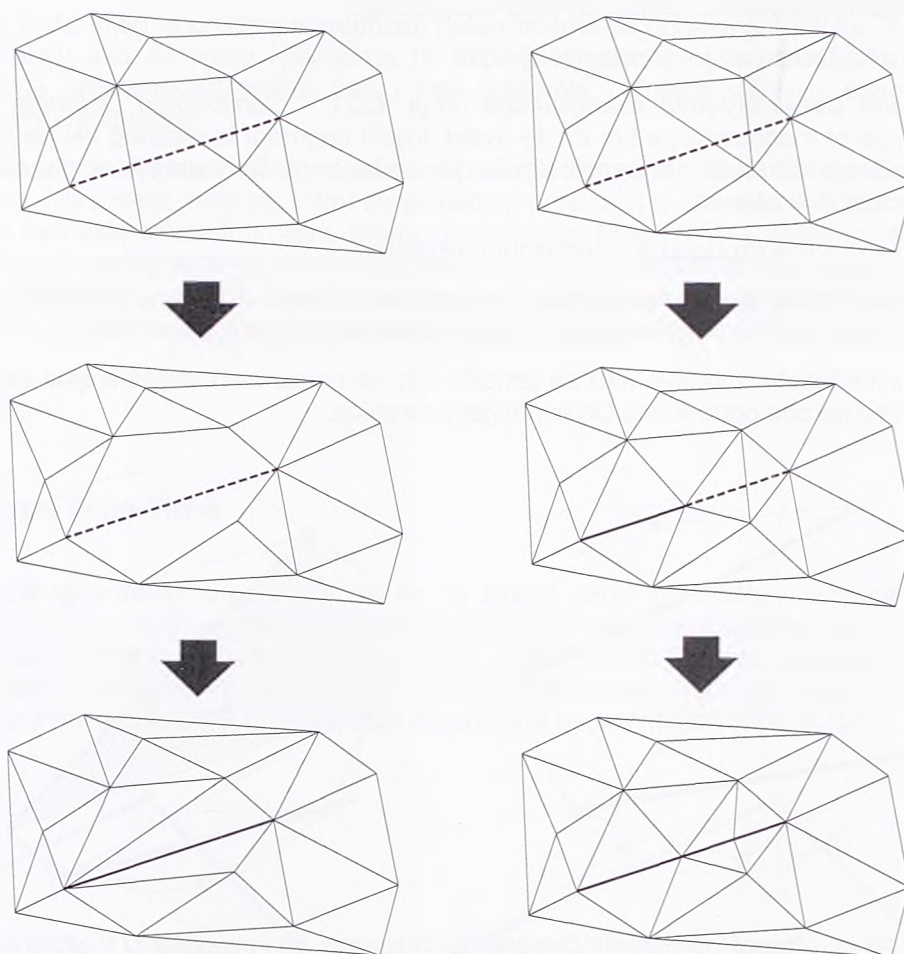
- formira se proizvoljna triangulacija sastavljena od svih tačaka iz ulaznog skupa, uključujući tu i sve tačke koje čine linije
- izvrši se prekorogovanje triangulacije tako da svi zadati linijski segmenti budu zastupljeni u triangulaciji kao stranice trouglova; ovo se radi tako što se iz triangulacije brišu sve stranice trouglova koje dati linijski segment seče, segment se ubacuje u triangulaciju, a zatim se dva nastala poligona (sa leve i desne strane segmenta) istrianguliraju;
- nastala triangulacija se popravljiva koristeći Lawson-ov kriterijum za Delaunay-jevu triangulaciju i zamene dijagonala (engl. *edge flip*) u četvorouglovima (Lawson 1977, Sibson 1978, Slika 3.13), sem u slučajevima kada dijagonala predstavlja zadati linijski segment.

Kod CDT treba voditi računa o tome da to nije prava Delaunay-jeva triangulacija, tj. da svi trouglovi mreže ne zadovoljavaju kriterijum da u opisanoj kružnici oko trougla ne leži nijedna druga tačka mreže.

**Konformna Delaunay-jeva triangulacija** (engl. *Conforming Delaunay Triangulation*) je takva Delaunay-jeva triangulacija kod koje su svi zadati linijski segmenti zastupljeni u triangulaciji preko stranica trouglova, ali kod koje su svi trouglovi mreže Delaunay-jevi, tj. zadovoljavaju Delaunay-jev kriterijum. Do ove triangulacije se dolazi tako što se prvo formira Delaunay-jeva triangulacija na osnovu svih tačaka iz ulaznog skupa, uključujući tu i sve tačke koje čine linije. Zatim se sukcesivno proverava da li su linijski segmenti zastupljeni u triangulaciji kao stranice trouglova. Ako dati segment nije zastupljen u triangulaciji onda se vrši insertovanje nove tačke u triangulaciju koja leži na polovini rastojanja između krajnjih tačaka segmenta (Slika 3.21, desno). Postupak se rekurzivno ponavlja za nastale podsegmente, sve dok linijski segment ne bude u potpunosti zastupljen u triangulaciji preko niza stranica trouglova. Prednost



konformne Delaunay-jeve triangulacije je svakako u tome što ona zadržava sva ona svojstva koja ima Delaunay-jeva triangulacija, a pre svega dualnost sa Voronoi dijagramom. Takva triangulacija može biti predmet dalje obrade koristeći standardne algoritme projektovane za rad sa DT (VD), bez potrebe za posebnim modifikacijama.



Slika 3.21 : Ubacivanje linijskih segmenata u triangulaciju; levo - ograničena DT, desno – konformna DT

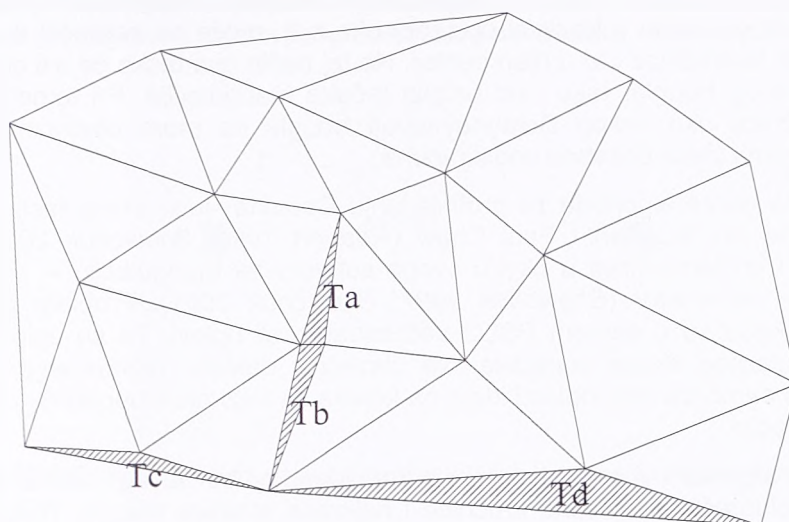
Tokom izvođenja triangulacije potrebno je obezbediti otkrivanje i razrešavanje situacija gde se javljaju preseki zadatih linijskih segmenata. Najčešće se te situacije razrešavaju tako što se na mestu preseka ubacuje nova tačka. Ovo je i inače jedan od preduslova koje ulazni skup podataka mora da zadovolji da bi bio PLSG. Vrednosti površi (visine) za ove tačke, kao i za tačke koje nastaju u postupku formiranja konformne DT se najčešće određuju linearnom interpolacijom na osnovu vrednosti krajnjih tačaka linijskog segmenta.

Za neke primene, kao što je to slučaj kod modeliranja terena, potrebno je obezbediti vođenje odgovarajućih atributa uz linije TIN-a koje predstavljaju zadate linijske segmente iz ulaznog skupa.

### 3.3.1.3 Profinjavanje TIN-a

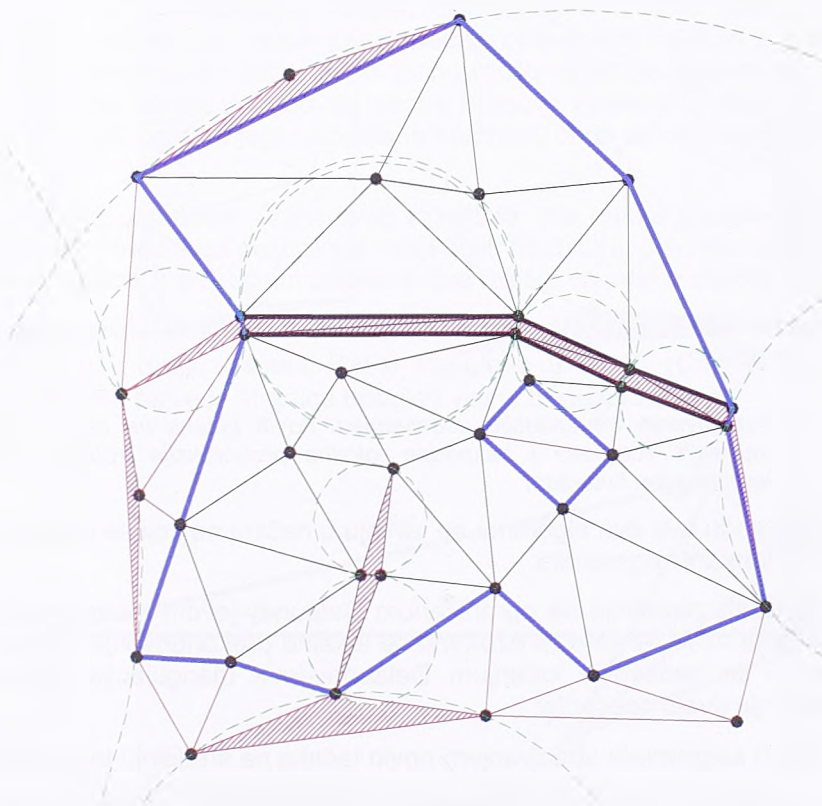
Problem koji se često javlja kod triangulacije je da se usled neravnomernog rasporeda tačaka iz ulaznog skupa i dalje mogu pojaviti trouglovi koji imaju nepoželjan oblik. To su pre svega tanki, izduženi trouglovi (Slika 3.22). Ovakvi trouglovi rezultiraju velikim greškama kod ocene funkcionala površi (normala na površ). Kao posledica tih grešaka dolazi do velikih oscilacija modelirane površi terena kada se za modeliranje koriste površinske trougaone zakrpe. Zato je poželjno da se dobijena Delaunay-jeva ili ograničena Delaunay-jeva triangulacija modifikuju tako da se ovakvi trouglovi na neki način eliminišu iz

triangulacije. Pored eliminacije ovih izduženih trouglova može se zahtevati i eliminacija svih trouglova čije su stranice ili površina veće od unapred zadatih vrednosti.



Slika 3.22 : Izduženi trouglovi kod kojih je poluprečnik opisane kružnice veći od najkraće stranice trougla; Ta i Tb su trouglovi "igle" kod kojih je najduža stranica mnogo duža od najkraće stranice; Tc i Td su trouglovi "kape" sa jednim uglom bliskim  $180^\circ$

Pojava izduženih trouglova je naročito izražena kod formiranja ograničene Delaunay-jeve triangulacije (CDT). Na sledećem primeru se jasno može zaključiti da je jedan broj ovih trouglova posledica zahteva da se linijski segmenti očuvaju u triangulaciji (Slika 3.23).



Slika 3.23: CDT sa izduženim trouglovima

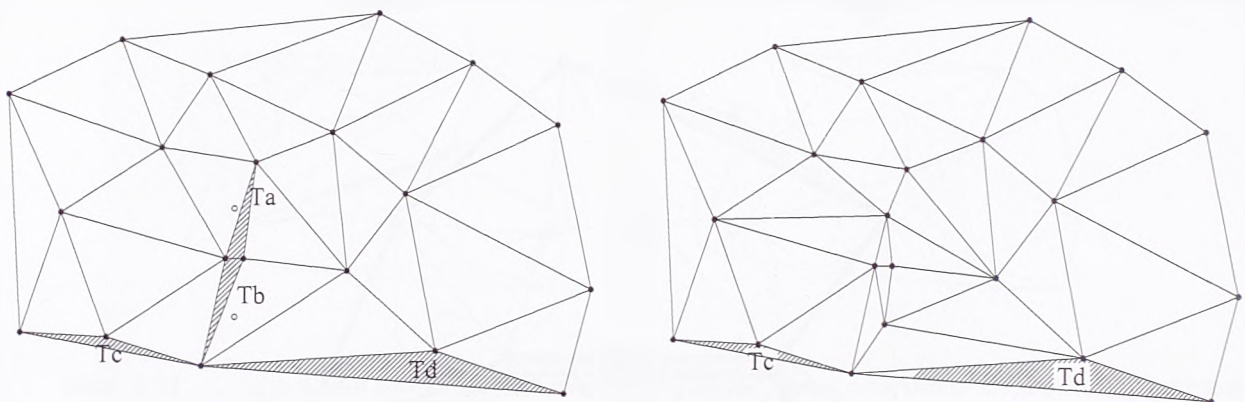
Popravljanje triangulacije, tj. eliminacija ovakvih trouglova može se izvesti ubacivanjem novih tačaka u triangulaciju na pažljivo izabrana mesta, sve dok se ne ispune zahtevi u pogledu oblika i veličine trouglova u mreži. Polazna triangulacija je uglavnom data u vidu ograničene Delaunay-jeve triangulacije ili prave (konformne) Delaunay-jeve triangulacije. Sam postupak profinjavanja mreže može biti takav da se održava data triangulacija u obliku u kome je već data (DT ili CDT), ili pak, da rezultat uvek bude u vidu prave Delaunay-jeve triangulacije.



Jasno da je ključna stvar kod profinjavanja izbor pozicije na koje treba umetnuti novu tačku u triangulaciju. Logično razmišljanje upućuje na to da ta pozicija treba da bude što dalja od ostalih tačaka u triangulaciji. U suprotnom, moglo bi doći do pojave novih izduženih trouglova. S obzirom da Delaunay-jevi trouglovi ne sadrže druge tačke u kružnici opisanoj oko njih, može se zaključiti da nova tačka treba da bude ubačena unutar te kružnice i to u njen centar. Na taj način ova tačka će biti dovoljno udaljena, kako od temena posmatranog trougla, tako i od ostalih tačaka triangulacije. Pri tome treba imati u vidu da centar opisane kružnice oko nekog Delaunay-jevog trougla ne mora obavezno da leži unutar date triangulacije, pa o ovome treba posebno voditi računa.

Prve provereno dobre algoritme za profinjavanje Delaunay-jeve triangulacije razvili su nezavisno, otprilike u isto vreme Jim Ruppert i Paul Chew (*Ruppert 1995, Shewchuk 2001*). Shewchuk je ove algoritme analizirao i implementirao u okviru svoga softvera za triangulaciju – *Triangle*, a ponudio je i sopstvena rešenja – *terminator* (*Shewchuk 1997, Shewchuk 2001*). Problem profinjavanja mreže se naročito komplikuje kada su u samom PSLG već zadati mali uglovi. To su uglovi koje formiraju sami linijski segmenti iz ulaznog skupa podataka. Ne ulazeći u detaljno razmatranje kako se rešavaju ovi problemi, ovde će se samo ukratko opisati ideje na kojima se baziraju Ruppert-ov i Chew-ov algoritam za profinjavanje triangulacije.

I jedan i drugi algoritam pronalaze u mreži trouglove koji su "lošeg" oblika. Kriterijum za to može biti odnos između poluprečnika opisane kružnice i najkraće stranice trougla. Ruppert je za ovaj odnos uzeo vrednost  $\sqrt{2}$ , dok je Chew uzeo vrednost 1. Sa ovako izabranim pragom, Ruppert sa svojim algoritmom rezultira triangulacijom u kojoj su svi uglovi mreže između  $20.7^\circ$  i  $138.6^\circ$ , a kod Chew-a su ti uglovi u rasponu od  $30^\circ$  i  $120^\circ$  (*Shewchuk 2001*). I kod prvog i kod drugog algoritma za svaki trougao koji ne zadovoljava kriterijum kvaliteta, vrši se ubacivanje nove tačke u triangulaciju na poziciju koja odgovara centru opisane kružnice oko trougla. Nakon toga se mreža prekoriguje da bi se obezbedilo zadovoljenje Delaunay-jevog, odnosno ograničenog Delaunay-jevog kriterijuma.



Slika 3.24 : Profinjavanje triangulacije ubacivanjem novih tačaka na centre kružnica opisanih oko izduženih trouglova i naknadna lokalna prekorekcija trouglova da bi se zadovoljio Delaunay-jev kriterijum

Ključne razlike između ova dva algoritma se javljaju u načinu na koji se rešavaju situacije na granici područja i za trouglove u blizini segmenata.

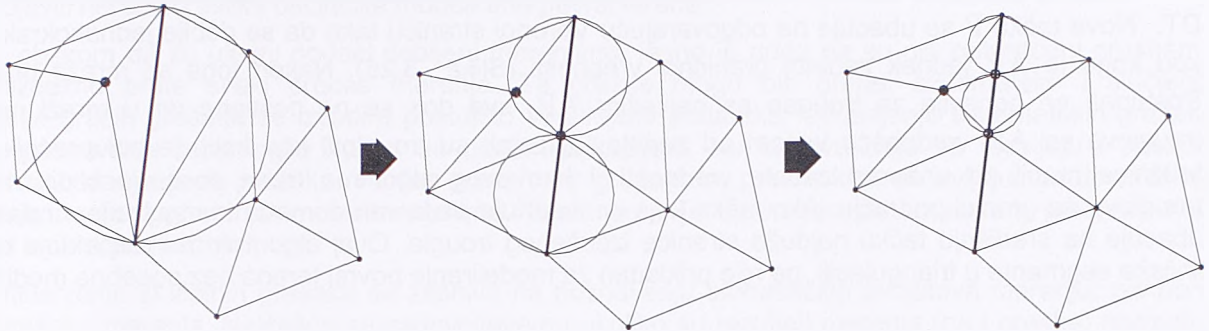
Ruppert-ov algoritam započinje sa ograničenom Delaunay-jevom triangulacijom ulaznog PSLG-a. Nakon svakog ubacivanja nove tačke u mrežu, vrši se lokalno prekorigovanje mreže primenom Lawson-ovog kriterijuma da bi se zadovoljio kriterijum Delaunay-jeve triangulacije. Algoritam se sastoji od naizmeničnog smenjivanja dveju operacija:

- deljenja linijskih segmenata ubacivanjem novih tačaka na središnju tačku segmenta, i
- razbijanja izduženih trouglova ubacivanjem novih tačaka u centar kružnice opisane oko tih trouglova (Slika 3.24).

Pri tome se operacije izvode koristeći dva osnovna pravila:

- a) ako minimalna kružnica opisana oko nekog linijskog segmenta (sa centrom u središnjoj tački segmenta) sadrži neku tačku triangulacije, onda se segment deli na dva dela ubacivanjem nove tačke u triangulaciju na poziciju središnje tačke segmenta; postupak se ponavlja sve dok kružnice opisane oko novonastalih segmenata ne sadrže nijednu drugu tačku iz triangulacije (naravno, sem krajnjih tačaka samog segmenta) (Slika 3.25);

- b) svaki izduženi trougao se razbija ubacivanjem nove tačke na poziciju centra kružnice opisane oko tog trougla; međutim, ukoliko bi ubacivanje nove tačke dovelo do prethodne situacije i pravila a) sa potrebom za deljenjem segmenta, onda se ne vrši ubacivanje nove tačke; umesto toga, dele se svi segmenti koje bi zbog ubacivanja nove tačke i trebalo deliti.



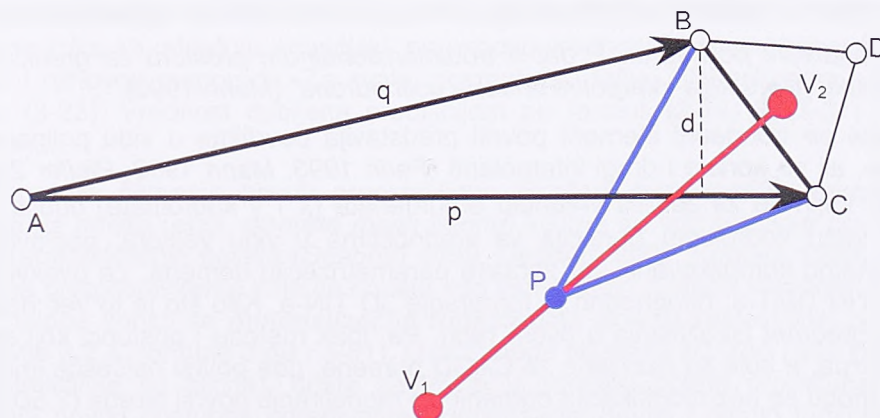
Slika 3.25: Deljenje linijskih segmenata čije opisane kružnice sadrže temena mreže

Kada u triangulaciji više nema segmenata čije minimalne opisane kružnice sadrže druge tačke iz mreže, onda su i svi trouglovi i stranice mreže Delaunay-jevi, pa je mreža formirana Ruppert-ovim algoritmom Delaunay-jeva, a ne samo ograničena Delaunay-jeva mreža.

Chew-ov algoritam takođe polazi od formirane ograničene Delaunay-jeve triangulacije, međutim ovde se situacija kada se izduženi trouglovi nađu u blizini obaveznih linijskih segmenata drugačije razrešava. Ako su za neki izduženi trougao centar njegove opisane kružnice i sam trougao razdvojeni linijskim segmentom, jasno je da ubacivanje nove tačke u centar te kružnice neće eliminisati posmatrani izduženi trougao. Chew-ov način da se ova situacija razreši sastoji se u tome da se sve tačke koje padaju unutar kružnice opisane oko posmatranog trougla, uključujući tu i tačke samog trougla, uklanjaju iz triangulacije. Tačke iz ulaznog skupa i tačke koje pripadaju obaveznim linijskim segmentima su izuzetak i one se ne uklanjaju iz triangulacije. Zatim se u triangulaciju ubacuje nova tačka na sredinu linijskog segmenta koji razdvaja posmatrani trougao od centra njegove opisane kružnice. Ako više segmenata razdvaja posmatrani trougao i centar njegove opisane kružnice, onda se deli samo segment koji je najbliži posmatranom trouglu.

Mreža koja se dobija primenom Chew-ovog algoritma ima manje trouglova nego mreža dobijena Ruppert-ovim algoritmom. Pored toga postiže se i bolji oblik trouglova, u smislu minimalnog ugla u mreži i dužina strana mreže. Međutim, u praktičnim uslovima ove razlike nisu tako značajne.

U literaturi se mogu naći i drugi algoritmi kojima se profinjava DT. Jedan od njih je i algoritam kojim se popravljaju takozvani AR (engl. *Aspect Ratio*) trouglova u mreži (Cho 1997). AR nekog trougla predstavlja vrednost količnika najveće stranice trougla i visine trougla nad njom.



Slika 3.26: AR kriterijum za ocenu kvaliteta trouglova u mreži i ubacivanje nove tačke u triangulaciju



$$AR = \frac{|p|}{d} = \frac{|p|^2}{|p \times q|} \quad (3-72)$$

Za sve trouglove kod kojih AR prelazi zadatu graničnu vrednost vrši se insertovanje nove tačke u DT. Nova tačka P se ubacuje na odgovarajuću Voronoi stranicu tako da se dobije jednakokraki trougao kod koga je AR jednak zadatoj graničnoj vrednosti (Slika 3.26). Nakon toga se mreža prekoriguje. Postupak se ponavlja za trougao sa najvećim AR, sve dok se ne postigne da u mreži nema više trouglova sa AR vrednošću većom od zadate. Izuzetak su trouglovi kod kojih je poluprečnik opisane kružnice manji od unapred zadate vrednosti. I kod ovog algoritma treba posebno voditi računa za trouglove na granici područja. Ako tačka koja se insertuje pada van domena triangulacije, onda se tačka ubacuje na središnju tačku najduže stranice izduženog trougla. Ovaj algoritam ne respektuje obavezne linijske segmente u triangulaciji, pa nije prikladan za modeliranje površi terena bez posebne modifikacije.

### 3.3.2 Modeliranje površi terena na osnovu TIN-a

Na osnovu TIN-a se, slično kao kod metode konačnih elemenata, površ terena aproksimira trougaonim površinskim elementima. Uglavnom se formira površ koja interpolira, tj prolazi kroz referentne tačke (tačke sa poznatim visinama). Ove tačke su u triangulaciji prisutne kao temena trouglova TIN-a. Izuzetak su slučajevi kada se namerno ide na filtriranje visina da bi se otklonile slučajne greške merenja.

U najprostijem slučaju trougaoni površinski element kojim se površ aproksimira je trougao u prostoru koji čine temena trougla TIN-a. Drugim rečima, za određivanje visine neke tačke unutar trougla TIN-a koristi se linearna interpolacija na osnovu vrednosti u temenima tog trougla. Ovakav način modeliranja površi terena obezbeđuje  $C^0$  kontinualnost, ali ne i glatkost interpolovane površi. Naime, na stranicama trouglova dolazi do diskontinuiteta prvih izvoda interpolovane površi, što je za veliki broj primena neprihvatljivo. Pa ipak, jednostavnost implementacije raznih algoritama za analize ovakvog modela terena čine da je ovaj pristup daleko najrasprostranjeniji. Jedan od načina da se omogući verifikacija prikupljenih podataka o terenu je upravo formiranje TIN-a i njegova 3D vizuelizacija. Prikaz terena preko trougaonih faceta je daleko najefikasniji način da se to uradi.

Druga mogućnost je da se površ terena aproksimira površinskim trougaonim zakrpama predstavljenim u obliku polinoma višeg stepena. Osnovni zahtev kod proračuna trougaonih zakrpa je da se svakako obezbedi  $C^0$  kontinualnost površi, ali se najčešće postavlja i uslov da površ poseduje  $C^1$  (ili bar  $G^1$ ) kontinualnost (poglavlje 3.1). Cilj je svakako da se dobije što vernije predstavljanje površi koja se modelira. Površ terena je, usled dejstva raznih sila, uglavnom glatka. Svakako, da postoje mesta gde se javljaju diskontinuiteti prvih izvoda, ali se ova mesta posebno naznačavaju preko prelomnih linija terena i, kao takva, posebno i modeliraju. Problem se, dakle, u suštini svodi na rešavanje sledećeg problema:

*“Za triangulirani polihedron P dat u trodimenzionalnom prostoru sa granicama ili bez njih, treba konstruisati glatku površ koja interpolira temena polihedrona” (Mann 1992)*

Najčešće se trougaoni element površi predstavlja površima u vidu polinoma trećeg, četvrtog ili petog stepena, ali se koriste i drugi interpolanti (Farin 1993, Mann 1998, Pfeifer 2002, Schneider 1998). Za površi kod kojih se za zadatu vrednost argumenata (x i y koordinate) dobija u opštem slučaju niz vrednosti za treću koordinatu (funkcije sa vrednostima u vidu vektora, poglavlje 3.1) proračun ovih polinoma je znatno komplikovaniji, jer zahteva parametrizaciju domena. Za ovakvo predstavljanje površi terena preko TIN DMT-a, neophodno je formiranje 3D TIN-a. Kao što je to već naglašeno ove metode i postupci nisu predmet istraživanja u ovom radu. Pa, ipak metode i postupci koji se koriste za proračun trougaonih zakrpa, a koje su razvijene za CAGD primene, gde površi najčešće imaju upravo vrednosti u vidu vektora, mogu se bez modifikacija primeniti za modeliranje površi terena (2.5D model), jer se odnose na uopšteniji slučaj.

Treća mogućnost je da se izvrši dalje profinjavanje TIN-a, tj. deljenje trouglova na manje trouglove, sve dok se ne postigne zadovoljavajuća aproksimacija površi terena prostornim trouglovima (Pfeifer 2002). Ovaj pristup na najbolji način kombinuje prednosti prvog i drugog pristupa za modeliranje terena korišćenjem TIN-a. S jedne strane, algoritmi za analizu DMT-a su jednostavni, jer se koriste prostorni trouglovi, a s druge strane aproksimacija terena može biti sasvim zadovoljavajuća i prilagođena tipu terena i zahtevima u pogledu tačnosti.

### 3.3.2.1 Filtriranje podataka

Modeliranje površi terena korišćenjem trougaonih površinskih zakrpa je osetljivo na greške i šumove prisutne u ulaznim podacima. Zato je vrlo važno da se ove greške uklone iz samih podataka, jer se inače mogu pojaviti nerealno velike oscilacije modelirane površi terena.

S obzirom da su ulazni podaci dobijeni merenjima, jasno je onda da su oni opterećeni greškama koje neizbežno prate svaki proces merenja. Te greške mogu biti grube, sistematske i slučajne. Otklanjanje grubih grešaka se izvodi u postupku verifikacije podataka. Otklanjanje sistematskih grešaka zahteva poznavanje tehnologije kojom su podaci prikupljeni. Na osnovu toga se razvijaju i posebni postupci za otklanjanje tih grešaka. Tipičan primer ovih grešaka su greške koje se javljaju kod dinamičkog profilisanja na fotogrametrijskim instrumentima. Svaki profil je opterećen sistematskom greškom koja zavisi od smera profilisanja.

Otklanjanje slučajnih grešaka se zasniva na poznavanju stohastičkih svojstava merenja, odnosno samih grešaka merenja. Najčešće se zadovoljavamo ukoliko su rezultati merenja (pa i greške) normalno raspoređeni i ukoliko poznajemo standard merenja (tačnost merenja). Ova tačnost može biti različita za pojedine grupe tačaka, u zavisnosti od toga šta te tačke predstavljaju na terenu i od toga na koji način su njihove pozicije određene.

Teoretski najprihvatljiviji način da se iz ulaznih podataka datih u formi tačaka otklone greške merenja je korišćenje **geostatističkih metoda**, kriginga i kolokacije, opisanih u poglavlju 3.2.2 ovog rada. Pri tome se postupak može izvoditi globalno ili lokalno. Globalni postupak se ni po čemu ne razlikuje od standardnih geostatističkih postupaka za određivanje površi sa, statistički posmatrano, najvećom verovatnoćom. U tom slučaju topologija TIN-a se može, ali i ne mora koristiti. Znatno efikasniji način je primena lokalnih procedura. U tom slučaju, otklanjanje šuma se izvodi za svaku tačku pojedinačno, korišćenjem topologije formiranog TIN-a i koncepta **susednosti** (engl. *neighborhood*) tačaka TIN-a.

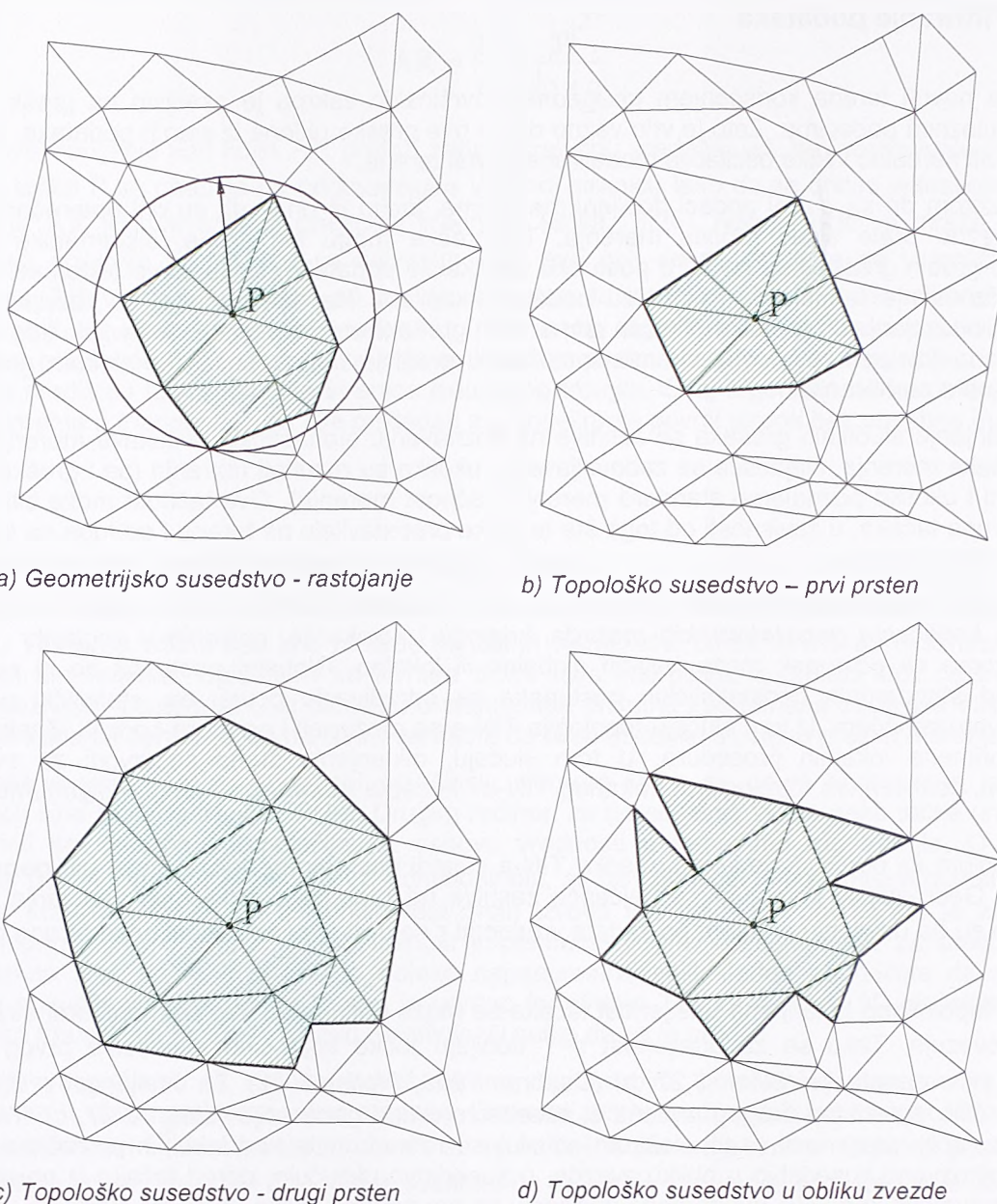
Kriterijum za određivanje koje su tačke TIN-a susedi posmatrane tačke može biti **geometrijski** ili **topološki**. Geometrijski kriterijum se najčešće zasniva na proračunu euklidskih rastojanja. Sve tačke mreže koje su na udaljenju manjem od zadate vrednosti  $r$  se tretiraju kao susedi posmatrane tačke (Slika 3.27).

Kod topološkog kriterijuma udaljenost tačaka se može posmatrati kao najmanji broj stranica TIN-a kojih ih povezuje. Tako se za udaljenost  $r=1$  dobijaju tačke koje čine susedstvo prvog prstena ili susedstvo prve generacije (Slika 3.27, b) (Desbrun 1999, Pfeifer 2002). Za udaljenost  $r=2$  dobijaju se tačke koje čine susedstvo drugog prstena ili susedstvo druge generacije (Slika 3.27, c). Tačke mreže koje su na većoj udaljenosti (u topološkom smislu) se retko koriste kod lokalnih proračuna. Poslednja varijanta, takozvano susedstvo u obliku zvezde, u susedstvo uključuje, pored tačaka iz prvog prstena, i sve tačke trouglova kod kojih dva temena pripadaju prvom prstenu (Slika 3.27, d). Naravno, moguće su i druge varijante, ali ovo su neke najčešće korišćene.

Oblik kovarijacione funkcije kod filtriranja nekom od geostatističkih metoda se unapred usvaja, a parametri kovarijacione krive se određuju empirijski, na osnovu vrednosti u posmatranoj tački i vrednosti u susednim tačkama i njihovog rasporeda. Za svaku posmatranu tačku TIN-a formira se jedan sistem jednačina po formuli (3-23). Vrednost dobijena predikcijom po formuli (3-24) ili (3-31) je oslobođena slučajne greške merenja.

Druga mogućnost za filtriranje površi predstavljene mrežom trouglova su takozvane **metode diskretnog popravljavanja** mreža (engl. *discrete mesh fairing*) kojima se vrši glačanje površi (otklanjanje šuma), uz očuvanje karakterističnih detalja (Desbrun 1999, Desbrun 2000, Kobbelt 1999). Ove metode i postupci se baziraju na pretpostavkama koje se koriste kod varijacionih metoda interpolacije površi. I kod jednih i kod drugih metoda koristi se **minimalizacija funkcionala površi** sastavljenih od izvoda površi različitog reda (poglavlje 3.2.4, formule 3-49 i 3-51). Ove metode filtriranja su, kao i sve globalne metode (i varijacione i geostatističke su slične), dosta zahtevne u pogledu obima proračuna. Kod metoda diskretnog popravljavanja površi postupak određivanja i optimizacije površi i njenih funkcionala svodi na rešavanje velikih sistema jednačina, često kroz jedan iterativni postupak (Desbrun 1999, Kobbelt 1999). Srećom, linearni sistem jednačina koji se pri tome dobija je takav da je matrica uz nepoznate vrednosti retka matrica (engl. *sparse matrix*). Broj elemenata matrice različitih od nule u jednoj vrsti matrice se u proseku kreće oko 6, jer je to i prosečan broj suseda za neku tačku u mreži triangulacije, tj. TIN-a (Desbrun 1999).





Slika 3.27: Izbor susednih tačaka u TIN-u

Bez obzira na to koji se postupak koristi, potrebno je obezbediti da prilikom filtriranja podataka ne dođe do filtriranja morfološki značajnih karakteristika površi. Te karakteristike su za površ terena predstavljene u vidu karakterističnih tačaka i linija terena. Kada su u pitanju karakteristične tačke površi terena (vrhovi, dna), ovo se jednostavno izvodi tako što se ove tačke izuzimaju kod filtriranja. Kod filtriranja primenom geostatističkih metoda ovaj problem se svodi na to da kovarijansa za tačke terena koje su razdvojene prelomnim linijama terena uvek ima vrednost 0 (poglavlje, 3.2.2.1). U literaturi je predstavljen efikasan postupak za uklanjanje šuma iz podataka koji predstavljaju realizaciju funkcije dveju varijabli (Desbrun 2000). Postupak se zasniva na principu minimalizacije površi koja je skup rezultat funkcije dveju varijabli. Isti postupak se može uspešno koristiti za otklanjanje šumova u podacima koji predstavljaju slike u koloru ili sivim tonovima, ali i podataka koji predstavljaju tačke sa visinama. Uvođenjem težina postiže se i očuvanje diskontinuiteta površi, tj. funkcije koja se modelira.

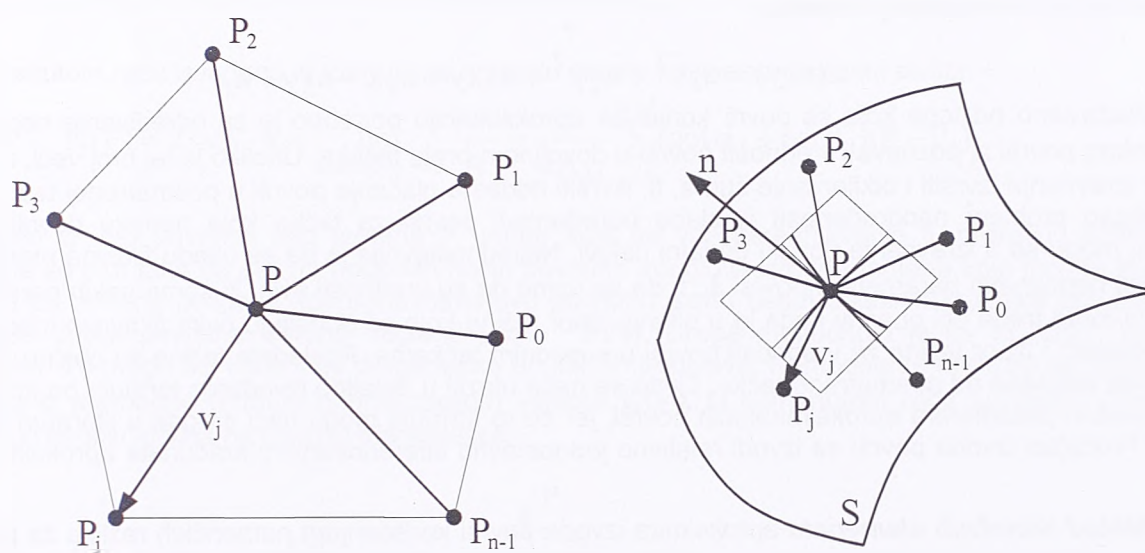
Otklanjanje slučajnih grešaka se takođe može izvesti i za same tačke koje pripadaju karakterističnim linijama terena. Ovo se obično izvodi bez korišćenja ostalih tačaka iz susedstva. Filtriranje grešaka se obično izvodi proračunom krivih koje poseduju željena svojstva i pri tome aproksimiraju izmerene linije sa odstupanjima koja su na nivou slučajnih grešaka merenja. Proračun se standardno izvodi postavljanjem jednačina popravaka i izravanjem. Pri tome se mogu postavljati i dodatni uslovi, kao što je zahtev da vrednosti visina za linije koje predstavljaju vodostivnice budu monotono opadajuće ili monotono rastuće.



### 3.3.2.2 Proračun normala i izvoda površi terena u čvorovima TIN-a

Da bi se ostvarila  $C^1$  ( $G^1$ ) kontinualnost modelirane površi, ili čak kontinualnost višeg stepena, neophodno je da se pored poznatih vrednosti u tačkama TIN-a ocene i druga svojstva površi terena. Ovo, po pravilu, podrazumeva da se za svaku tačku TIN-a oceni normala, odnosno tangetna ravan, odnosno vrednost prvih izvoda površi terena. Ova tri geometrijska svojstva površi u posmatranoj tački su međusobno ekvivalentna. Po potrebi se mogu ocenjivati i vrednosti izvoda drugog reda kojima se definiše krivina površi terena u posmatranoj tački.

Postupci određivanja izvoda površi terena se, kao i sami postupci interpolacije, mogu prema obuhvatu podataka podeliti na *lokalne* i *globalne* postupke. Lokalni postupci koriste koncept susednosti tačaka u TIN-u, dok se kod globalnih postupaka vrši optimizacija da bi se postigla bolja raspodela krivina površi, tj. minimalna zakrivljenost (García 1995, Kobbelt 1999). Lokalne metode su efikasnije, ali često nisu u stanju da obezbede dobijanje površi sa zadovoljavajućim kvalitetom. Problemi su naročito izraženi kada se radi o složenijim površima, nepovoljnom rasporedu podataka ili prisutnim greškama merenja u podacima. Ovi problemi se mogu ublažiti korišćenjem globalnih metoda, ali uz znatno složenije proračune i samim tim i veće zahteve u pogledu procesorskog vremena. Primenom ovih metoda se, pored proračuna normala na površ, istovremeno vrši i filtriranje slučajnih grešaka iz podataka merenja (uklanjanje šuma). U daljem delu izlaganja pažnja će uglavnom biti usmerena na lokalne metode.



Slika 3.28: Proračun normale na površ terena na osnovu susednih tačaka u mreži

Proračun izvoda za neku tačku mreže vrši se na osnovu pozicije same tačke  $P$  i tačaka  $P_j$  koje čine njeno susedstvo (Slika 3.28). Koriste se sledeći postupci:

- proračun nagiba terena izborom pravca sa pretpostavljenim najvećim padom terena;
- osrednjavanje vektora normala susednih trouglova;
- proračun korišćenjem površi koja lokalno aproksimira površ terena u datoj tački;
- proračun zasnovan na metodi konačnih razlika.

Proračun tangentne ravni na površ terena u nekoj tački najjednostavnije se može izvesti ako se poznaje **pravac najvećeg pada terena** u toj tački (u  $XOY$  ravani). U tom slučaju tangentna ravan na površ terena sadrži pravu koja predstavlja pravac najvećeg pada terena. Normala na površ terena dobija se kao presek ravni upravne na tu pravu i ravni upravne na  $XOY$  ravan. Pravac najvećeg pada terena se može odrediti jednostavno tako što se između tačaka koje su najbliži susedi posmatrane tačke izabere ona tačka za koju je visinska razlika u odnosu na posmatranu tačku najveća. Nedostatak ovakvog načina je što se tako pravac najvećeg nagiba dosta grubo određuje. Teoretski opravdanija primena ovakvog postupka je situacija kada se raspolaže sa izohipsama. U tom slučaju, pravac maksimalnog nagiba, zbog same definicije izohipsi, je pravac upravan na samu izohipsu u posmatranoj tački.

**Osrednjavanje vektora normala** svih susednih trouglova je opcija koja se često koristi. Obično se koriste tačke koje čine susedstvo prve generacije. Normala u posmatranoj tački se računa kao opšta



aritmetička sredina normala svih trouglova koji za zajedničko teme imaju posmatranu tačku mreže. Da bi se dobila pouzdanija ocena normale uvode se i težine. Ove težine mogu biti proporcionalne površini trougla na koji se odnose (Akima 1978) ili u zavisnosti od ugla u trouglu kod posmatrane tačke. Ovakvo dobijena normala određuje tangentnu ravan na površ terena i vrednosti prvih izvoda površi  $z_x$  i  $z_y$  u posmatranoj tački TIN-a. Ako je potrebno sračunati druge izvode površi terena (krivina površi), onda se opisani postupak ponavlja, s tom razlikom što se umesto vrednosti površi za proračun normale koriste vrednosti prvog, odnosno drugog izvoda. Kada se koristi prvi izvod  $z_x$  dobijaju se vrednosti izvoda  $z_{xx}$  i  $z_{xy}$ , a kada se koristi  $z_y$  dobijaju se vrednosti izvoda  $z_{yx}$  i  $z_{yy}$ . Definitivna vrednost izvoda  $z_{xy}$  se dobija kao aritmetička sredina vrednosti izvoda  $z_{xy}$  i  $z_{yx}$ .

Treći postupak proračuna normale u nekoj tački TIN-a je da se za posmatranu tačku sračuna **površ koja lokalno aproksimira površ terena**. Parametri dobijene površi predstavljaju osnov za proračun normale, tangentne ravni ili izvoda površi koja se modelira. Aproksimirajuća površ može biti u formi algebarske površi ili polinoma višeg reda. Najčešće se koristi površ ili polinom drugog reda. Kao algebarska površ drugog reda može se uzeti kvadratna površ (kvadrik) zadata jednačinom

$$a_1x^2 + a_2y^2 + a_3z^2 + a_4xy + a_5xz + a_6yz + a_7x + a_8y + a_9z + 1 = 0 \quad (3-73)$$

Ravan, kupa, cilindar, sfera, elipsoid, paraboloid (eliptički i hiperbolički) i hiperboloid (dvodelni i jednodelni) su specijalni slučajevi ove kvadratne površi. Druga mogućnost je da se za aproksimirajuću površ uzme polinom drugog stepena

$$z(x, y) = a_1x^2 + a_2y^2 + a_3xy + a_4x + a_5y + a_6 \quad (3-74)$$

Nezavisno od toga koja se površ koristi za aproksimaciju potrebno je za određivanje nepoznatih parametara površi  $a_i$  poznavati vrednosti površi u dovoljnom broju tačaka. Ukoliko je taj broj veći, moguće je kroz izravnaje izvršiti i otklanjanje šuma, tj. izvršiti dodatno glačanje površi u posmatranoj tački. Da bi se izbegao problem neodređenosti ili slabe određenosti površi za tačke koje nemaju dovoljan broj suseda, mogu se u izravnaje ubaciti dodatni uslovi. Najjednostavnije je da se uvedu fiktivna merenja za vrednosti nepoznatih parametara površi  $a_i$ , tj da se uzme da su vrednosti svih, ili samo nekih parametara nule. Pri tome treba biti obazriv kada je u pitanju izbor težina koje se dodeljuju ovim fiktivnim merenjima, kao uostalom i izbor težina za vrednosti površi u susednim tačkama. Poslednje težine su obično funkcija rastojanja susedne od posmatrane tačke. Ovde se neće ulaziti u detaljno izvođenje formula po kojima se vrši proračun parametara aproksimirajućih površi, jer se te formule mogu naći drugde u literaturi (Pfeifer 2002). Proračun izvoda površi se izvodi relativno jednostavno diferenciranjem sračunate aproksimirajuće površi.

**Metod konačnih elemenata** aproksimira izvode površi korišćenjem numeričkih razlika za poznate tačke u raznim kombinacijama. Ove metode su pogodne jer se zasnivaju na dobrim teoretskim postavkama, efikasne su za proračun, mogu se koristiti za proračun izvoda svih redova, mogu se koristiti za rešavanje parcijalnih diferencijalnih jednačina (PDE – engl. *Partial Differential Equations*). U radu (Meyer 2001) je dato detaljno izvođenje formula za proračun gradijenata (izvoda) površi koje se mogu primeniti za slučaj nepravilno raspoređenih tačaka sa poznatim vrednostima površi. Ne ulazeći detaljno u izvođenje ovde se daju samo konačne formule za proračun izvoda površi:

$$\begin{aligned} \sigma &= \mathbf{Vt} \\ \mathbf{t} &= (\mathbf{V}^T \mathbf{V})^{-1} \mathbf{V}^T \sigma \end{aligned} \quad (3-75)$$

$$\sigma = \begin{bmatrix} \Delta S_0 / v_0 \\ \Delta S_1 / v_1 \\ \vdots \\ \Delta S_{n-1} / v_{n-1} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{V} = \begin{bmatrix} v_{x,0} & v_{y,0} \\ v_{x,1} & v_{y,1} \\ \vdots & \vdots \\ v_{x,n-1} & v_{y,n-1} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{t} = \begin{bmatrix} \partial S / \partial x \\ \partial S / \partial y \end{bmatrix}$$

gde su  $\Delta S_j / v_j$  nagib površi (gradijent, pad terena) od tačke P u pravcu tačke  $P_j$ , a  $v_{x,j}$  i  $v_{y,j}$  komponente vektora  $v_j$  (Slika 3.28). Metod je numerički stabilan i daje korektne rezultate, sem u slučajevima kolinearnih tačaka. Tada se preporučuje korišćenje proračuna sa osrednjavanjem normala trouglova sa zajedničkim temenom u tački P. U istom radu se takođe navodi da su testiranja pokazala da metod daje dobre rezultate čak i za teren sa naglim promenama visina i da je metod robusan, tačan i da daje nepomerenu ocenu. Jedina ograda je u pogledu korišćenja metode za podatke koji sa nedovoljnom gustinom reprezentuju površ terena.

U radu (Meyer 2002) su prikazani postupci za proračun operatora koji predstavljaju diskretne verzije standardnih operatora iz diferencijalne geometrije. Pri tome se koristi postupak prostornog osrednjavanja. Postupak se sastoji u proračunu različitih **krivina površi** u posmatranoj tački mreže (normalna krivina, glavne krivine i srednja krivina). Na osnovu ovih krivina se onda mogu sračunati tangenta ravan i normalni vektor površi u posmatranoj tački. Kao što je to poznato iz diferencijalne geometrije **normalna krivina**  $\kappa^N(\theta)$  površi u pravcu nekog jediničnog vektora  $e_\theta$  se definiše kao krivina krive koja pripada samoj površi i ravni koja sadrži normalu  $\mathbf{n}$  na površ i vektor  $e_\theta$ . **Glavne krivine**  $\kappa_1$  i  $\kappa_2$  su ekstremne vrednosti normalnih krivina u ortogonalnim pravcima  $e_1$  i  $e_2$ . **Srednja krivina**  $\kappa_H$  predstavlja srednju vrednost svih normalnih krivina na intervalu  $[0, 2\pi]$ . Formule za ove krivine glase (Meyer 2002, Adnađević 1991):

$$\kappa_H = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \kappa^N(\theta) d\theta \quad (3-76)$$

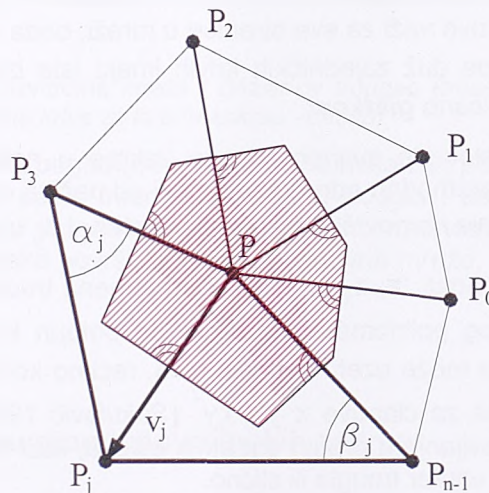
$$\kappa^N(\theta) = \kappa_1 \cos^2(\theta) + \kappa_2 \sin^2(\theta) \quad (3-77)$$

$$\kappa_H = \frac{\kappa_1 + \kappa_2}{2} \quad (3-78)$$

U pomenutom radu izvedena je formula za normalu glavne krivine za diskretni slučaj:

$$\mathbf{K}(P) = 2 \cdot \kappa_H \cdot \mathbf{n} = \lim_{\text{diam}(A) \rightarrow 0} \frac{\nabla A}{A} = \frac{1}{2A_M} \sum_{j=0}^{n-1} (\cot \alpha_j + \cot \beta_j) (\mathbf{P} - \mathbf{P}_j) \quad (3-79)$$

pri čemu je  $A_M$  površina oko temena  $P$  unutar koje se vrši osrednjavanje tj. proračun krivine. Ova površina se bira tako da deli na pogodan način površine trouglova između temena koje čine te trouglove. Ako se za temena poligona koji ograničava ovu površinu uzmu centri opisanih kružnica oko trouglova, onda se dobija površina Voronoi regiona (Slika 3.29). Druga mogućnost je da to budu baricentri trouglova. To mogu biti i bilo koje druge tačke unutar tih trouglova. Komponente normale se jednostavno dobijaju iz prethodne formule normalizacijom vektora  $\mathbf{K}(P)$ . U pomenutom radu su date i formule za proračun ostalih krivina na osnovu triangulacije.



Slika 3.29: Voronoi površina B oko temena  $P$

Opisani postupci su osetljivi na greške (šumove) u rezultatima merenja, na izrazito nepovoljan raspored tačaka i složene površi (površni sa naglim promenama polja normala, tj. krivina). Zato se proračun normala često izvodi istovremeno sa filtriranjem šumova u podacima, kako je to objašnjeno u prethodnom poglavlju. Kada se radi o podacima koji su prikupljeni za opisivanje površi terena, posebno su problematični izduženi trouglovi sa dvema bliskim tačkama. Proračun normala za ove trouglove je vrlo nepouzdan, jer i najmanje promena vrednosti visina u bliskim tačkama utiče na drastičnu promenu vektora normale za trougao. Zato se preporučuje da se ove bliske tačke zamene sa jednom tačkom, ili da se izvrši profinjavanje TIN-a na neki drugi način (poglavlje 3.3.1.3).



Bilo koji postupak da se koristi mora se respektovati diskontinuitet glatкости površi terena zadat prelomnim linijama iz ulaznog skupa podataka. Tačke koje su razdvojene prelomnim linijama ne smatraju se susednim i o tome se mora voditi računa kod izbora susednih tačaka i lokalnih proračuna. Za tačke TIN-a koje pripadaju prelomnim linijama terena vrši se odvojeno računanje izvoda (tangente ravnine, normale) za površ terena sa leve i desne strane prelomne linije.

Za tačke terena koje su prilikom primarnog prikupljanja podataka obeležene kao lokalni ekstremumi ili tačke sedla tangenta ravan, odnosno normala na površ terena su unapred poznate. Naime, tangenta ravan u ovim tačkama je horizontalna, a normala vertikalna.

### 3.3.2.3 Modeliranje DMT-a trougaonim površinskim zakrpama

Jedan od načina da se odrede površinske trougaone zakrpe koje se međusobno spajaju u kontinuitetu duž stranica trouglova TIN-a je da se počne od pretpostavke da se ove zakrpe mogu predstaviti u vidu polinoma odgovarajućeg stepena. Pod pretpostavkom da površ terena leži iznad jedne ravni, tj. da se može predstaviti kao funkcija  $z(x,y) = f(x,y)$ , onda se ta funkcija može predstaviti preko polinoma stepena  $d$  jednačinom

$$z(x,y) = \sum_{i=0}^d \sum_{j=0}^{d-i} a_{ij} x^i y^j. \quad (3-80)$$

U praksi se najčešće koriste polinomi trećeg, četvrtog i petog stepena. Koeficijenti polinoma se određuju iz uslova da površ prolazi kroz date tačke. S obzirom da je broj koeficijenata potpunog polinoma trećeg, četvrtog i petog stepena 10, 15 i 21 respektivno, jasno je da za proračun polinoma za jednu trougaonu zakrpu nema dovoljno ulaznih podataka. Ovaj problem se može rešiti postavljanjem dodatnih uslova, a za neke koeficijente se unapred može zadati vrednost. Dodatni uslovi se najčešće postavljaju tako da se dobije površ sa poželjnim svojstvima. Svakako da je u tom smislu najvažnije svojstvo kontinualnosti i diferencijabilnosti površi. Kod splajnovanja trougaonim površinskim zakrpama najčešće se postavlja uslov da površ poseduje  $G^1(C^1)$ , a ređe i  $G^2(C^2)$  kontinualnost.  $C^0$  kontinualnost duž zajedničke stranice za dva trougla obezbeđuje se time što dve površinske zakrpe koje se računaju za te trouglove imaju zajedničku graničnu krivu duž zajedničke stranice. Ukoliko im je i polje tangenatnih ravni duž te zajedničke krive identično, i ako ovo važi za sve stranice u mreži, onda površ poseduje  $G^1$  kontinualnost. Uopšteno, ako površinske zakrpe duž zajedničkih krivih imaju iste izvode sve do reda  $n$ , onda površ poseduje  $C^n$  kontinualnost, odnosno *glatkost*.

Najčešće se postavlja uslov da sve površinske zakrpe u nekoj tački TIN-a imaju zajedničku tangentnu ravan. Ova ravan se prethodno određuje na neki od načina opisanih u poglavlju 3.3.2.1. Ovom ravni su takođe definisani i normala na površ i prvi izvodi površi  $z_x$  i  $z_y$  u posmatranoj tački TIN-a.

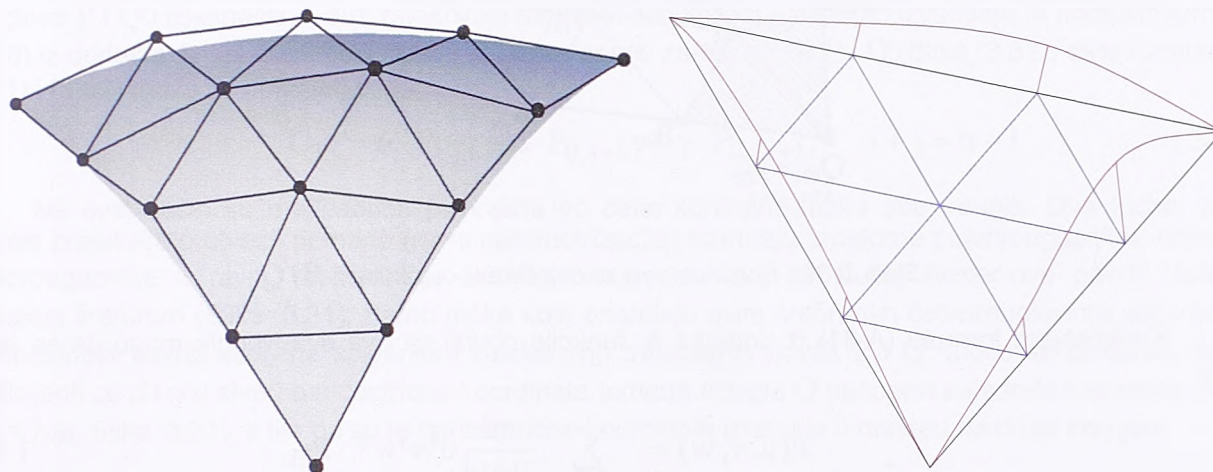
Korišćenjem poznatih vrednosti  $z$ ,  $z_x$  i  $z_y$  za sva tri temena trougla može se postaviti 9 jednačina za proračun koeficijenata kubnog polinoma. S obzirom da potpun kubni polinom ima 10 nepoznatih koeficijenata, za jedan od njih se može uzeti vrednost nula, recimo koeficijent uz član  $xy$ . Drugi način je uzimanje zajedničkog koeficijenta za članove  $x^2y$  i  $xy^2$  (Sekulović 1984). Redukcija broja koeficijenata polinoma se može izvršiti i postavljanjem drugih dodatnih uslova, kao što je na primer uslov da su drugi izvodi dobijene površi konstantni unutar trougla ili slično.

Analogan postupak se može primeniti i kod proračuna koeficijenata polinoma petog stepena za koji treba odrediti 21 koeficijent. Jedan od načina je da se na osnovu polaznog TIN-a i poznatih vrednosti površi u tačkama mreže prethodno sračunaju (ocene) i prvi i drugi izvodi površi ( $z_x$ ,  $z_y$ ,  $z_{xx}$ ,  $z_{yy}$  i  $z_{xy}$ ) za sve tačke TIN-a. Ukupan broj jednačina koji se mogu postaviti za jednu trougaonu zakrpu je  $3 \times 6 = 18$ . Tim uslovima se zahteva da dobijena površinska zakrpa interpolira date tačke trougla i da vrednosti njenih prvih i drugih izvoda budu jednake prethodno sračunatim (ocenjenim) vrednostima. Ovim uslovima se dodaju još tri dodatna uslova kojim se zahteva  $G^1(C^1)$  kontinualnost površi preko stranica trougla. Na taj način se dobija 21 jednačina za određivanje 21 koeficijenta potpunog polinoma petog stepena (Barnhill 1981). Inače, treba napomenuti da treba biti posebno oprezan kada je reč o primeni polinoma petog stepena za modeliranje površi terena. Naime, ovako određene trougaone zakrpe vrlo su osetljive na

raspored merenja i prisutne greške u merenjima. Zato često dolazi i do neželjenih devijacija (oscilacija) dobijene površi. To je i razlog, pored komplikovanog proračuna, zašto se u praksi modeliranje češće izvodi korišćenjem polinoma nižeg stepena.

Splajnovanje trougaonim zakrpama se u praksi ređe implementira na opisani način. Mnogo češće se koristi pristup koji se bazira na korišćenju Bézier-ovih trougaonih površinskih zakrpa, ili ukratko Bézier-ovih trouglova, predstavljenih u formi Bernstein-ovih polinoma i sa baricentričnim koordinatama za parametrizaciju domena. Bézier-ove površi, uz B-splajn površi i generalizovan oblik ovih dveju površi, takozvane NURBS površi (engl. *NURBS – Non Uniform Rational B-Splines*) intenzivno se koriste za potrebe kompjuterski podržanog geometrijskog projektovanja – *CAGD*. Iako su razvijene i tehnike sa konstrukciju B-splajn i NURBS površi nad mrežama nepravilnih trouglova koje ispunjavaju uslove kontinualnosti višeg reda ( $G1$  - kontinualnost) (Garcia 1995), razmatranja u okviru ovog poglavlja su usmerena na rešavanje problema korišćenjem Bézier-ovih trougaonih površinskih zakrpa. U dodatku A je predstavljen matematički aparat za rad sa Bézier-ovim krivama i površima.

Problem se, dakle sastoji u određivanju funkcije  $f$  nad trougaonim domenom  $T \in \mathbb{R}^2$ , koja interpolira poznate tačke i ispunjava dodatne uslove. Ovi uslovi po pravilu uključuju uslov da površ ima unapred definisane tangentne ravni u temenima trougla. Pored ovog uslova može se zahtevati da vrednost krivina površi u temenima trougla bude jednaka zadatim vrednostima, da površ interpolira zadate krive duž stranica trougla i sl. Za Bézier-ov trougao problem se svodi na određivanje tačaka Bézier-ove kontrolne mreže koja predstavlja kontrolni poliedar za traženu površinsku zakrpu (Slika 3.30).



Slika 3.30 : Bézier-ova kontrolna mreža i Bézier-ov trougao (trougaona površinska zakrpa reda 4 – levo, granične krive za kubnu zakrpu - desno)

Po pravilu, jedan Bézier-ov trougao (trougaona površinska zakrpa) odgovara jednom trouglu TIN-a. Za proračun se koristi uslov da površ interpolira temena trougla i da normale na površ (tangentne na površ) u temenima trougla budu jednake unapred zadatim vrednostima. Ove normale se uglavnom računaju na osnovu poznatih tačaka površi, tj. temena osnovne mreže, na način koji je prethodno opisan u poglavlju 3.3.2.2.

### 3.3.2.3.1 Kontinualnost trougaonih površinskih zakrpa

Pored standardnih uslova da površ interpolira vrednosti u poznatim tačkama i da u tim tačkama ima unapred zadate tangentne ravni, postavljaju se i drugi uslovi da bi se dobila površ sa željenim svojstvima. Svakako da je u tom smislu najvažnije svojstvo kontinualnosti i diferencijabilnosti površi.  $C^0$  kontinualnost se podrazumeva, jer bi svakako bilo neprihvatljivo da se dobije površ sa prekidnošću, odnosno rasepima. Obezbeđivanje  $C^0$  kontinualnosti kod predstavljanja površi trougaonim zakrpama se praktično svodi na to da se trougaone površinske zakrpe spajaju u kontinuitetu duž stranica osnovne mreže. Za Bézier-ove trouglove to se postiže zadovoljavanjem uslova da dve površinske zakrpe koje se računaju za susedne trouglove imaju zajedničku graničnu krivu duž zajedničke stranice.

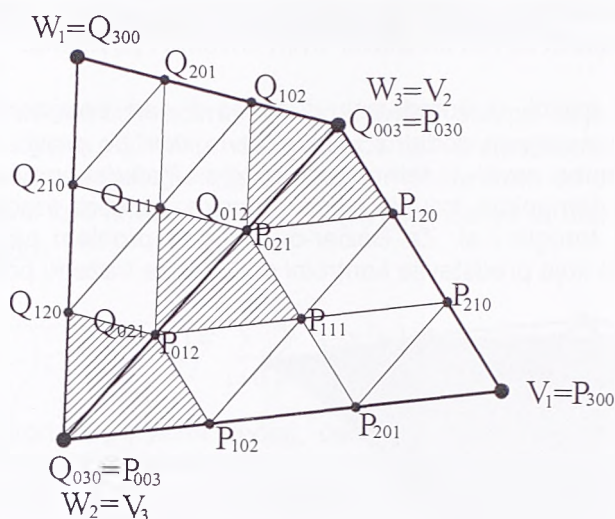
U radu je više puta naglašeno da se u praktičnim modeliranjima uglavnom zahteva da površ, pored  $C^0$  kontinualnosti, bude i diferencijabilna (glatka) zaključno sa izvodima prvog, a nekad i drugog reda ( $C^1$



ili  $C^2$  kontinualnost, tj. glatkost površi), ili bar da se obezbedi kontinualnost u geometrijskom smislu, tj. kontinualnost tangetne ravni ( $G^1$  kontinualnost) i kontinualnost promene zakrivljenosti površi ( $G^2$  kontinualnost). Da bi se ovo obezbedilo kod modeliranja površi korišćenjem Bézier-ovih trougaonih zakrpa koje se međusobno nadovezuju potrebna je primena posebnih procedura. Pre razrade tih procedura treba ustanoviti koji su to uslovi koje susedne trougaone zakrpe, tj. susedne Bézier-ove kontrolne mreže treba da ispune, pa da bi se postigla kontinualnost određenog stepena.

### Uslov $C^0$ kontinualnosti za Bézier-ove trouglove

Posmatrajmo dva Bézier-ova trougla  $P$  i  $Q$  koji imaju zajedničku stranicu (Slika 3.31).



Slika 3.31: Kontinualnost za dva Bézier-ova trougla  $P$  i  $Q$

Korišćenjem formule (A-31) iz dodatka A, funkcije površi za ova dva trougla mogu da se napišu kao:

$$P(u, v, w) = \sum_{i+j+k=n} \frac{n!}{i!j!k!} u^i v^j w^k \cdot P_{ijk} \quad (3-81)$$

$$Q(\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}) = \sum_{i+j+k=n} \frac{n!}{i!j!k!} \bar{u}^i \bar{v}^j \bar{w}^k \cdot Q_{ijk} \quad (3-82)$$

Za tačku  $T$  koja leži na zajedničkoj stranici  $V_2V_3$  baricentrične koordinate za odgovarajuće trouglove su:

$$u = 0, \quad \bar{u} = 0, \quad w = \bar{v}, \quad v = \bar{w} \quad (3-83)$$

Da bi dve površinske zakrpe bile kontinualne neophodno je da polinomi  $P$  i  $Q$  koincidiraju duž zajedničke stranice  $V_2V_3$ , tj. da se za tačku  $T$  dobijaju identične vrednosti za oba polinoma. Izjednačavanjem jednačina (3-81) i (3-82), i vodeći računa o (3-83) dobija se:

$$\sum_{j+k=n} \frac{n!}{0!j!k!} v^j w^k \cdot P_{0jk} = \sum_{j+k=n} \frac{n!}{0!j!k!} \bar{v}^j \bar{w}^k \cdot Q_{0jk} = \sum_{j+k=n} \frac{n!}{0!j!k!} w^j v^k \cdot Q_{0jk} \quad (3-84)$$

Gornje jednakosti će biti zadovoljene ako i samo ako su:

$$P_{0jk} = Q_{0kj} \quad (3-85)$$

Drugim rečima, geometrijski kriterijum za  $C^0$  kontinualnost dveju Bézier-ovih trougaonih površi sa zajedničkom stranicom trougla glasi:

**»Dve Bézier-ove trougaone površi se spajaju u kontinuitetu ako i samo ako su im kontrolne tačke duž zajedničke granice identične.«**

Ovo znači da je u praktičnim primenama, bez obzira na stepen Bézier-ove površi koja se koristi za modeliranje, dovoljno obezbediti da su Bézier-ove kontrolne tačke duž stranica susednih trouglova TIN-a identične, pa da integralna površ ima  $C^0$  kontinualnost. Ovo je sasvim očekivano s obzirom na svojstvo Bézier-ovih trouglova koje kaže da su granične krive Bézier-ove površi Bézier-ove krive istog reda koje zavise samo od kontrolnih tačaka duž odgovarajućih ivica kontrolnog poligona. Ako su ove tačke identične za dva susedna trougla, onda su im i granične krive identične, tako da je obezbeđeno da se susedne trougaone zakrpe nadovezuju bez rascepa.

### Uslov $C^1$ ( $G^1$ ) kontinualnosti za Bézier-ove trouglove

Kontinualnost prvog izvoda ( $C^1$  kontinualnost) dveju susednih Bézier-ovih trougaonih površi koje imaju zajedničku graničnu krivu podrazumeva da te površi imaju identične tangentne vektore u tačkama zajedničkih graničnih krivih (Reiter 1996). Za utvrđivanje uslova čijim bi se zadovoljavanjem obezbedila diferencijabilnost površi, odnosno kontinualnost izvoda površi na spojevima susednih Bézier-ovih trouglova (preko zajedničkih stranica), potrebno je odrediti izvode u pravcu za Bézier-ove površi za trouglove P i Q i izjednačiti ih duž zajedničke stranice. Ne ulazeći u detaljno izvođenje, a koristeći formule (A-40) iz dodatka A, i primenjujući ih na jednačine površi za trouglove P i Q (Slika 3.31), date formulama (3-81) i (3-82) može se pokazati da je:

$$Q_{1ij} = \alpha \cdot P_{1,j,i} + \beta \cdot P_{0,j+1,i} + \gamma \cdot P_{0,j,i+1}, \quad i + j = n - 1 \quad (3-86)$$

Na ovaj način su međusobno povezane po četiri kontrolne tačke oba trougla. Ove tačke, kao i njihove projekcije u oblasti domena (ravni parametrizacije) formiraju prostorne četvorougaoonike, odnosno četvorougaoonike u ravni, respektivno. Ovi četvorougaoonici su, za slučaj Bézier-ove površi reda 3, prikazani šrafurom (Slika 3.31). Samo tačke koje pripadaju ovim šrafiranim četvorouglovima utiču na  $C^1$  kontinualnost površi dobijene spajanjem Bézier-ovih trougaonih površi P i Q. Može se pokazati, da su koeficijenti  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$  u stvari baricentrične koordinate temena trougla Q nasuprot zajedničke stranice (teme  $W_1=Q_{300}$ , Slika 3.31), s tim da su te baricentrične koordinate izražene u odnosu na drugi trougao:

$$W_1 = \alpha \cdot V_1 + \beta \cdot V_2 + \gamma \cdot V_3 \quad (3-87)$$

Na ovaj način je obezbeđeno, ne samo da su parovi trouglova koji formiraju četvorougaoonike koplanarni, već su oni i afina slika trouglova P i Q. Insistiranje na  $C^1$  kontinualnosti može dovesti do postavljanja vrlo strogih zahteva u pogledu oblika zakrpe (Reiter 1996). Ovo je posebno teško za površi sa proizvoljnom topologijom, kakve se inače javljaju u CADG primenama i gde je neophodno parametarsko predstavljanje površi. Na sreću, površ terena je po pravilu znatno jednostavnija i kod nje se ove poteškoće lakše prevazilaze, ili su pak greške modeliranja zanemarljive.

U svakom slučaju, za generalne tipove površi, uslov  $C^1$  kontinualnosti može da se relaksira i svede na to da se zahteva samo  $G^1$  kontinualnost. Ona podrazumeva da dve Bézier-ove trougaone površi imaju zajedničko polje tangentnih ravni duž zajedničkih graničnih krivih. Ove tangentne ravni su definisane četvorougaoonikama koje formiraju parovi trouglova kontrolnih mreža sa zajedničkim stranicama (šrafirani četvorougaoonici, Slika 3.31). Jedan par trouglova iz četvorougaoonika mora biti koplanaran, tj. da predstavlja zajedničku tangentnu ravan. Prema tome, kontrolne tačke koje formiraju četvorougaoonike moraju u prostoru da leže u jednoj ravni. Naravno, ove ravni u opštem slučaju, za različite četvorougaoonike, ne moraju biti iste. Dakle, geometrijski kriterijum za  $G^1$  kontinualnost dveju Bézier-ovih trougaonih površi sa zajedničkom stranicom trougla glasi:

**»Dve Bézier-ove trougaone površi se spajaju sa  $G^1$  kontinuitetom ako i samo ako su za svaki par trouglova za zajedničkom stranicom kontrolne tačke koje čine te trouglova koplanarne.«**

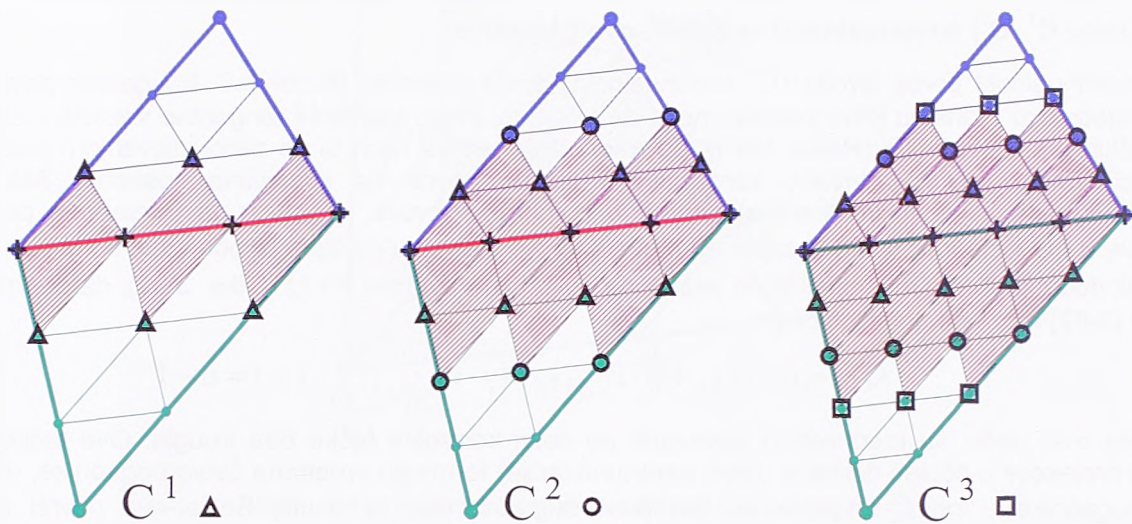
Postoje i druge formulacije uslova za  $G^1$  kontinualnost dveju Bézier-ovih trougaonih površi. Farin (w36, w37) je ovaj uslov formulisao preko odnosa površina trouglova koji po parovima formiraju četvorougaoonike sa dijagonalom na zajedničkoj stranici dva trougla (Mann 1992). Naime, trougaone površi se nastavljaju sa  $G^1$  kontinualnošću ako je odnos površina trouglova koji u paru čine pomenute



četvorouglaonike za sve takve parove trouglova konstantan. Za slučaj kubnih Bézier-ovih trouglova P i Q (Slika 3.31) ovaj uslov glasi:

$$\frac{P_{\Delta}(Q_{120}, Q_{021}, Q_{030})}{P_{\Delta}(P_{012}, P_{102}, P_{003})} = \frac{P_{\Delta}(Q_{111}, Q_{012}, Q_{021})}{P_{\Delta}(P_{021}, P_{111}, P_{012})} = \frac{P_{\Delta}(Q_{102}, Q_{003}, Q_{012})}{P_{\Delta}(P_{030}, P_{120}, P_{021})} \quad (3-88)$$

Na sličan način se dolazi i do uslova za  $G^2$  kontinualnost. Ovde se neće detaljnije ulaziti u ovo razmatranje, uz napomenu da u uslove za zadovoljavanje  $C^n$  kontinualnosti ulazi po  $n$  redova kontrolnih tačaka oba trougla koje pripadaju linijama paralelnim zajedničkoj stranici za dva Bézier-ova trougla. Slika 3.31 sadrži prikaz tačaka koje utiču na  $C^1$ ,  $C^2$  i  $C^3$  kontinualnost za Bézier-ove površi reda 3, 4 i 5, respektivno. Podrazumeva se da površ sa uslovom kontinualnosti  $C^n(G^n)$  takođe ispunjava i sve uslovi kontinualnosti  $C^0, C^1, \dots, C^{n-1}$  ( $G^0, G^1, \dots, G^{n-1}$ ).



Slika 3.32: Uticaj kontrolnih tačaka na kontinualnost susednih Bézier-ovih trougaonih površi

### Problem konzistentnosti temena triangulacije

Poseban problem koji se javlja kod proračuna Bézier-ovih trougaonih površi koje predstavljaju trougaone zakrpe formirane nad triangulacijom, kada se zahteva predstavljanje površi sa zadatim stepenom kontinualnosti, je takozvani problem *konzistentnosti temena triangulacije*. Ovaj problem se javlja kod konstruisanja zakrpa za svaki trougao triangulacije. Čak i uslovi samo za  $G^1$  kontinualnost dovode do sistema uslova oko svake tačke u triangulaciji. Za temena u triangulaciji koja su zajednička za četiri i više trouglova, ove uslove nije moguće u opštem slučaju uvek zadovoljiti. Naime, kontrolne tačke koje utiču na kontinualnost između dva susedna trougla, mogu da utiču i na kontinualnost sa drugim trouglovima koji se susstiču u jednom temenu triangulacije. Tipičan primer je modeliranje površi preko kubnih Bézier-ovih trougaonih zakrpa sa kojima se, bez posebnih procedura, ne može ostvariti  $G^1$  kontinualnost zbirne površi. To je sasvim jasno, jer centralna, i jedina unutrašnja tačka Bézier-ove kontrolne mreže (tačka  $P_{111}$ ) utiče na  $G^1$  kontinualan prelaz preko sve tri stranice trougla.

U literaturi su razvijene brojne metode za prevazilaženje problema konzistentnosti temena, a sa ciljem postizanja  $G^1$  ( $C^1$ ) ili čak  $G^2$  ( $C^2$ ) kontinualnosti površi. U velikom broju ovih postupaka trougaone zakrpe nisu u potpunosti određene tačkama površi, vrednostima normala u njima i uslovima kontinualnosti, tako da se preostali broj parametara zakrpe (preostali stepeni slobode) određuje na izabrani način. Obično je izbor parametara zasnovan na unapred izabranim pretpostavkama. U većini procedura koje su zasnovane na ovakvom pristupu, a posebno za složenije tipove površi sa naglom promenom polja normala, dobija se model površi lošeg kvaliteta i sa ozbiljnim defektima u geometriji površi (Mann 1992). Međutim, ukoliko se ovi parametri biraju tako da se minimalizuje određeni funkcional površi, dobija se površ višeg kvaliteta, ali se cena plaća komplikovanijim proračunom, jer se problem svodi na rešavanje globalnog sistema jednačina.

Neka od rešenja da se problem konzistentnosti temena triangulacije prevaziđe su:

- korišćenje površi višeg reda, uz zahtev da se obezbedi kontinualnost nižeg stepena; primer ovakvog rešenja korišćenje Bézier-ove površi petog stepena uz uslov  $C^1$  kontinualnosti;
- razbijanje trougaone zakrpe na 3 ili više manjih zakrpa, čime se razbija zatvoreni krug uslova kontinualnosti oko jednog temena, tj. povećava broj stepeni slobode;
- konstrukcija trougaone zakrpe mešanjem (engl. *blending*) 3 zakrpe - za svaku stranu trougla po jedna zakrpa; dobijena zakrpa je konveksna kombinacija 3 površinske zakrpe, pa se zato ovi postupci nazivaju još i šeme sa konveksnim kombinacijama
- konstrukcija odgovarajuće, konzistentne mreže graničnih krivih primenom globalnih algoritama optimizacije površi; za svaku stranicu triangulacije konstruiše se po jedna kriva;
- korišćenje postupaka kojima se postiže  $\epsilon$ -kontinualnost površi ( $\epsilon G^1$  umesto  $G^1$  kontinualnosti).

Svaki od pomenutih postupaka ima svoje prednosti i mane. Prvo rešenje je problematično, jer dolazi do velikih oscilacija, tj. defekata u obliku površi koja se dobija. Razbijanjem trougla na manje zakrpe povećava se broj zakrpa za proračun i dalju manipulaciju, a samim tim i komplikuje proračun tačaka na površi i dalje analize. Pri tome se ne dobija uvek površ zadovoljavajućeg kvaliteta da bi to opravdalo usloznavanje proračuna. Ista konstatacija važi i za metode sa proračunom trougaone zakrpe mešanjem tri zakrpe (konveksna kombinacija) koji je takođe komplikovan. Formiranjem konzistentne mreže graničnih krivih, uz globalnu optimizaciju funkcionala površi, dobija se površ dobrog kvaliteta, ali se cena plaća u vidu još složenijeg i obimnijeg procesiranja. Jedno od mogućih rešenja za prevazilaženje pomenutih problema, bar kada su u pitanju trougaone zakrpe, je korišćenje postupaka sa obezbeđivanjem  $\epsilon G^1$  (približne  $G^1$ ) kontinualnosti.

### 3.3.2.3.2 Proračun parametara Bézier-ovih trougaonih zakrpa

Predstavljanje površi preko Bézier-ovih trougaonih zakrpa se praktično svodi na određivanje tačaka Bézier-ove kontrolne mreže za svaki trougao triangulacije (TIN-a). Pri tome se vodi računa o uslovima koje ta površ mora da ispuni u smislu interpolacije vrednosti u tačkama TIN-a, uslova u vidu zadatih tangentnih ravni (normala na površ) i vrednosti krivina u tim tačkama i zahtevanih karakteristika površi (kontinualnost željenog stepena). Za slučaj kada se površ predstavlja funkcijom dve varijable, problem se svodi na određivanje Bézier-ovih ordinata u tačkama kontrolne mreže. S obzirom da su pozicije tih tačaka u oblasti domena određene njihovim položajem u konkretnoj Bézier-ovoj kontrolnoj mreži. Kada je u pitanju modeliranje površi terena te vrednosti ordinata predstavljaju visine.

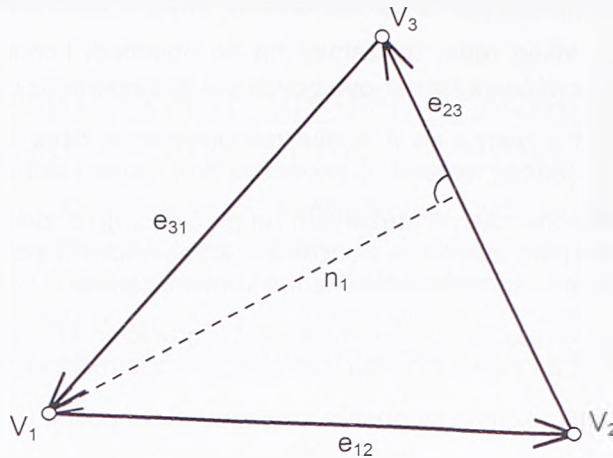
#### **Proračun kubne Bézier-ove trougaone zakrpe**

Pre nego što se pređe na razmatranje postupaka kojima se obezbeđuje  $C^1$  kontinualnost zakrpa preko stranica trouglova, ovde će biti predstavljen postupak kojim se formira najjednostavniji oblik Bézier-ove trougaone zakrpe koja se u praksi koristi. To je kubna Bézier-ova zakrpa. Ova površ je definisana preko 10 tačaka kontrolne mreže (Slika A.4 i Slika A.5, dodatak A). Pored uslova da površ interpolira temena trougla, za proračun je potrebno poznavanje vrednosti normala u temenima trougla. Na taj način se dobija 9 uslova ( $3 \times 1 = 3$  za vrednosti površi i  $3 \times 2 = 6$  za vektore normala tangentnih ravni) za određivanje 10 nepoznatih visina kontrolnih tačaka. Zato je potrebno postaviti i dodatni uslov da bi problem bio određen.

Slika 3.33 prikazuje način označavanja vektora za stranice i normale u trouglu koji se koristi u okviru ovog razmatranja. Raspored i numeracija tačaka Bézier-ove mreže su takođe važne za razumevanje materije koja se izlaže (Slika A.5, dodatak A).

U daljem razmatranju će se podrazumevati da se radi o slučaju modeliranja površi koja je funkcija dveju varijabli, tj.  $S(u,v,w) = f(x,y) = z$ .





Slika 3.33: Označavanje vektora stranica i normala u trouglu

Koordinate  $(x,y)$  za tačke kontrolne mreže se dobijaju po formuli

$$P_{ijk}[x, y] = \frac{i \cdot V_1[x, y] + j \cdot V_2[x, y] + k \cdot V_3[x, y]}{n} \quad (3-89)$$

gde je za kubnu površ  $n=3$ . Prema tome, potrebno je za kontrolne tačke samo odrediti vrednosti ordinata  $Z(P_{ijk})=Z_{ijk}=b_{ijk}$ , tj. vrednosti Bézier-ovih ordinata.

Pošto se zahteva da površ interpolira poznate vrednosti u temenima trougla, onda je:

$$b_{300} = S(V_1) \quad b_{030} = S(V_2) \quad b_{003} = S(V_3) \quad (3-90)$$

Za proračun vrednosti u 6 preostalih kontrolnih tačaka Bézier-ove mreže koje se nalaze na stranicama trougla koriste se vrednosti površi u temenima trougla i vrednosti normala (tangentnih ravni) u tim tačkama, tako da se obezbedi da te tačke leže u tangentnim ravnima definisanim ulaznim podacima (Slika A.5, levo, dodatak A). Tako se dobija da je:

$$\begin{aligned} b_{210} &= S(V_1) + \frac{1}{3} \frac{\partial S}{\partial e_{12}}(V_1) & b_{021} &= S(V_2) + \frac{1}{3} \frac{\partial S}{\partial e_{23}}(V_2) \\ b_{201} &= S(V_1) - \frac{1}{3} \frac{\partial S}{\partial e_{31}}(V_1) & b_{102} &= S(V_3) + \frac{1}{3} \frac{\partial S}{\partial e_{31}}(V_3) \\ b_{120} &= S(V_2) - \frac{1}{3} \frac{\partial S}{\partial e_{12}}(V_2) & b_{012} &= S(V_3) - \frac{1}{3} \frac{\partial S}{\partial e_{23}}(V_3) \end{aligned} \quad (3-91)$$

pri čemu se izvod površi  $S$  u temenu  $V$  u pravcu  $e$  računa po formuli (Adnađević 1991).

$$\frac{\partial S}{\partial e}(V) = \begin{bmatrix} e_x & e_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial S}{\partial x}(V) \\ \frac{\partial S}{\partial y}(V) \end{bmatrix} \quad (3-92)$$

Vrednost površi za poslednju, centralnu tačku  $P_{111}$ , dobija se postavljanjem dodatnog uslova koji trougaona zakrpa mora da ispuni. Obično se koristi uslov kojim se zahteva da površ ima *kvadratnu preciznost*, tj da je u stanju da verno predstavi kvadratnu površ. Ovo znači da ako 9 ostalih tačaka kontrolne mreže leži na kvadratnoj površi, onda će i unutrašnja kontrolna tačka  $P_{111}$  ležati na toj površi. Ovaj uslov će biti zadovoljen ako se vrednost Bézier-ove ordinate u ovoj tački sračuna po formulama (Farin 1993):

$$E = \frac{1}{6}(b_{021} + b_{012} + b_{102} + b_{201} + b_{120} + b_{210}) \quad C = \frac{1}{3}(V_1 + V_2 + V_3) \quad (3-93)$$

$$b_{111} = E + \frac{1}{2}(E - C)$$

Na ovaj način se dobija površ koja ispunjava postavljene uslove. Međutim, na ovaj način se ne postiže  $C^1$  (ni  $G^1$ ) kontinualnost preko stranica trouglova mreže, tj. na spojevima susednih trougaonih zakrpa.

#### Proračun Bézier-ove trougaone zakrpe petog stepena sa $C^1$ kontinualnošću

Za ovaj proračun se koriste vrednosti površi u temenima trougla ( $3 \times 1 = 3$ ), kao i vrednosti prvih ( $3 \times 2 = 6$ ) i drugih izvoda površi ( $3 \times 3 = 9$ ) u tim tačkama. Ukupan broj datih veličina je, dakle,  $3 + 6 + 9 = 18$ . S obzirom da po formuli (A-27), dodatak A, ukupan broj Bézier-ovih kontrolnih tačaka za Bézier-ovu trougaonu zakrpu stepena  $n=5$  iznosi  $M = (n+1)(n+2)/2 = 21$ , jasno je da je za određivanje svih kontrolnih tačaka potrebno postavljanje još tri dodatna uslova.

Pošto se zahteva da površ interpolira poznate vrednosti u temenima trougla, onda su vrednosti Bézier-ovih ordinata u ovim tačkama:

$$b_{500} = S(V_1) \quad b_{050} = S(V_2) \quad b_{005} = S(V_3) \quad (3-94)$$

Proračun vrednosti u 6 kontrolnih tačaka Bézier-ove mreže koje se nalaze na stranicama trougla i i koje se nalaze uz temena trougla, vrši se na osnovu uslova da ove kontrolne tačke leže u tangentnim ravnima površi u tim temenima trougla (Slika A.5, desno, dodatak A). Ove tangentne ravni su definisane normalama na površ terena, tj. poznatim vrednostima prvih izvoda površi u temenima trougla. Tako se dobija da je:

$$\begin{aligned} b_{401} &= S(V_1) - \frac{1}{5} \frac{\partial S}{\partial e_{31}}(V_1) & b_{410} &= S(V_1) + \frac{1}{5} \frac{\partial S}{\partial e_{12}}(V_1) \\ b_{104} &= S(V_3) + \frac{1}{5} \frac{\partial S}{\partial e_{31}}(V_3) & b_{014} &= S(V_3) - \frac{1}{5} \frac{\partial S}{\partial e_{23}}(V_3) \\ b_{041} &= S(V_2) + \frac{1}{5} \frac{\partial S}{\partial e_{23}}(V_2) & b_{140} &= S(V_2) - \frac{1}{5} \frac{\partial S}{\partial e_{12}}(V_2) \end{aligned} \quad (3-95)$$

pri čemu se izvod površi u temenu  $V_k$  u pravcu  $e_{ij}$  (Slika 3.33) računa po formuli (3-92). Na ovaj način su implicitno određene granične krive Bézier-ove trougaone zakrpe.



Formule za proračun vrednosti Bézier-ovih ordinata u ostalim tačkama kontrolne mreže ovde se daju u konačnom obliku, dok se detaljno izvođenje tih formula može naći u literaturi (Barnhil 1981). Visine u preostalim tačkama na stranicama trouglova računaju se na osnovu informacija o krivinama površi, tj. na osnovu poznatih vrednosti drugih izvoda površi u temenima trougla.

$$\begin{aligned}
 b_{302} &= \frac{1}{20} \begin{bmatrix} e_{31_x} & e_{31_y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 S}{\partial x^2}(V_1) & \frac{\partial^2 S}{\partial x \partial y}(V_1) \\ \frac{\partial^2 S}{\partial x \partial y}(V_1) & \frac{\partial^2 S}{\partial y^2}(V_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{31_x} \\ e_{31_y} \end{bmatrix} + 2b_{401} - S(V_1) \\
 b_{203} &= \frac{1}{20} \begin{bmatrix} e_{31_x} & e_{31_y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 S}{\partial x^2}(V_3) & \frac{\partial^2 S}{\partial x \partial y}(V_3) \\ \frac{\partial^2 S}{\partial x \partial y}(V_3) & \frac{\partial^2 S}{\partial y^2}(V_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{31_x} \\ e_{31_y} \end{bmatrix} + 2b_{104} - S(V_3) \\
 b_{032} &= \frac{1}{20} \begin{bmatrix} e_{23_x} & e_{23_y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 S}{\partial x^2}(V_2) & \frac{\partial^2 S}{\partial x \partial y}(V_2) \\ \frac{\partial^2 S}{\partial x \partial y}(V_2) & \frac{\partial^2 S}{\partial y^2}(V_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{23_x} \\ e_{23_y} \end{bmatrix} + 2b_{041} - S(V_2) \\
 b_{023} &= \frac{1}{20} \begin{bmatrix} e_{23_x} & e_{23_y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 S}{\partial x^2}(V_3) & \frac{\partial^2 S}{\partial x \partial y}(V_3) \\ \frac{\partial^2 S}{\partial x \partial y}(V_3) & \frac{\partial^2 S}{\partial y^2}(V_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{23_x} \\ e_{23_y} \end{bmatrix} + 2b_{014} - S(V_3) \\
 b_{230} &= \frac{1}{20} \begin{bmatrix} e_{12_x} & e_{12_y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 S}{\partial x^2}(V_2) & \frac{\partial^2 S}{\partial x \partial y}(V_2) \\ \frac{\partial^2 S}{\partial x \partial y}(V_2) & \frac{\partial^2 S}{\partial y^2}(V_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{12_x} \\ e_{12_y} \end{bmatrix} + 2b_{140} - S(V_2) \\
 b_{320} &= \frac{1}{20} \begin{bmatrix} e_{12_x} & e_{12_y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 S}{\partial x^2}(V_1) & \frac{\partial^2 S}{\partial x \partial y}(V_1) \\ \frac{\partial^2 S}{\partial x \partial y}(V_1) & \frac{\partial^2 S}{\partial y^2}(V_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{12_x} \\ e_{12_y} \end{bmatrix} + 2b_{410} - S(V_1)
 \end{aligned} \tag{3-96}$$

Na sličan način se određuju i Bézier-ove ordinate (visine) za tri unutrašnje kontrolne tačke koje se nalaze uz temena trougla, dakle, koristeći poznate vrednosti ordinata u susednim kontrolnim tačkama i vrednosti drugih izvoda površi u odgovarajućem temenu trougla. Tako se dobija da je

$$\begin{aligned}
 b_{311} &= -\frac{1}{20} \begin{bmatrix} e_{31_x} & e_{31_y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 S}{\partial x^2}(V_1) & \frac{\partial^2 S}{\partial x \partial y}(V_1) \\ \frac{\partial^2 S}{\partial x \partial y}(V_1) & \frac{\partial^2 S}{\partial y^2}(V_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{12_x} \\ e_{12_y} \end{bmatrix} + b_{401} + b_{410} - S(V_1) \\
 b_{113} &= -\frac{1}{20} \begin{bmatrix} e_{31_x} & e_{31_y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 S}{\partial x^2}(V_3) & \frac{\partial^2 S}{\partial x \partial y}(V_3) \\ \frac{\partial^2 S}{\partial x \partial y}(V_3) & \frac{\partial^2 S}{\partial y^2}(V_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{23_x} \\ e_{23_y} \end{bmatrix} + b_{104} + b_{4014} - S(V_3) \quad (3-97) \\
 b_{131} &= -\frac{1}{20} \begin{bmatrix} e_{23_x} & e_{23_y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 S}{\partial x^2}(V_2) & \frac{\partial^2 S}{\partial x \partial y}(V_2) \\ \frac{\partial^2 S}{\partial x \partial y}(V_2) & \frac{\partial^2 S}{\partial y^2}(V_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{12_x} \\ e_{12_y} \end{bmatrix} + b_{414} + b_{041} - S(V_2)
 \end{aligned}$$

Ordinate (visine) za preostale tri unutrašnje tačke kontrolne mreže  $b_{122}$ ,  $b_{221}$  i  $b_{212}$  računaju se tako da se obezbedi  $C^1$  kontinualnost u pravcu upravnom na stranice trougla. Ovo se može postići postavljanjem uslova da su normalni izvodi površi (izvodi površi u pravcu upravnom na stranicu trougla) za sve tačke duž stranica trougla kubni polinomi, a ne polinomi četvrtog stepena. Tada se dobija da je:

$$\begin{aligned}
 b_{122} &= \frac{1}{6}(-c_{01} + 4c_{11} + 4c_{31} - c_{41}) + (1 - L_1)b_{032} + L_1b_{023} \\
 b_{212} &= \frac{1}{6}(-c_{03} + 4c_{13} + 4c_{33} - c_{43}) + (1 - L_2)b_{302} + L_2b_{203} \\
 b_{221} &= \frac{1}{6}(-c_{02} + 4c_{12} + 4c_{32} - c_{42}) + (1 - L_3)b_{230} + L_3b_{320}
 \end{aligned} \quad (3-98)$$

pri čemu su:

$$L_1 = \frac{-e_{31} \cdot e_{23}}{|e_{23}|^2}, \quad L_2 = \frac{-e_{12} \cdot e_{31}}{|e_{31}|^2}, \quad L_3 = \frac{-e_{23} \cdot e_{12}}{|e_{12}|^2} \quad (3-99)$$

$$\begin{aligned}
 c_{01} &= b_{104} - (1 - L_1)b_{005} - L_1b_{014} \\
 c_{02} &= -(1 - L_3)b_{050} - L_3b_{140} + b_{041} \\
 c_{03} &= -L_2b_{401} + b_{410} - (1 - L_2)b_{500} \\
 c_{11} &= b_{113} - (1 - L_1)b_{014} - L_1b_{032} \\
 c_{12} &= -(1 - L_3)b_{140} - L_3b_{230} + b_{131} \\
 c_{13} &= -L_2b_{302} + b_{311} - (1 - L_2)b_{401} \\
 c_{31} &= b_{131} - (1 - L_1)b_{023} - L_1b_{041} \\
 c_{32} &= -(1 - L_3)b_{320} - L_3b_{410} + b_{0311} \\
 c_{33} &= -L_2b_{104} + b_{113} - (1 - L_2)b_{203} \\
 c_{41} &= b_{140} - (1 - L_1)b_{041} - L_1b_{050} \\
 c_{42} &= -(1 - L_3)b_{410} - L_3b_{500} + b_{401} \\
 c_{43} &= -L_2b_{005} + b_{014} - (1 - L_2)b_{104}
 \end{aligned} \quad (3-100)$$

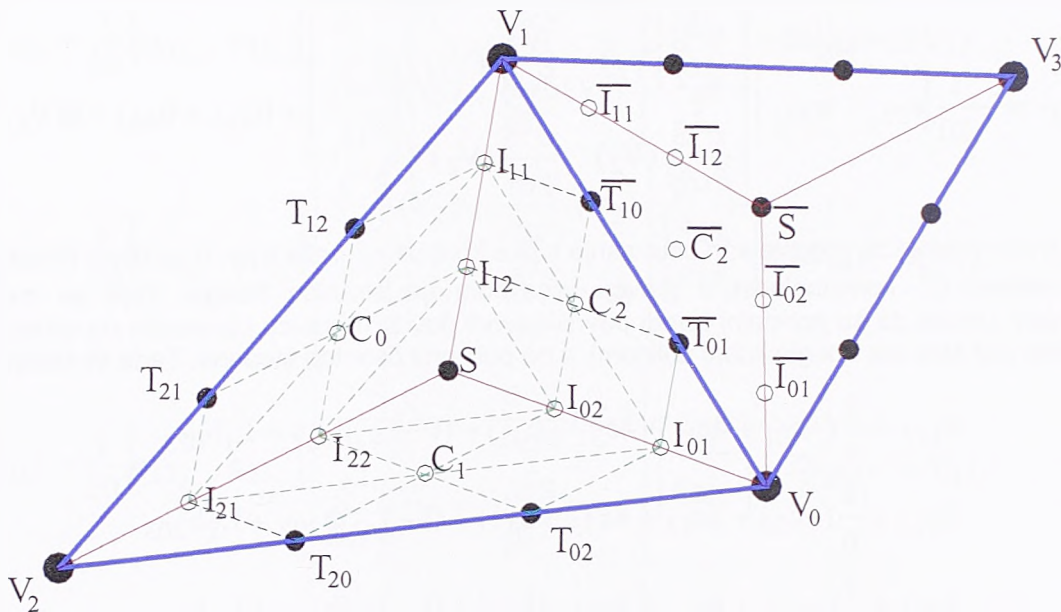
Mana ovakvog načina proračuna, pored toga što je relativno složen, je i to što se dobija površ koja može posedovati veoma izraženo oscilatorno ponašanje. Drugim rečima, raspodela krivina površi unutar



trouglaone zakrpe je neravnomerna. Ovo se može eliminisati postavljanjem dodatnog uslova kojim se postiže minimiziranje zakrivljenosti površi. Koriste se slični postupci kao kod varijacionih metoda ili metoda za diskretno popravljjanje površi.

### Razbijanje trougaone zakrpe na više trougaonih zakrpa radi postizanja $C^1$ kontinualnosti

Ostvarivanje  $C^1$  kontinualnosti kod Bézier-ovih trougaonih zakrpa nižeg stepena (stepen 3 i 4) je moguće razbijanjem trougla na tri mini trougla po takozvanoj Clough-Tocher šemi. Po ovoj šemi svaki Bézier-ov trougao (zakrpa) se razbija na tri manja Bézier-ova trougla (zakrpe) koji imaju zajedničko teme u baricentru osnovnog trougla  $S$  ( $P_{111}, b_{111}$ ) (Slika 3.34). Tačke  $T_{ij}$  se podudaraju sa graničnim tačkama Bézier-ove kontrolne mreže.



Slika 3.34 : Clough-Tocher šema kontrolnih tačaka

Na ovaj način se povećava broj stepeni slobode za jednu kubnu Bézier-ovu zakrpu, pa se ostvaruje mogućnost da se postigne kontinualnost  $C^1$  između susednih Bézier-ovih trouglova pravilnim izborom tačaka  $C_i$ .

Procedura podrazumeva da se Bézier-ove ordinate za kontrolne tačke u temenima i na stranici glavnog trougla (tačke  $V_i$  i  $T_{ij}$ ) odrede na način koji se koristi standardno za proračun kontrolnih tačaka kubne Bézier-ove zakrpe, po formulama (3-90) i (3-91). Tačke  $I_{i1}$  se određuju tako da leže u tangentnoj ravni kod odgovarajućem temena  $V_i$ , što je ekvivalentno sa  $I_{i1} = (V_i + T_{ij} + T_{ik})/3$ . Kontrolne tačke  $C_i$  koje su ključne za  $C^1$  kontinualnost sa susednim trouglovima osnovne mreže, biraju se tako da leže u ravni definisanoj kontrolnim tačkama  $T_{jk}$ ,  $T_{kj}$  i korespondentnom tačkom  $\bar{C}$  sa druge strane zajedničke stranice  $V_jV_k$ . Vrednost ordinata za tačke  $I_{i2}$  se biraju tako da ta ove kontrolne tačke leže u ravni definisanoj tačkama  $C_j$ ,  $C_k$ , i  $I_{i1}$ . Najzad, ordinata tačke  $S$  se određuje kao aritmetička sredina ordinata tačaka  $I_{02}$ ,  $I_{12}$ ,  $I_{22}$ , tj.  $S = (I_{02} + I_{12} + I_{22})/3$ .

Očigledno da su na ovaj način sve vrednosti ordinata u kontrolnim tačkama već unapred određene uslovima da površ interpolira temena osnovnog trougla mreže  $V_i$  i da u njima ima zadate tangentne ravni, kao i uslovima kontinualnosti površi duž stranica mini trouglova. Izuzetak je izbor ordinata za tačke  $C_i$ . Jedini uslov koji ova tačka mora da ispuni je taj da ona leži u istoj ravni kao i tačke  $T_{jk}$ ,  $T_{kj}$  i korespondentna tačka  $\bar{C}$  sa druge strane zajedničke stranice  $V_jV_k$ . U literaturi se može naći više postupaka za određivanje ordinata ovih tačaka (Mann 1998).

Po standardnoj Clough-Tocher šemi Bézier-ova ordinata svake tačke  $C_i$  se bira tako da ta tačka leži u ravni postavljenoj kroz tačke  $T_{jk}$ ,  $T_{kj}$  i vektor  $I_{j1} - \bar{I}_{j1} + I_{k1} - \bar{I}_{k1}$ , gde su  $\bar{I}_{j1}$  i  $\bar{I}_{k1}$  korespondentne tačke sa druge strane granice  $V_j V_k$ . Na ovaj način se dobija površ koja ima  $C^1$  kontinualnost i kvadratnu preciznost.

Farin je predložio drugi postupak kojim se minimizira  $C^2$  diskontinualnost preko stranica osnovnog trougla. Postupak se sastoji u rešavanju sistema linearnih jednačina za svaku granicu. Najpre se korišćenjem formula (3-90) do (3-93) odrede ordinate za sve tačke  $T_{ij}$  i unutrašnju tačku  $S$  osnovnog trougla. Ovime je definisana Bézier-ova zakrpa koja ima  $C^0$  kontinualnost preko granica sa susednim trouglovima. Za postizanje  $C^1$  kontinualnosti trougao se deli na tri mini trougla po Clough-Tocher-ovoj šemi. Ne ulazeći u detaljno izvođenje, ovde se daju samo konačne formule. Prvo se pravouglo koordinata temena  $V_2$  i  $V_3$  izraze u funkciji baricentričnih koordinata susednog trougla:

$$\begin{aligned} V_2[x, y] &= \hat{u}V_3[x, y] + \hat{v}V_1[x, y] + \hat{w}V_0[x, y] \\ V_3[x, y] &= uV_2[x, y] + vV_0[x, y] + wV_1[x, y] \end{aligned} \quad (3-101)$$

Zatim se sračunaju ordinate za tačke  $C_2$  i  $\bar{C}_2$  po sledećim formulama:

$$\begin{aligned} r_1 &= \hat{u}\bar{I}_{12} + \hat{v}\bar{I}_{11} - uI_{12} - wI_{11} \\ r_2 &= \hat{u}\bar{I}_{02} + \hat{w}\bar{I}_{01} - uI_{02} - vI_{01} \\ r_3 &= vT_{01} + wT_{10} \\ a_{11} &= 2(v^2 + w^2) \\ a_{12} &= -2(v\hat{w} + w\hat{v}) \\ a_{22} &= 2(\hat{w}^2 + \hat{v}^2) \\ s_1 &= 2(vr_1 + wr_2) \\ s_2 &= -2(\hat{w}r_1 + \hat{v}r_2) \\ D &= 2ua_{12} + u^2a_{22} + a_{11} \\ \bar{C}_2 &= (us_1 + ua_{12}r_3 + u^2s_2 + r_3a_{11})/D \\ C_2 &= (\bar{C}_2 - vT_{01} - wT_{10})/u \end{aligned} \quad (3-102)$$

Na sličan način se dobijaju i formule za  $C^1$  i  $C^0$  i njihove korespondentne tačke. Pri korišćenju formula treba voditi računa da se svugde gde se pojavljuju oznake kontrolnih tačaka ( $I_{ij}$ ,  $T_{ij}$ ) koriste vrednosti njihovih ordinata. Na ovaj način je postignuta  $C^1$  kontinualnost površi, ali sa kvadratnom preciznošću.

Foley i Opitz su problem  $C^1$  kontinualnosti kubnih Bézier-ovih zakrpa razrešili tako što su formirali hibridnu kubnu zakrpu koja predstavlja rezultat osrednjavanja tri Bézier-ove zakrpe od kojih svaka interpolira podatke u temenima trougla i ima željena svojstva (normalne izvode) duž jedne od granica trougla. Za razliku od Farin-a koji je minimizirao  $C^2$  diskontinuitet Foley i Opitz su formirali sistem jednačina popravaka sa ciljem da dobiju unutrašnju tačku sa kubnom preciznošću. Rezultat su formule za  $S$  i  $\bar{S}$  (Mann 1998):

$$\begin{aligned} S &= (T_{30} - v^2V_0 - 2vwT_{01} - 2vuT_{02} - w^2T_{10} - u^2T_{20} + T_{31} - \\ &\quad v^2T_{01} - 2vwT_{10} - 2wuT_{12} - w^2V_1 - u^2T_{21})/(2wu + 2vu) \\ \bar{S} &= (T_{20} - \hat{w}^2V_0 - 2\hat{w}\hat{v}T_{01} - 2\hat{w}\hat{u}T_{03} - \hat{v}^2T_{10} - \hat{u}^2T_{30} + T_{21} - \\ &\quad \hat{w}^2T_{01} - 2\hat{w}\hat{v}T_{10} - 2\hat{v}\hat{u}T_{13} - \hat{v}^2V_1 - \hat{u}^2T_{31})/(2\hat{v}\hat{u} + 2\hat{w}\hat{u}) \end{aligned} \quad (3-103)$$



Vrednosti ordinata za kontrolne tačke  $C_i$  se onda mogu jednostavno sračunati po formulama:

$$\begin{aligned} C_0 &= (T_{21} + T_{12} + S) / 3 \\ C_1 &= (T_{20} + T_{02} + S) / 3 \\ C_2 &= (T_{10} + T_{01} + S) / 3 \end{aligned} \quad (3-104)$$

Mann (w38) je predložio modifikaciju Farin-ovog postupka kojim se postiže kubna preciznost (Mann 1998). Izmena se sastoji u tome da se u formulama (3-142) umesto ordinata tačaka  $I_{12}$ ,  $I_{11}$ ,  $I_{02}$  i  $I_{01}$  koriste ordinate tačaka  $T_{21}$ ,  $T_{12}$ ,  $T_{20}$  i  $T_{02}$  respektivno.

U literaturi se mogu naći i drugi predlozi kako da se sračunaju ordinate centralnih tačaka  $C_i$  mini trouglova. Jedan od njih je i da se fiksira normalni izvod tako da varira linearno duž granice između dva osnovna trougla mreže. Prema tome, da bi izvod u pravcu  $n_2$  upravnom na stranicu trougla  $e_{01}$  bio linearan, dobija se (Kong 2004):

$$C_2 = [I_{01} + I_{11} + L_2(2T_{10} - T_{01} - V_0) + (1 - L_2)(2T_{01} - V_1 - T_{10})] / 2 \quad (3-105)$$

gde je:

$$L_2 = \frac{-(e_{20} \cdot e_{01})}{|e_{01}|^2} \quad (3-106)$$

U literaturi je opisan i postupak modeliranja površi Bézier-ovim trougaonim zakrpama koji se zasniva na implementaciji Clough-Tocher-ove šeme, a kojim se obezbeđuje da će konstruisana površ imati vrednosti u određenom rasponu (Kong 2004). U radu je pokazano da ako su vrednosti površi (visine) u temenima osnovnog trougla TIN-a (temena Bézier-ovog trougla) veće od neke vrednosti  $L$ , pri čemu je  $L > 0$ , onda je dovoljan uslov da površ nema negativne vrednosti za sve tačke iz domena (unutrašnjost posmatranog trougla) da vrednosti ordinata za sve tačke  $T_{ij}$  i  $C_i$  ispunjavaju uslov:

$$b > -\frac{L}{3a}, \quad a \geq \frac{8}{3} \quad (3-107)$$

Takođe je opisan i algoritam za implementaciju ovog pravila u mreži trouglova. Postupak se sastoji u tome da se za sve trouglove koji imaju zajedničko teme u posmatranoj tački TIN-a obezbedi ispunjenje gornjeg uslova. Jednostavnim modifikacijama postiže se da vrednosti površi za dobijenu trougaonu zakrpu pripadaju izabranom rasponu vrednosti. Ova mogućnost može biti interesantna za sprečavanje pojava značajnijih ondulacija modelirane površi terena.

Svi postupci koji su gore opisani, a koji se baziraju na deljenju domena po Clough-Tocher-ovoj šemi, formiraju kubnu Bézier-ovu trougaonu zakrpu. Naravno, slični postupci se mogu primeniti i za formiranje Bézier-ovih zakrpa četvrtog i višeg stepena. Pored toga, primenom svih prikazanih postupaka dobija se površ koja interpolira vrednosti u poznatim tačkama. Detaljniji i sveobuhvatniji prikaz postupaka za formiranje Bézier-ovih zakrpa sa  $C^1$  kontinualnošću, uključujući tu i postupke sa mešanjem 3 zakrpe za svaki osnovni trougao mreže, dat je u radu (Mann 1992). Svi ti postupci, baš kao i svi postupci koji su ovde prikazani, zasnivaju se na formiranju graničnih krivih za svaku trougaonu zakrpu. Zatim se ostale kontrolne tačke u unutrašnjosti zakrpe biraju tako da površ interpolira formirane granične krive (istovremeno površ interpolira i poznate vrednosti površi u temenima Bézier-ovog trougla), i da se obezbedi  $C^1$  kontinualnost preko susednih trouglova. Zato su i razlike u dobijenim površima minorne. U pomenutom radu se zaključuje da svi prikazani postupci proizvode površi koje imaju izražene, manje-više slične, defekte u pogledu oblika površi. Sprovedena istraživanja ukazuju da je to posledica konstruisanja graničnih krivih i da dobijene površi karakteriše velika koncentracija zakrivljenosti duž graničnih krivih i uz temena trouglova, dok su površinske zakrpe u unutrašnjosti trougla uglavnom zaravnjene. Sve površi imaju diskontinuitete drugih izvoda površi na granicama trougaonih zakrpa tako da su granice zakrpa, pa samim tim i tačke sa poznatim vrednostima uočljive u rezultujućoj površi. Ovo je posebno izraženo kod modeliranja površi sa jako izraženim varijacijama.

Iz pomenutih istraživanja može se zaključiti da se defekti površi mogu ublažiti iznalaženjem kvalitetnijih postupaka za konstrukciju graničnih krivih. Pri tome treba izbeći situaciju koja je standardna za pomenute procedure, a to je da se krivina duž granične krive koncentriše u blizini krajnjih tačaka krive, tj. kod temena trougla (DeBoor 1987). Ispitivanja površi korišćenjem ovakvog načina proračuna graničnih krivih kod gore pomenutih metoda dovela su do poboljšanja, koja su primetnija kod podataka za manjim

varijacijama. Međutim, za ove proračune su potrebni i drugi izvodi površi u temenima osnovne mreže trouglova, a nekad izbor krive nije jednostavan, jer ima, ili više mogućih krivih, ili rešenje po predloženom postupku ne postoji (Mann 1992). Isto tako, predloženi postupak zahteva da granična kriva leži u jednoj ravni, pa je potrebno izabrati korektnu ravan.

### Šeme sa konveksnom kombinacijom (mešanje više površinskih zakrpa)

Postupci koji se baziraju na mešanju više površinskih zakrpa imaju za rezultat jednu površinsku zakrpu za svaki Bézier-ov trougao iz osnovne mreže trouglova (TIN-a). Ove zakrpe su svuda  $C^2$  kontinualne osim u temenima trougla. Na ovaj način se uspešno rešava problem konzistentnosti temena triangulacije. Kao i kod prethodno opisanih postupaka, prvo se za svaku stranicu trougla formira granična kriva sa odgovarajućim poljem tangenčnih ravni da bi se obezbedila  $C^1(G^1)$  kontinualnost površi preko stranica trougla. Zatim se formiraju tri trougaone površinske zakrpe, od kojih svaka interpolira deo podataka na granici trougla. Po pravilu se obezbeđuje da svaka površ interpolira po jednu graničnu krivu na stranici trougla. Konačna zakrpa  $S$  se dobija kao konveksna kombinacija ove tri zakrpe ( $S_1, S_2, S_3$ ), tako da ona interpolira sve podatke na granici trougla, a po formuli:

$$\begin{aligned} S(u, v, w) &= \alpha_1(u, v, w) \cdot S_1 + \alpha_2(u, v, w) \cdot S_2 + \alpha_3(u, v, w) \cdot S_3, \\ \alpha_1(\mathbf{u}) + \alpha_2(\mathbf{u}) + \alpha_3(\mathbf{u}) &= 1 \end{aligned} \quad (3-108)$$

Jedan od mogućih izbora za funkcije  $\alpha_i$  koje predstavljaju težine za površi  $S_i$  je (Mann 1992, Pfeifer 2002):

$$\alpha_1 = \frac{vw}{uv + vw + uw}, \quad \alpha_2 = \frac{uw}{uv + vw + uw}, \quad \alpha_3 = \frac{uv}{uv + vw + uw}, \quad (3-109)$$

pri čemu se težina  $\alpha_1$  odnosi na površ  $S_1$  koja interpolira krivu duž granice trougla  $u=0$ ,  $\alpha_2$  za površ  $S_2$  i krivu duž granice trougla  $v=0$ , a  $\alpha_3$  za površ  $S_3$  i krivu duž granice trougla  $w=0$

Konstatacije vezane za postupke sa deljenjem trougla po Clough-Tocher-ovoj šemi, a koje se odnose na pojave defekta zakrpa, kao i moguća rešenja za njihovo prevazilaženje boljim postupcima za konstrukciju graničnih krivih, važe i za ove postupke interpolacije trougaonim zakrpama.

### Postupci sa konstrukcijom zakrpa sa približnom $G^1$ kontinualnošću ( $\epsilon G^1$ )

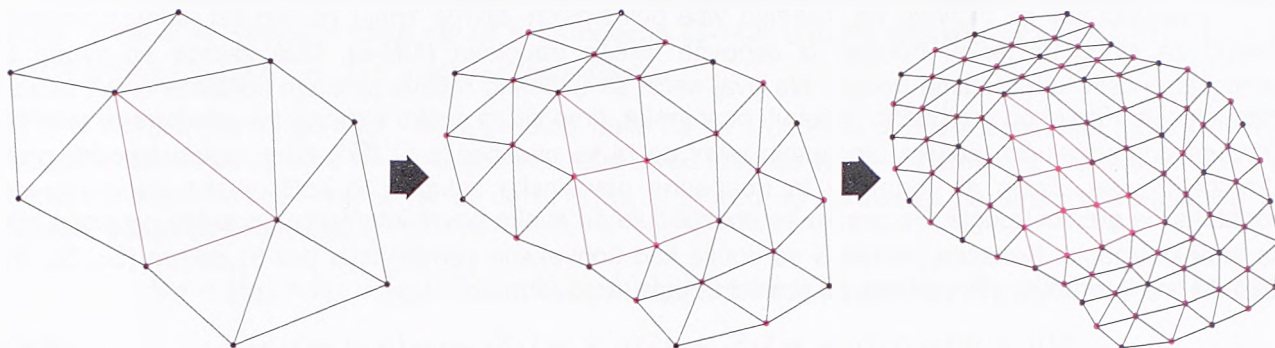
Ovi postupci imaju za cilj smanjivanje defekta površi koji se javljaju kod prethodno opisanih metoda sa  $C^1$  kontinualnošću. Ovde se uslov kontinualnosti olabavljuje, tako da se zadovoljavamo kontinualnošću, tj. odstupanjem tangenčnih ravni na granici zakrpa za iznose koji nisu značajni za date podatke. Jedan postupak za konstruisanje trougaonih Bézier-ovih zakrpa sa  $\epsilon G^1$  kontinualnošću predložen je i detaljno opisao u svojoj doktorskoj disertaciji Pfeifer (Pfeifer 2002). Ovde se neće ulaziti u detaljnije razmatranje predloženog postupka, već se daje samo jedan krajnje uopšteni opis. Postupak započinje konstrukcijom graničnih krivih korišćenjem prethodno ocenjenih normala u temenima trougla. Pri tome se koristi postupak koji bi trebalo da eliminiše gore pomenute probleme sa koncentracijom krivina u blizini temena trougla. Postupak se dalje nastavlja određivanjem unutrašnjih kontrolnih tačaka. Pri tome se koristi lokalna optimizacija i izravnjanje da bi se odredile normale u unutrašnjim kontrolnim tačkama trougla i pri tome minimizirala energija funkcionala (TPS ili membrana).

Za tako određenu zakrpu se proverava kolika su odstupanja tangenčnih ravni (normala) na granicama trouglova. Ako su ta odstupanja veća od izabranog limita, vrši se deljenje trougla na manje trouglove po nekoj od gore pomenutih šema. Pa ipak, konstatovano je da se krivine površi i dalje koncentrišu duž graničnih krivih.



### 3.3.2.4 Sukcesivno deljenje i profinjavanje TIN-a

Ove metode se zasnivaju na ideji da se konačna površ dobije sukcesivnim deljenjem mreže trouglova na manje trouglove koji u svakoj sledećoj iteraciji bolje aproksimiraju površ koja se modelira (Slika A.6). U okviru jedne iteracije svaki trougao trenutne mreže se deli na četiri trougla tako što se na sredinu svake stranice mreže ubacuje po jedna nova tačka.



Slika 3.35: Deljenje mreže; crveno su označena nova temena mreže

Druga mogućnost je da se svaki trougao deli na tri nova trougla ubacivanjem jedne nove tačke u trougao. Na ovaj način se u okviru svake iteracije može dobiti mreža sa stepenom aproksimacije koji odgovara tom nivou podele. Za svaku mrežu na nekom nivou razlikujemo parna i neparna temena. *Parna* (engl. *even*) temena su ona koja su nasleđena od prethodnog nivoa, a *neparna* (eng. *odd*) temena su ona koja su ubačena u okviru iteracije na tom nivou. Temena se još dele prema broju veza na *regularna*, sa 6 veza i na *izvanredna* temena sa brojem veza različitim od 6. Obično se koordinate novih temena određuju kao afina kombinacija (opšta aritmetička sredina) temena iz prethodnog nivoa. Pri tome se za različite šeme podele definišu temena koja učestvuju u proračunu posmatranog temena, kao i težine koje se pri tome dodeljuju tim temenima. Tako se dobija takozvana *maska podele*.

Šeme za sukcesivno deljenje mreža mogu biti *interpolirajuće* ili *aproksimirajuće*. Kod interpolirajućih šema parna temena zadržavaju svoje pozicije iz prethodnog nivoa, dok se kod aproksimirajućih šema nove pozicije određuju, kako za neparna, tako i za parna temena.

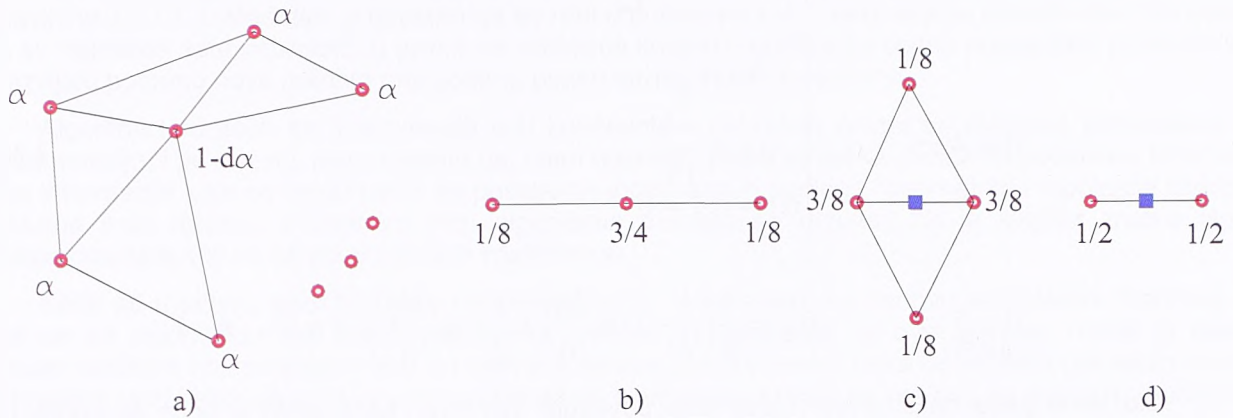
Predstavljanje površi korišćenjem postupaka sukcesivnog deljenja mreža ima svoje prednosti u odnosu na metode trougaonih zakrpa:

- površ može biti predstavljena korišćenjem različitih nivoa detaljnosti (engl. *LOD – Level of Detail*) jednostavnim izborom broja iteracija; štaviše može se koristiti *adaptivno sukcesivno deljenje mreže* da bi se stepen deljenja prilagodio potrebama (deo površi sa složenijom geometrijom ili deo površi bliži posmatraču);
- dobija se površ sastavljena od mreže površinskih trouglova što prikaz i druge analize površi čini jednostavnijim za implementaciju;
- postupak se lako implementira, a proračun je efikasan jer se koriste jednostavna pravila;
- postupak je lokalna.

Mana ovog pristupa je što za čuvanje finih mreža treba dosta memorijskog prostora.

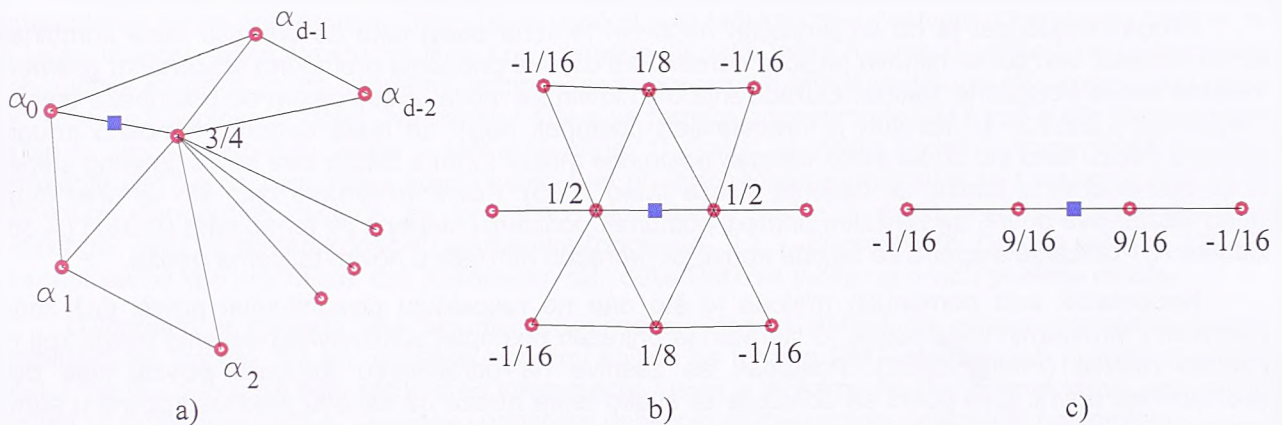
Najpoznatija aproksimirajuća šema je **Loop šema** (Zorin1997, Pfeifer 2002). Ova šema rezultira površi koja je  $C^1$  svugde i  $C^2$  u regularnim temenima mreže. Za granične trouglove dobija se splajn površ stepena tri, a u unutrašnjosti mreže to su zakrpe četvrtog stepena. Slika 3.36 prikazuje maske za proračun parnih i neparnih temena po ovoj šemi. Vrednost  $d$  predstavlja broj veza za parno unutrašnje teme mreže. Vrednosti težina  $\alpha$  za unutrašnja parna temena se mogu izabrati i drugačije.

$$\alpha = \frac{1}{d} \left[ \frac{5}{8} - \left( \frac{3}{8} + \frac{1}{4} \cos \frac{2\pi}{d} \right)^2 \right] \quad (3-110)$$



Slika 3.36 : Loop šema za deljenje mreže trouglova sa maskama: a) za parno unutrašnje teme, b) za parno granično teme, c) za neparno unutrašnje teme i d) za granično neparno teme

Napoznatija aproksimirajuća šema je takozvana Butterfly šema koja daje  $C^1$  površi preko pravilne triangulacije. **Modifikovana Butterfly šema** koju je predložio Zorin daje takođe  $C^1$  interpolirajuću površ, ali za bilo koju triangulaciju (Zorin 1997). Maske za ovu triangulaciju su date na sledećoj slici (Padron 2002, Pfeifer 2002):



Slika 3.37 : Modifikovana Butterfly šema za deljenje mreže trouglova sa maskama: a) za unutrašnje neparno teme između izvanrednog i regularnog temena, b) za unutrašnje neparno teme između dva regularna temena, c) za neparno granično teme

Ako teme pada na stranicu koja povezuje regularno i izvanredno teme, onda se koristi maska za izvanredno teme (Slika 3.37, a). Težina izvanrednog temena je  $3/4$ , a težine za ostala temena se računaju po formulama:



$$\begin{aligned}
 d = 3 &\Rightarrow \begin{cases} \alpha_0 = \frac{5}{12} \\ \alpha_1 = \alpha_2 = \frac{-1}{12} \end{cases} \\
 d = 4 &\Rightarrow \begin{cases} \alpha_0 = \frac{3}{8} \\ \alpha_2 = \frac{-1}{18} \\ \alpha_1 = \alpha_3 = 0 \end{cases} \\
 d \geq 5 &\Rightarrow \alpha_k = \frac{1}{d} \left( \frac{1}{4} + \cos \frac{2\pi j}{d} + \frac{1}{2} \cos \frac{4\pi j}{d} \right), \quad j = 0, \dots, d-1
 \end{aligned} \tag{3-111}$$

Ako teme pada na stranicu mreže koja povezuje dva izvanredna temena onda se koristi prosta aritmetička sredina dveju vrednosti koje se dobijaju koristeći formule (3-111) za oba izvanredna temena.

Deljenje mreža se može izvesti i uz kombinovanje sa varijacionim metodama. Nakon svake iteracije sa ubacivanjem novih temena u mrežu vrši se optimizacija mreže, tj. njeno glačanje. Samo ubacivanje novih temena se izvodi bukvalno na sredinu svake stranice trenutne mreže (u geometrijskom smislu). Optimizacija, tj. glačanje mreže vrši se minimizacijom funkcionala koji je jedna aproksimacija sume kvadrata glavnih krivina u tačkama mreže. Ovom minimizacijom su obuhvaćene sve nove tačke u mreži, bilo da su one ubačene u trenutnoj iteraciji ili u iteracijama pre nje. Ovo dovodi do jednog linearnog sistema jednačina za celu mrežu sa retko popunjenim matricama. Nakon izravnjanja dobijaju se popravljene pozicije svih tačaka u mreži, osim tačaka iz originalne mreže.

Druga mogućnost je da se proračun neparnih temena obavi tako da oni nisu afina kombinacija parnih temena, već da se njihova pozicija odredi tako da one pripadaju prethodno sračunatim **graničnim krivama** svake trougaone zakrpe. Određivanje ovih krivih se može izvesti nekim od postupaka opisanim u poglavlju 3.3.2.3.2. U literaturi je predstavljen postupak kojim se nova temena, odnosno trouglovi, dodaju u mrežu tako što se za svaki trougao postojeće mreže formira Bézier-ova površ četvrtog stepena, pa se njena temena koriste za deljenje mreže (Mao 2005). Površ se formira tako što se prvo formira kubna Bézier-ova površ, pa se zatim primeni postupak *podizanja stepena* po formulama (A-35) i (A-36) iy dodatka A. Podizanje stepena se takođe koristi za proračun normala u novim tačkama mreže.

Nedostatak svih pomenutih metoda je što one ne respektuju diskontinuitet površi duž zadatih prelomnih i strukturnih linija površi. U literaturi je prikazan postupak sukcesivnog deljenja površi koji ovaj problem rešava (Pfeifer 2002). Postupak se zasniva na određivanju **lokalnih površi** koje dobro aproksimiraju površ. Ova površ se određuje za svako teme mreže na osnovu vrednosti površi u samom temenu i na osnovu vrednosti u njegovim susednim tačkama. Pri proračunu lokalne aproksimirajuće površi vodi se računa o eventualnim uslovima i ograničenjima (prelomna linija, vrh, ...). Vrednost za novo teme koje se ubacuje na sredinu postojeće stranice mreže određuje se tako da teme leži na sračunatoj lokalnoj aproksimirajućoj površi. Korišćena je površ drugog reda (polinomi i kvadrike), jer korišćenje kose ravni nije dovoljno, a površ višeg reda bi znatno povećala vreme potrebno za proračun. Analizirane su i aproksimirajuće i interpolirajuće varijante deljenja mreže. Pri tome su najbolji rezultati postignuti kombinovanjem interpolirajućih i aproksimirajućih šema u sukcesivnim iteracijama. Pre primene postupka za deljenje površi neophodno je otklanjanje slučajnih grešaka (šumova) u podacima. Takođe su kombinovani postupci bazirani na određivanju lokalnih površi i standardni postupci deljenja (Loop i modifikovana Butterfly šema). Najbolji rezultati su postignuti deljenjem površi korišćenjem lokalnih aproksimirajućih površi u prvih nekoliko iteracija, a zatim nekoliko postupaka pogodnih za dobijanje glatke površi. Zaključeno je da je modeliranje površi primenom postupaka za sukcesivno deljenje mreža trouglova metoda koja obećava kada je reč o modeliranju površi terena.

### 3.4 Formiranje DMT-a na osnovu digitalizovanih izohipsi

Zbog morfološkog kvaliteta koji sadrže izohipse, kao i količine podataka koji su u prošlosti prikupljeni i pohranjeni u ovom obliku, problemu formiranja DMT-a na osnovu podataka dobijenih

digitalizacijom postojećih podloga posvećena je značajna pažnja u istraživanjima vršenim u poslednjih dvadesetak godina.

Generalno, za potrebe formiranja DMT-a (TIN ili grid DMT-a) na osnovu podataka digitalizovanih sa postojećih podloga može biti primenjena bilo koja od metoda za formiranje DMT-a koje su opisane u poglavljima 3.2 i 3.3. Međutim, s obzirom da se radi o podacima koji u sebi sadrže daleko više informacija koje su najčešće date implicitno, u praksi se najčešće koriste modifikacije opštih numeričkih postupaka ili se razvijaju potpuno nova rešenja prilagođena ovako struktuiranim podacima.

Algoritmi kod kojih se interpolacija vrši korišćenjem pokretnih površi su relativno jednostavni za implementaciju, i po pravilu, nisu u stanju da, osim poznatih visina za tačke iz ulaznih podataka, iskoriste i druge informacije koje se mogu dobiti sa postojećih topografskih podloga (geometrija i topologija izohipsi, strukturne linije terena). Primenom ovih algoritama dobijaju se rezultati čiji je kvalitet znatno ispod kvaliteta rezultata koji se ostvaruju drugim metodama.

Kada su u pitanju geostatističke metode (kriging i kolokacija), na osnovu raspoložive literature ne može se sa sigurnošću dati objektivna ocena njihove primenljivosti za ove potrebe, mada je realno očekivati rezultate koji su znatno bolji od onih koji se dobijaju primenom neke od metoda pokretnih površi. Nešto slično važi i kada je u pitanju metod konačnih elemenata. Metod se zasniva na solidnim teoretskim postavkama i jedini ozbiljan problem kod njene primene predstavlja izrazito neravnomeran raspored visina u ulaznim podacima. Posebni problemi predstavljaju i delovi gde se javljaju vododelnice, vodoslivnice i sedla, jer geostatističke metode nisu u stanju da rekonstruišu površ terena na ovakvim mestima.

Metode sa varijacionim pristupom su u stanju da predvide pojavu lokalnih ekstremuma i da relativno dobro rekonstruišu površ terena u delovima gde se javljaju vododelnice i vodoslivnice. Problem kod ovih metoda je nemogućnost lokalne kontrole oscilacija površi. Sa druge strane, metode su dobre, jer se minimizacijom funkcionala površi dobija vrlo kvalitetna površ.

Metoda koja se u dosadašnjim istraživanjima pokazala kao dosta uspešna je formiranje TIN-a i interpolacija splajn polinomima. Ovde se na osnovu svih tačaka koje učestvuju u formiranju DMT-a, a to su tačke izohipsi, tačke strukturnih linija i pojedinačne visinske tačke formira modifikovana Delaunay-jeva triangulacija sa uslovom da segmenti izohipsi i segmenti strukturnih linija terena obavezno budu prisutni kao stranice trouglova u TIN-u. Na osnovu TIN-a se formira odgovarajući DMT koji može biti konačan ili da se iz njega interpoluju visine u tačkama grida. U praksi se često koristi i druga varijanta. Tu se formiranje DMT-a na bazi TIN-a koristi samo kao predprocesiranje podataka za formiranje grid DMT-a primenom standardnih metoda za kvalitetnu interpolaciju visina u gridu, kao što je to kolokacija (*Heitzinger 2001*) ili metod konačnih elemenata (poglavlje 3.2.3, *Ebner 1980*). Drugim rečima, TIN DMT se koristi samo kao međufaza, dok je konačan cilj i dalje DMT sa tačkama u vidu pravilne mreže.

U literaturi je opisano više algoritama kojima se formira DMT-a na osnovu podataka dobijenih digitalizacijom izohipsi. To su najčešće algoritmi kojima se formira DMT predstavljen pravilnom mrežom tačaka, pa je i glavni cilj ovih algoritama interpolacija visina u tačkama mreže. Prema tome, najznačajniji pristupi za formiranje DMT-a na osnovu podataka dobijenih digitalizacijom postojećih podloga su:

- korišćenjem standardnih metoda interpolacije obrađenih u poglavljima 3.2 i 3.3;
- korišćenje metoda interpolacije razvijenih specijalno za potrebe formiranja DMT-a na osnovu izohipsi;
- pretprocesiranje ulaznih podataka sa ciljem otkrivanja strukturnih linija terena (vododelnice i vodoslivnice) i njihovo uključivanje kod interpolacije korišćenjem neke od standardnih metoda interpolacije obrađenih u poglavljima 3.2 i 3.3.

S obzirom da su standardne metode interpolacije obrađene u poglavljima 3.2 i 3.3 ovde će se opisati samo druga dva pristupa.

### 3.4.1 Specijalne metode formiranja DMT-a na osnovu izohipsi

Podaci sa postojećih podloga su u prošlosti predstavljali jedan od najznačajnijih izvora za formiranje DMT-a. Ova konstatacija posebno važi kada je reč o formiranju DMT-ova koji pokrivaju celu državnu teritoriju ili njen veći deo. Naime, nacionalni programi izrade topografskih podloga srednje i sitne razmere su obezbedili veliku količinu podataka. Ta činjenica je uticala da se vrlo rano razvijaju numerički postupci i



algoritmi kojima se vrši proračun visina, najčešće za tačke raspoređene u vidu pravilne mreže, a na osnovu ulaznih podataka u formi izohipsa. Neki od ovih algoritama su praktično simulirali postupke koji se standardno koriste za manuelno očitavanje visina sa topografskih karata, dok se noviji postupci baziraju na sofisticiranim algoritimima koji uključuju splajnovanje, lokalne aproksimacije polinomima, metode konačnih razlika i minimiziranje zakrivljenosti površi, i druge postupke.

### 3.4.1.1 Interpolacija po pravcu najvećeg pada terena

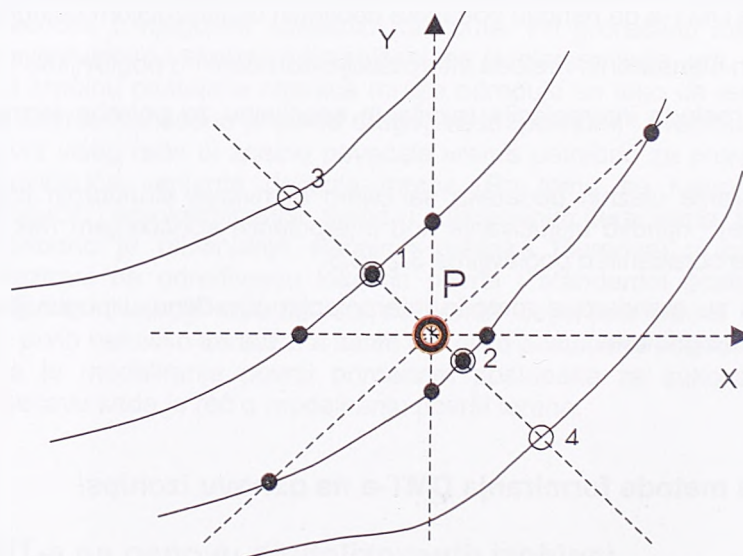
Ovo je jedan od najjednostavnijih algoritama i on se često koristi upravo zbog svoje jednostavnosti za implementaciju. Kroz svaku tačku u kojoj se interpoluje visina postavlja se određeni broj profila. Broj ovih profila je najčešće dva ili četiri, a ređe se postavlja samo jedan profil. Profili su po pravilu paralelni osama koordinatnog sistema. Kada se koriste četiri profila, pored profila paralelnih osama koordinatnog sistema, koriste se i profili koji sa ovim osama zaklapaju ugao od  $45^\circ$ . Za svaki od postavljenih profila se određuje presek profila sa najbližom izohipsom, kako onom sa nižom visinom tako i sa izohipsom sa višom visinom od tačke u kojoj se želi interpolovati visina. Na taj način se dolazi do osam, četiri ili dve tačke sa poznatim visinama koje se nalaze u neposrednoj blizini tačke u kojoj se interpoluje visina. Naravno, polazi se od pretpostavke da je poznata visina za svaku izohipse.

Za računanje interpolovane visine koriste se dva pristupa. Jedan od njih je da se interpolovana visina odredi preko opšte aritmetičke sredine svih tačaka na profilima. Težine se najčešće biraju tako da budu zavisne od rastojanja između tačke na izohipsi i tačke u kojoj se interpoluje visina.

Znatno bolji, i teoretski korektniji pristup je da se korišćenjem linearne ili neke druge interpolacije po izabranom profilu sračuna visina u traženoj tački. Konačna interpolovana visina se onda može sračunati kao opšta aritmetička sredina vrednosti dobijenih iz svih pojedinačnih profila. Težine za visine interpolovane po pojedinim profilima se određuju tako da budu zavisne od rastojanja tražene tačke do preseka datog profila sa najbližom izohipsom.

Duga mogućnost je da se za konačnu interpolovanu visinu izabere visina dobijena na osnovu profila sa najvećim padom terena. Interpolacija duž profila sa najvećim padom u najvećoj meri odgovara pristupu koji se koristi kod manualnog određivanja visina za tačke na planu ili karti, a na osnovu izohipsa. Kao što je to dobro poznato, kod manualnog određivanja visine u nekoj tački karte, prvo se određuje koje su to susedne izohipse između kojih tačka pada. Razlikuju se dva slučaja:

- tačka pada između dve izohipse različite visine;
- tačka pada u područje ograničeno, jednom, dvema ili više izohipsi sa istim visinama.



Slika 3.38: Interpolacija po profilu sa najvećim padom

U prvom slučaju, koji je i najčešći, tačka se nalazi na delu terena koji je u nagibu. Visina za tačku se određuje tako što se od svih profila izabere onaj sa najvećim nagibom terena. Tražena visina se, onda može odrediti linearnom interpolacijom duž tog profila, a na osnovu visina izohipsi koje taj profil seče:

$$z_p = \frac{z_2 d_1 + z_1 d_2}{d_1 + d_2} \quad (3-112)$$

Druga opcija je korišćenje Hermite interpolacije po formulama:

$$\begin{aligned} t_i &= s_i \frac{d_1 + d_2}{z_2 - z_1}, & i &= 1,2 \\ u_1 &= d_1 + t_1 d_2, & u_2 &= d_2 + t_2 d_1 \\ z_p &= \frac{z_2 d_1 u_1 + z_1 d_2 u_2}{d_1 u_1 + d_2 u_2}, \end{aligned} \quad (3-113)$$

Vrednosti  $s_i$  predstavljaju nagibe (pad) terena u tačkama 1 i 2 na izohipsama. Ovi nagibi se mogu sračunati po sledećoj formuli:

$$s_1 = \frac{z_2 - z_3}{d_{13} + d_{12}}, \quad s_2 = \frac{z_4 - z_1}{d_{12} + d_{24}} \quad (3-114)$$

U drugom slučaju radi se o tačkama koje pripadaju delu terena koje sadrži vrh, dno ili sedlo. U svakom od ovih slučajeva potrebno je poseban pristup i analiza da bi se odredila tražena visina u datoj tački. Najčešće se onda posmatraju i okolne izohipse i na osnovu toga donosi se odluka na koji način da se odredi visina u toj tački. Ako tačka pada u područje ograničeno jednom izohipsom onda se radi o vrhu brda ili dnu doline, a u zavisnosti od izohipse koja obuhvata posmatranu izohipsu. U ostalim slučajevima radi se o tačkama koje čine sedlo.

Sledeća opcija je da se koristi kubna interpolacija duž profila sa najvećim padom (Clarke 1982). U tom slučaju potrebno je odrediti ne samo tačke u preseku sa susednim već i izohipsama do njih. Na taj način se na profilu dobijaju četiri tačke sa poznatim visinama. Može se primeniti interpolacija primenom kubnog polinoma ili interpolacija kubnim splajnom primenom sledećih formula:

$$\text{kubni polinom: } z = ax^3 + bx^2 + cx + d \quad (3-115)$$

$$z = a_i(x - x_i)^3 + b_i(x - x_i)^2 + c_i(x - x_i) + d_i$$

$$\text{kubni splajn: } z' = 3a_i(x - x_i)^2 + 2b_i(x - x_i) + c_i \longrightarrow \text{kontinualna} \quad (3-116)$$

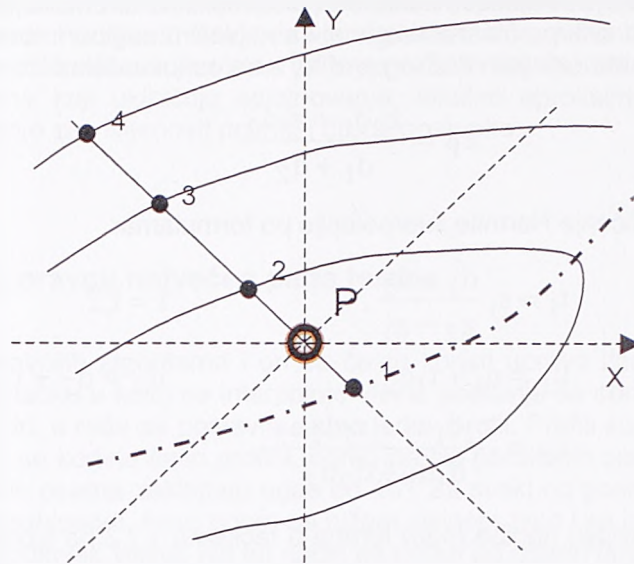
$$\begin{aligned} z'' &= 6a_i(x - x_i) + 2b_i && \longrightarrow \text{kontinualna} \\ &(i = 1,2,3) \end{aligned}$$

Primenom kubnog splajna postižu se bolji rezultati, jer kubni polinom za određene vrednosti visina i nepravilne rasporede tačaka daje vrlo nestabilne rezultate. Postupak je moguće primeniti i u slučaju kada se u ulaznim podacima raspolaže sa strukturnim i prelomnim linijama terena (Slika 3.39). Tada se za interpolaciju koriste i tačke u kojima profil seče strukturne i prelomne linije terena.

U literaturi se mogu naći i druge metode koje se zasnivaju na linearnoj, kubnoj ili nekoj drugoj interpolaciji po profilima najvećeg pada terena. Jedan od mogućih postupaka je da se ne koriste profili po unapred definisanim pravcima, već da se za svaku tačku u kojoj se interpoluje visina odrede najkraća rastojanja do susednih izohipsi. Dalji postupak je isti kao i za slučaj profila sa najvećim padom.

Primer ovakvih metoda je metod koji se zasniva na rasterskom procesiranju (Fukue 1990). Kod ovog metoda se u okviru rasterske slike sa digitalizovanim izohipsama najpre vrši postupak određivanja regiona između izohipsi tj. pripadnost piksela slike ovim regionima. Za svaki piksel nekog regiona se određuje najkraće rastojanje do izohipsi koje ograničavaju taj region. Visina za dati piksel se onda jednostavno dobija primenom linearne interpolacije korišćenjem ovih rastojanja i poznatih visina izohipsi. Postupak se može profiniti određivanjem rastojanja i do susednih izohipsi. U tom slučaju se može primeniti kvadratna ili kubna interpolacija.





Slika 3.39 : Respektovanje strukturalnih linija terena kod interpolacije po profilu sa najvećim padom

Dobra strana kod ove metode je što ona u velikoj meri prati konvencionalni način interpolacije visina koju operater vrši na osnovu izohipsi iscrtanih na karti. To u izvesnoj meri upućuje na zaključak da će interpolovana visina imati dobru vrednost. Glavni nedostatak metode je u tome što kod konvencionalnog načina rada operater može korektno da interpoluje visinu i na mestima gde nedostaju izohipse, dok je to vrlo teško algoritamski razrešiti. Pored toga, algoritam nije u stanju da respektuje karakteristične tačke terena. Sa druge strane, algoritam može biti vrlo interesantan kao dopuna za neke druge metode interpolacije. Drugim rečima, ova metoda bi se mogla koristiti za proglašavanje ulaznih podataka sa novim tačkama u područjima u kojima nema dovoljno tačaka sa poznatim visinama, ili na kritičnim mestima (doline, vrhovi, vododelnice, vodoslavnice). Tako proglašeni podaci bi se zatim mogli obraditi nekom od sofisticiranijih metoda kao što je to linearna predikcija po metodi najmanjih kvadrata ili neka od metoda konačnih elemenata. Uz ove dodatne podatke, generalno bi se postigao ravnomerniji raspored tačaka u ulaznim podacima i sprečila mogućnost loše interpolacije na kritičnim mestima, što bi rezultiralo podizanjem kvaliteta interpolovanog DMT-a, kako u visinskom (apsolutnom), tako i u morfološkom smislu.

Ono što predstavlja nedostatak kod ovih metoda je to što ovi algoritmi nisu u stanju da iskoriste i podatke u drugom obliku sem izohipsi, što značajno umanjuje kvalitet dobijenog DMT-a. Istraživanja su pokazala da DEM generisan na osnovu pravca najvećeg pada izborom između predefinisanih pravaca (Slika 3.38) sadrži dosta radijalnih šumova. Ovi šumovi su posledica izbora profila po tačno određenim pravcima. Problem bi se mogao eliminisati određivanjem pravca najvećeg pada, korišćenjem najkraćih rastojanja od interpolovane tačke do susjednih izohipsi, a ne izborom jednog od predefinisanih profila.

### 3.4.1.2 Metode sa rasterskim pristupom

Razvoj procedura za digitalnu obradu slika i rad sa rasterskim GIS podacima uticao je i na razvoj rasterski baziranih postupaka za interpolaciju DEM-a na osnovu podataka digitalizacije izohipsi.

Jedan od tih postupaka je postupak implementiran u GRASS softveru za podršku rasterskom GIS-u. Postupak podrazumeva da se izohipse prvo predstavu u formi rastera. Zatim se svakoj ćeliji DEM-a (mreža visina u pravilnom gridu) koju preseca neka izohipsa dodeljuje visina te izohipse. Za preostale ćelije se vrši određivanje i memorisanje dva rastojanja do najkraćih izohipsi i visine tih izohipsi. Visine ćelija se dobijaju linearnom interpolacijom iz ovih podataka po formuli (3-112).

Drugi postupak koji se može naći u literaturi je takozvani **postupak sa baferisanjem** (Takagi 1996). Koristi se standardna procedura iz rasterskog GIS-a za baferisanje slike. Baferisanjem se može za svaki piksel slike odrediti rastojanje do bilo koje tačke, linije ili poligona na slici. Ovo rastojanje se onda čuva kao atribut (vrednost) uz svaki piksel slike. Kod interpolacije DEM-a primenom baferisanja koristi se pristup po kome se svim pikselima koji se nalaze na jednakom rastojanju od dveju susjednih izohipsi dodeljuje visina koja je jednaka prostoj aritmetičkoj sredini visina tih izohipsi. Baferisanjem, tj.

povećavanjem regiona izohipse se podebljavaju svaki put za po jedan red piksela. Na taj način dobiće se slika kod koje su izohipse predstavljene trakama širine više piksela. Svi pikseli jedne trake imaju istu vrednost. Susedne izohipse se međusobno dodiruju i pikseli koji se nalaze na granicama dveju traka su u stvari pikseli na polovini ekvidistancije. Njima se tako može jednostavno odrediti visina. U sledećoj iteraciji postupak se ponavlja koristeći originalne i interpolovane izohipse na polovini ekvidistancije. Postupak se iterativno ponavlja dok se za sve piksele rasterske slike (DEM) ne odrede visine. Za piksele koji se nalaze unutar jeden izohipse potrebna je primena drugačije procedure. Postupak se sastoji u prethodnom određivanju visine za tačku koja predstavlja lokalni ekstremum unutar izohipse. Pri tome se koristi prosečna ondulaciona kriva za dati tip terena.

Pored ovih, u literaturi se mogu naći i drugi rasterski postupci. Jedan kompleksan rasterski postupak podrazumeva i rastersku triangulaciju ulaznih podataka i automatsku detekciju strukturnih linija terena korišćenjem procedura sličnih gore opisanim (Tang 1991, Tang 1992, Tang 1992a). Te procedure su detaljnije opisane u poglavlju 3.4.2.2, s obzirom da je naglasak kod njih više na samom postupku triangulacije i otkrivanju strukturnih linija terena.

### 3.4.1.3 Metod konačnih razlika sa uslovom odvodnjavanja

Hutchinson je razvio poseban postupak za interpolaciju DEM-a na osnovu izohipsi modifikacijom postojećih postupaka za interpolaciju po metodi konačnih razlika (Hutchinson 1988, Hutchinson 1989, Hutchinson 1996, w21). Osnovni pristup koji se koristi kod metode konačnih razlika je zadržan, s tom razlikom što se umesto minimizacije krivina interpolovane površi, vrši minimizacija krivine profila sa najvećim padom. Na taj način se postiže da interpolovana površ automatski odgovara površi koja je rezultat procesa kojima se formira površ terena. U suštini, radi se o diskretizovanoj verziji metode sa tankim pločama (TPS, poglavlje 3.2.4). Postupak je implementiran u okviru softvera ANUDEM.

Za tačke grida, pored uslova o minimizaciji krivina površi, uvode se i dodatni uslovi u smislu pravaca oticanja vode. Ovim uslovima se postiže:

- dobijanje povezane strukture za oticanje vode; ovo se postiže postavljanjem globalnog uslova za oticanje vode za sve tačke grida čime se automatski uklanjaju sve suvišne depresije; zadavanjem dodatnih uslova na osnovu ulaznih podataka u formi vododelnica i vodoslivnica obezbeđuje se respektovanje tih podataka i korektno predstavljanje površi terena na mestima gde postoje ovi podaci
- korektna rekonstrukcija površi terena na mestima gde su izohipsama implicitno definisane vododelnice i vodoslivnice; ovo se vrši ubacivanjem vododelnica i vodoslivnica na odgovarajuća mesta, a na osnovu analize zakrivljenosti izohipsi.

Dakle, uslovi za korektno modeliranje vododelnica i vodoslivnica se mogu dobiti automatski korišćenjem samog algoritma za forsiranje oticanja vode, ili iz prethodno unetih podataka o hidrografiji. Ovi poslednji podaci se najčešće obezbeđuju digitalizacijom hidrografije sa postojećih podloga ili nekom od fotogrametrijskih metoda prikupljanja podataka. Na samom početku procedure za interpolaciju DEM-a vrši se formiranje jednog generalizovanog modela za oticanje voda. Identifikacijom područja sa maksimalnom lokalnom zakrivljenošću svake izohipse, utvrđuju se područja sa najvećim padom i formira mreža vododelnica i vodoslivnica.

Ovo je posebno važno za hidrološke analize, jer dobijena površ poseduje strukturu koja omogućava oticanje vode sa modelirane površi terena na način koji odgovara realnoj situaciji na terenu. Ovo je rezultat same prirode površi terena, za koju je voda jedna od primarnih erozionih sila. Zato površ terena i ima dosta vrhova (lokalni maksimumi) i malo depresija (lokalni minimumi). Treba napomenuti da se program ponaša konzervativno kada je reč o uklanjanju depresija i neće postaviti uslove oticanja na lokacijama gde bi to bilo u kontradiktornosti sa ulaznim podacima. Predviđeno je zadavanje posebnog parametra kojim se definiše prag tolerantnosti za promenu visina ulaznih podataka koja bi nastala eliminisanjem depresija.

Obzirom da se radi o lokalnoj metodi, postavljanjem graničnih uslova omogućena je velika fleksibilnost u pogledu predstavljanja strukturnih linija terena, uključujući tu i prelomne linije i litice. Ulazni podaci mogu biti:

- visinske tačke;



- tačke depresija;
- linije vododelnica;
- granice poligona;
- linije izohipsi;
- granice jezera;
- linije litica;
- maske poligona.

U okviru ovog postupka razvijene su i implementirane dve važne modifikacije standardne metode interpolacije sa konačnim razlikama. Prva je već pomenuta zamena kriterijuma za optimizaciju površi, gde se umesto minimizacije krivina interpolovane površi, vrši minimizacija krivine profila sa najvećim padom. Ova minimizacija u velikoj meri zavisi od procene pravca najvećeg pada terena. Ova procena se izvodi kroz jedan iterativni postupak. Druga modifikacija se odnosi na uvođenje procedura za statističku analizu grešaka diskretizacije površi terena korišćenjem pravilnog grid DEM-a zadate rezolucije (veličine ćelije grida).

Kao i kod metoda sa varijacionim pristupom (poglavlje 3.2.4) omogućeno je deljenje područja interpolacije na manje celine (pravougaonike) koji se međusobno preklapaju da bi se obezbedio kontinuitet površi i njenih funkcionala. Da bi se povećala efikasnost proračuna koristi se princip rada sa promenljivom rezolucijom grida, tj. veličine ćelija grid DEM-a. Iterativni postupak započinje rešavanjem problema korišćenjem jednog grida sa velikom ćelijom grida. U svakoj sledećoj iteraciji koristi se finiji grid, sve do poslednje iteracije u kojoj se koristi konačna veličina ćelije grida. Početne vrednosti u svakoj iteraciji se dobijaju bilinearnom interpolacijom iz grida sračunatog u prethodnoj iteraciji.

Jedan od uočenih nedostataka ove metode je prejak uticaj izohipsi na modeliranu površ terena. Ovo rezultira blagim zaravnjenjem površi terena na mestima gde ona prelazi preko izohipse (ESRI 2004).

Poslednja verzija ovog programa je ANUDEM 5.1. Softver se već dve decenije koristi za formiranje DEM-a za ceo australijski kontinent (w21). Isti algoritam je implementiran u okviru *Topo To Raster* metode interpolacije koja je na raspolaganju u okviru *Spatial Analyst* ekstenzije GIS softvera *ArcGIS* firme *ESRI* (w33). U uputstvu za *ArcGIS* se navodi da je to i jedini metod interpolacije implementiran u okviru ovog paketa koji je u stanju da inteligentno formira DMT na osnovu izohipsi (ESRI 2004).

### 3.4.2 Otkrivanje strukturnih linija terena i njihovo korišćenje za formiranje DMT-a

Kod rekonstrukcije površi terena na osnovu podataka u formi izohipsi vrlo često se polazi od pretpostavke da izohipse sadrže veliko bogatstvo informacija o morfološkim svojstvima površi terena. Zato je za izradu kvalitetnog DMT-a potrebno analizom izohipsi izvršiti ekstrakciju karakterističnih formi površi terena, a zatim ih iskoristiti kod modeliranja površi terena tj. formiranja DMT-a. Primenom pomenutog pristupa značajno se smanjuju opasnosti od gubitka informacija i bitnih detalja kada su u pitanju morfološke karakteristike terena.

Detekcijom i ugradnjom morfoloških karakteristika terena u DMT postiže se više efekata:

- tačnost DMT-a, tj. tačnost interpolacije visina iz DMT-a u područjima sa prisutnim morfološkim formama kao što su vododelnice, vodoslivnice, sedla, vrhovi i dna se povećava;
- podiže se kvalitet predstave površi terena u smislu očuvanja njegovih morfoloških karakteristika, što je često preduslov za korišćenje DMT-a za određene vrste analiza (tipičan primer su hidrološke analize);
- smanjuju se opasnosti od gubitka informacija i bitnih detalja kada su u pitanju morfološke karakteristike terena, ali se i očuvava sama tačnost DMT-a prilikom generalizacije ili filtriranja podataka.

Zbog toga je rekonstruisanje informacija koje su implicitno sadržane u izohipsama jedan od ključnih momenata kada je u pitanju rekonstrukcija površi terena na osnovu podataka dobijenih digitalizacijom postojećih podloga. Ove informacije se mogu rekonstruisati na osnovu:

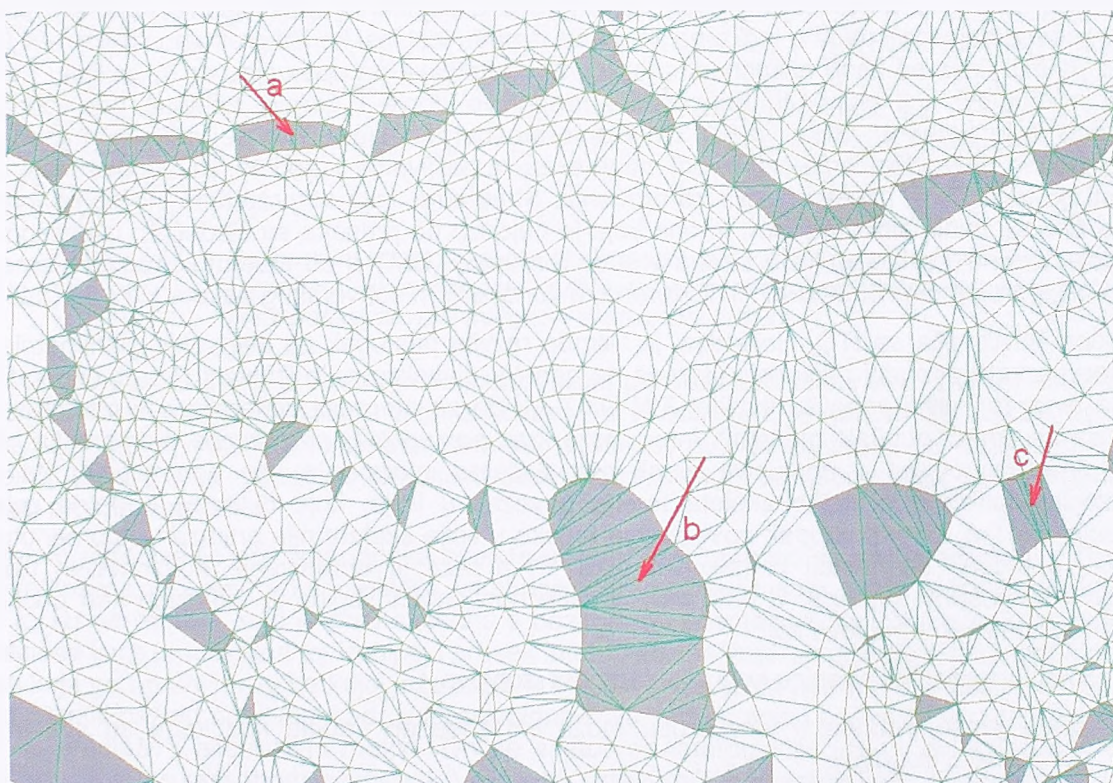
- geometrije i topologije izohipsi;
- poznatih karakteristika površi terena, i
- pravila koja su korišćena prilikom konstruisanja i iscrtavanja izohipsi.

U literaturi se može naći veliki broj razvijenih algoritama koji imaju za cilj ekstrakciju ovih informacija i njihovo korišćenje kod rekonstrukcije površi terena, tj. formiranja DMT-a. U okviru ovog poglavlja dat je kraći pregled ovih algoritama. Neke ideje implementirane u okviru ovih algoritama korišćene su i za razvoj numeričkog postupka u okviru ovog istraživanja.

Ovi postupci se mogu uslovno podeliti u dve grupe. U prvu grupu spadaju postupci koji se zasnivaju na formiranju TIN DMT-a kod koga su segmenti izohipsi zastupljeni kao stranice mreže trouglova. U drugoj grupi su postupci koji se zasnivaju na analizi grid DMT-a. Postupci iz prve grupe se znatno češće sreću u naučnoj literaturi.

### 3.4.2.1 Postupci bazirani na TIN DMT-u

Zajedničko za sve postupke iz ove grupe je da se oni baziraju na analizama koje se sprovode nad TIN-om. Najčešće je taj TIN dat u vidu ograničene Delaunay-jeve triangulacije - CDT, ali se nekad koristi i konformna Delaunay-jeva triangulacija (poglavlje 3.3.1.2). U svakom slučaju, segmenti izohipsi se po pravilu tretiraju kao obavezni segmenti triangulacije. Letimičnom analizom dobijenog TIN-a može se uočiti pojava velikog broja horizontalnih trouglova (Slika 3.40). Jasno je da na ovim mestima teren najčešće nije horizontalan. Takođe se može zaključiti da se upravo na ovim mestima javljaju i karakteristične forme terena (vododelnica, vodoslivnica, vrh i sedlo) koje su od suštinske važnosti za morfološku karakterizaciju terena. Upravo ovo je navelo mnoge istraživače da svoje algoritme baziraju na posebnoj analizi terena u područjima gde se javljaju ovi horizontalni trouglovi. Glavne razlike kod razvijenih postupaka ogledaju se u načinu određivanja geometrije strukturnih linija i karakterističnih tačaka terena koji se javljaju u ovim područjima (regionima), ali i kod kasnijeg korišćenja ovih podataka za modeliranje i rekonstrukciju površi terena.



Slika 3.40 : Pojava horizontalnih trouglova kod TIN-a na osnovu podataka u vidu izohipsi (a – vodoslivnica, b – vrh sa vododelnicom, c – sedlo )

Moguća podela ovih postupaka se može izvršiti na osnovu toga da li se radi o postupcima zasnovanim na korišćenju vektorskih ili rasterskih analiza. Rasterske analize se uglavnom zasnivaju na



postupcima transformacije udaljenosti, tj. postupcima sa transformacijom na srednju osu (engl. *medial axis*). Srednja osa inače predstavlja skup tačaka koje su na podjednakom rastojanju od granica. U oblasti digitalne obrade slika standardna operacija za određivanje ovih osa je takozvani **MAT** algoritam za transformaciju slike (engl. *Medial Axis Transformation*). Srednje ose za rastersku sliku sa izohipsama sadrže sve piksele slike koje su na podjednakom rastojanju od piksela izohipsi.

Za određivanje strukturnih linija terena interesantne su samo one srednje ose koje se nalaze na podjednakom rastojanju od izohipsi sa istim visinama. Vektorski postupci koriste više različitih pristupa. Mnogi od ovh postupaka, baš kao i kod rasterskih metoda, koriste pristup po kome se pretpostavlja da se strukturne linije terena (ili linije skeleta terena) približno poklapaju sa linijama koje čine podskup linija iz skupa srednjih osa izohipsi.

### 3.4.2.1.1 Vektorske analize

Najveći deo postupaka koji su publikovani u literaturi može se svrstati u ovu grupu. Skoro svi postupci polaze od toga da se korišćenjem topologije TIN-a mogu efikasno ispitati kritična područja i odrediti strukturne linije i karakteristične tačke terena.

Jedan od prvih publikovanih postupaka razvijen je od strane tima istraživača sa Katedre za fotogrametriju Univerziteta u Minhenu. Postupak se zasniva na samoj definiciji strukturnih linija terena, odnosno *skeletnih linija terena*, kako se te linije još nazivaju. Naime, padne linije su linije sa najvećim padom terena. Strukturna linija je padna linija sa najmanjim padom. Susjedne padne linije se ulivaju u strukturnu liniju terena tangencijalno (Aumann 1990, Aumann 1992). Pored toga, padne linije terena seku izohipse pod pravim uglom. Predloženi postupak se sastoji iz dva koraka. Prvi je računanje padnih linija na osnovu izohipsi, a drugi je izdvajanje strukturnih linija iz sračunatih padnih linija. Računanje padnih linija započinje proračunom **pravca najvećeg pada terena** (engl. *aspect*) za sve tačke izohipsi. Ovi pravci su definisani kao simetrale uglova koje zaklapaju dva susjedna segmenta izohipse. Zatim se polazeći od tačke izohipse gore i dole prati padna linija. Praćenje započinje tako što se za prvi segment padne linije bira segment zadate dužine koji leži u pravcu najvećeg pada terena. Nakon toga se bira novi segment iste dužine, a u pravcu najvećeg pada terena u poslednjoj tački padne linije. Pri tome se za proračun pravca najvećeg pada u tačkama koje leže između izohipsi koristi prethodno formirani TIN DMT. Praćenje padnih linija se zbog efikasnosti proračuna ograničava na područja gde se javljaju horizontalni trouglovi i trouglovi koji povezuju horizontalne trouglove donje i gornje izohipse (za vodoslivnice i vododelnice to je detalj a), Slika 3.40). Izdvajanje strukturne linije terena se vrši praćenjem u pravcu izabrane padne linije. Praćenje se izvodi nagore za vodoslivnice i nadole za vododelnice, pa se u zavisnosti od toga i bira početna tačka za praćenje. Strukturna linija se prati tako što se od svih padnih linija bira ona sa minimalnim padom, tj. ona koja je najduža do preseka sa sledećom izohipsom. Nakon što su detektovane strukturne linije terena vrši se formiranje DMT-a po metodi konačnih elemenata, uz respektovanje prelomnih i strukturnih linija terena, a korišćenjem softverskog paketa *HIFI-88* (3.2.3).

Ekipa istraživača sa ITC, Holandija, je takođe razvila postupak za otkrivanje planimetrije i visina tačaka terena koje pripadaju "*skeletu*" terena na osnovu digitalizovanih izohipsi (Peng 1996). Cilj je bio da se sa ovim tačkama poboljša kvalitet TIN DMT-a i da se omogući generalizacija predstave terena. Ideja je da se spreči gubitak značajnih informacija kroz postupak generalizacije (kompresija i filtriranje DMT-a), time što će se u postupak uvesti ove dodatne informacije kao ograničenja. Za efikasnu generalizaciju potrebno je tačke skeleta terena povezati u linije, koje bi uvele dodatne uslove kod interpolacije DMT-a. Ovaj postupak povezivanja tačaka u linije skeleta nije prikazan u pomenutom radu. Predloženi postupak se sastoji iz nekoliko faza. Prva faza je određivanje horizontalnih trouglova i formiranje *horizontalnih regiona*. U okviru ovog rada horizontalni region je definisan kao podskup svih susjednih horizontalnih trouglova koji:

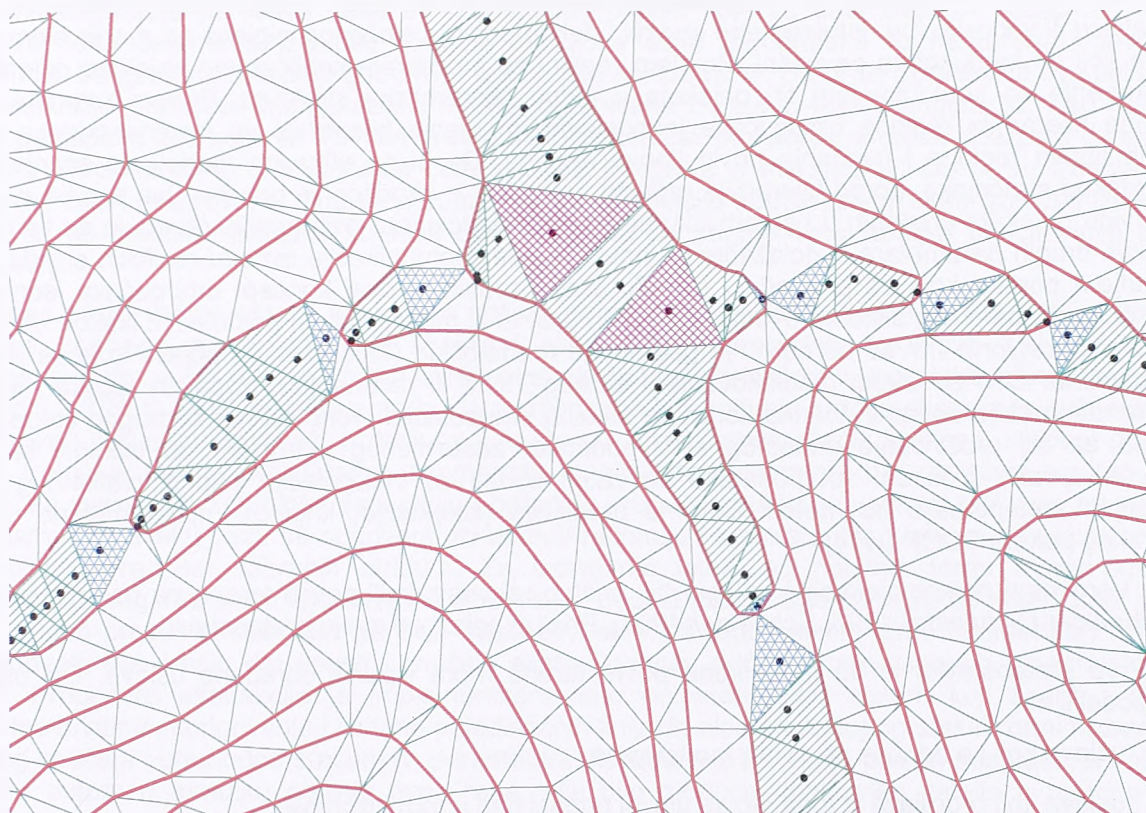
- a) imaju zajedničku stranicu koja nije segment izohipse, i
- b) samo jedan trougao u tom skupu može biti susedan trouglu kod koga su sva tri suseda horizontalni trouglovi.

Trougao pod b) se naziva *čvorni trougao*. Naglašeno je da je ovo važan koncept za postupak, jer se u tom trouglu sustiče više linija skeleta. Uslovi a) i b) zajedno obezbeđuju da svaki horizontalni region sadrži samo jedno grananje skeleta. Ravni trougao kod koga su dve stranice segmenti izohipse naziva se *završni trougao*, a trougao kod koga je samo jedna stranica deo izohipse naziva se *lančani trougao* (Slika 3.41). Za sve regione koji se sastoje samo od jednog trougla vrši se eliminacija ovog horizontalnog



trougla iz TIN-a zamenom stranica u mreži. Naravno, ovo se izvodi samo ako je to moguće zbog uslova konveksnosti četvorougla koji formiraju dva trougla kojima je ta stranica zajednička. Novonastala stranica TIN-a se markira, jer je ona potencijalni segment neke linije skeleta. Zatim se za svaki horizontalni region vrši određivanje topologije skeletnih linija i njihove aproksimativne geometrije. Prvo se svi trouglovi sortiraju, a onda se određuje približna pozicija u ravni XOY svih tačaka koje pripadaju skeletu (tačke skeleta). Predloženo je nekoliko metoda za određivanje ovih pozicija:

- korišćenjem centroida svakog završnog i čvornog trougla; za lančani trougao to je središnja tačka linije koja povezuje središnje tačke linija ovog trougla koje nisu segmenti izohipse (Slika 3.41);
- korišćenje centroida svakog trougla i primena operacije za glačanje;
- korišćenje centra opisane kružnice za svaki trougao regiona.



Slika 3.41 : Horizontalni trouglovi i tačke skeleta određeni korišćenjem središnjih tačaka linija i centroida; čvorni trougao – ružičasta unakrsna šrafura, lančani trougao – zelena kosa šrafura, završni trougao – svetloplava šrafura

Zaključeno je da se sa prva dva postupka dobijaju prihvatljiviji rezultati, dok rezultati kod poslednjeg postupka dosta zavise od rasporeda tačaka. Zato je prvi postupak predložen za korišćenje. Njegova prednost je svakako i u njegovoj jednostavnosti. U suštini, sva tri postupka se sastoje u približnom određivanju tačaka koje pripadaju srednjim osama izohipsi, tj. korespondiraju MAT algoritmu kod rasterskog procesiranja slika.

Nakon određivanja položaja tačaka skeleta u ravni XOY, prelazi se na određivanje visina za ove tačke. Predložena je linearna interpolacija (ekstrapolacija) duž linije koja spaja posmatranu tačku i njoj najbližu tačku na izohipsi koja je prva susedna s obzirom na posmatrani region. Osnova za postavljanje interpolacione linije je tačka na toj izohipsi i presek interpolacione linije sa granicom horizontalnog regiona (izohipsa koja ga ograničava i na kojoj leže temena trougla u koji pada posmatrana tačka). Pri tome treba posebno obratiti pažnju na slučaj kada interpolaciona linija seče granicu horizontalnog regiona više puta. U radu se predlaže i alternativni metod. On se sastoji od interpolacije visina za tačke koje padaju u završne trouglove po opisanom postupku. Visine za ostale tačke skeletne linije koja počinje i završava ovim tačkama, određuju se linearnom interpolacijom na osnovu ovih tačaka. Nakon određivanja svih tačaka skeleta sledi provera njihove konzistentnosti. Ovim se proverava da svaka tačka skeleta mora biti unutar horizontalnog regiona, da su visine za sve ove tačke ili veće, ili manje u odnosu na visinu izohipse koja ograničava horizontalni region u tom delu i da su visinske razlike između tih tačaka i same izohipse manje od ekvidistancije. Nakon svih ovih postupaka mreža TIN-a se ažurira ubacivanjem tačaka skeleta.



Ako ima preostalih horizontalnih trouglova, oni se eliminišu iz mreže zamenom stranica TIN-a. U radu se takođe predlaže korigovanje položaja tačaka skeleta u XOY ravni u zavisnosti od nagiba terena sa jedne i sa druge strane linije skeleta. Ovo je sasvim razumljivo, s obzirom da linije dobijene po MAT algoritmu samo aproksimiraju položaj linija skeleta.

U literaturi se može naći još jedan postupak sličan opisanom postupku (*Heitzinger 2001*). I ovaj postupak se zasniva na pokušaju da se identifikuju problematična mesta-regioni u TIN-u i da se analizom tih regiona rekonstruišu specifične morfološke karakteristike terena. Pokazatelji na osnovu kojih se mogu identifikovati takvi regioni su pojava horizontalnih trouglova i oštra zakrivljenost izohipsi. Nakon detekcije jednog od trouglova TIN-a na osnovu ovih pokazatelja sledi analiza ostalih trouglova u njegovom susedstvu i selekcija svih ostalih trouglova koji pripadaju istom regionu. Jedna od osnovnih karakteristika predloženog postupka je klasifikacija identifikovanih regiona prema morfološkim pojavama koje se javljaju u njima (vododelnica, vrh, vodoslivnica, i sl.). Nakon klasifikacije regiona sledi njihovo povezivanje u veće celine, tako što se analizira TIN u njihovom susedstvu. Jedna takva celina može predstavljati jednu vododelnicu ili vodoslivnicu. Istovremeno se vrši i dekompozicija složenog regiona na manje elementarne regione koji su međusobno povezani. Problem regioni se modeliraju korišćenjem objektno orijentisanog programiranja sa struktuiranjem tih objekata u jednu hijerarhijsku strukturu. Prema autorima, ovako formirana hijerarhija regiona omogućava jednostavno menjanje hijerarhije, tj. izmena odnosa između različitih tipova regiona i uvođenje novih tipova regiona. Da bi se efikasno modeliralo znanje jednog topografskog stručnjaka, pored hijerarhije regiona, uvedeno je i korišćenje pravila. Ova pravila su takođe data u vidu objekata uređenih u hijerarhijsku strukturu. Korišćenjem ovih pravila određuje se tip regiona, ispitivanje drugih parametara ili dolaženje do novih pravila. Komunikacija između različitih pravila vrši se korišćenjem poruka koje se prosleđuju između samih pravila. I ovaj koncept omogućava jednostavnu modifikaciju ekspertskog sistema uvođenjem novih pravila ili modifikacijom postojećih. Nakon utvrđivanja i klasifikacije regiona vrši se određivanje geometrije morfoloških (topografskih) pojava koje se javljaju u tim regionima. Ovo se izvodi modifikovanjem samog TIN-a ili računanjem dodatnih tačaka i linija. Za proračun geometrije dodatnih tačaka koristi se lokalna interpolacija preko polinoma drugog stepena. Sve ovo ima za cilj proširivanje početnog seta podataka sastavljenog uglavnom od izohipsi sa novim podacima. Ovako prošireni set podataka se zatim koristi za interpolaciju visoko kvalitetnog DMT-a korišćenjem interpolacije po metodi linearne predikcije (kolokacija, kriging) implementirane u okviru softverskog paketa SCOP (*w14*).

Verovatno najkompleksniji i najcelovitiji pristup rekonstrukciji površi terena na osnovu izohipsi je dao Schneider (*Schneider 1995, Schneider 1998*). Pristup polazi od dveju pretpostavki.

Prva pretpostavka je da modelirana površ terena mora ispuniti određene uslove. Ovi uslovi se mogu podeliti na:

- uslove koji se odnose na samo modeliranje;
- uslove koji proizilaze iz toga što su ulazni podaci dati u formi izohipsi;
- geomorfološke uslove koji su posledica toga da je realna površ terena rezultat delovanja prirodnih sila od kojih su najvažniji hidrološki procesi.

Uslovi iz prve grupe se odnose na zahteve da metrička nesigurnost interpolacije u tačkama površi mora biti predvidljiva i u okviru limita pretpostavljenih predviđenom namenom digitalnog modela, da modelirana površ terena mora interpolirati date tačke (tačke na izohipsama) i da je površ  $G^1$  kontinualna svuda sem na mestima gde se javljaju prelomne linije terena (unapred zadate ili određene iz ulaznog seta podataka).

Jedini uslov koji proizilazi iz same definicije izohipsi je da je površ terena između dveju susednih izohipsi sa različitim visinama u visinskom smislu ograničena na odgovarajući visinski interval (ekvidistanciju).

Uslovi koji su posledica geomorfološke prirode terena su:

- rekonstruisana površ ne sme imati depresije osim onih koje su eksplicitno zadate; ovo je direktna posledica pretpostavke da je površ terena formirana hidrološkim procesima;
- rekonstruisana površ se mora sastojati samo od relevantnih zemljišnih formi; drugim rečima, mora se izbeći pojava veštačkih formi;
- morfološke i topografske informacije koje su sadržane u ulaznim podacima moraju biti očuvane i u rekonstruisanoj površi terena.

Druga pretpostavka odnosi se na informacije sadržane u izohipsama. Naime, Schneider zaključuje da izohipse u sebi sadrže implicitne i eksplicitne informacije, kao i informacije koje su posledica geomorfoloških pravila. Eksplicitne informacije su date koordinatama tačaka na izohipsama i topologijom izohipsi. Implicitne informacije su one na osnovu kojih iskustan kartograf zaključuje da se na posmatranim mestima pojavljuju specifične forme terena. Ove informacije su vrlo značajne za razvoj algoritama za ekstrakciju karakterističnih zemljišnih formi.

Navedene pretpostavke su iskorišćene za razvoj postupka za **geomorfološki solidnu rekonstrukciju digitalne površi terena na osnovu izohipsi**. Osnovna koncepcija postupka bazira se na formiranju modifikovane Delaunay-jeve triangulacije na osnovu ulaznog seta podataka i formiranju kontinualne površi terena koja u tačkama izohipsi interpolira date visine i ima vrednosti normala koje su prethodno ocenjene.

Rekonstrukcija površi terena započinje formiranjem Delaunay-jeve triangulacije tačaka izohipsi. Ovakva triangulacija narušava neka od morfoloških pravila koja su data ulaznim podacima: stranice trouglova seku segmente izohipsi, stranice trouglova seku topografske forme terena i javljaju se horizontalni trouglovi na mestima gde površ terena nije horizontalna. Da bi se ispoštovala ova pravila, vrši se modifikacija postojeće triangulacije i formira ograničena Delaunay-jeva triangulacija. Kao i kod svih ostalih postupaka kod kojih se TIN formira na osnovu izohipsi, prvi korak je da se obezbedi da segmenti izohipsi i drugih linija iz ulaznog seta čine stranice trouglova u triangulaciji. Da bi se izbegla pojava izduženih, uskih trouglova, u radu se predlaže da se eliminacija trouglova koji seku izohipse izvede tako što će se na mestima preseka stranica ovih trouglova sa segmentima izohipsi ubaciti nove tačke u triangulaciju.

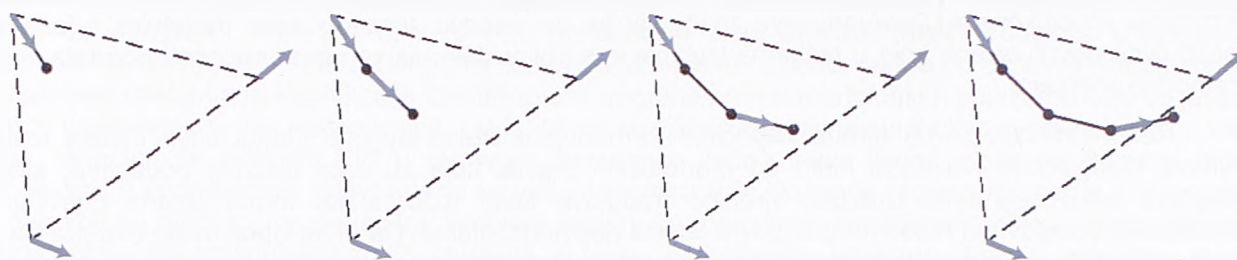
Kao i kod većine ostalih postupaka kojima se na osnovu izohipsi formira TIN DMT, i kod ovog postupka značajno mesto zauzima analiza i eliminacija horizontalnih trouglova TIN-a. I ovde se podrazumeva da na tim mestima treba izvršiti ekstrakciju karakterističnih topografskih elemenata, a zatim ih ugraditi u TIN, tj. DMT. Identifikovan je skup kriterijuma koji imitiraju proces ekstrakcije ovih elemenata koji sprovodi iskustan stručnjak. Kriterijumi kao što su zakrivljenost u tački izohipse, sličnost povezanih delova izohipse, dužina potencijalnih segmenata topografskog elementa i sl., izraženi su kao merljivi atributi. Za svaku tačku izohipse se ispituju i određuju moguće strukturne veze sa tačkama na susednim izohipsama. Za svaku vezu se odgovarajući atributi računaju i sumiraju. Na kraju se bira konekcija koja ima najveću vrednost sabranih atributa. Za izdvajanje bitnih od nebitnih formi terena koristi se odgovarajući prag. Korisniku je ostavljena sloboda da podesi skup težina za svaki od kriterijuma, čime on utiče na sam proces ekstrakcije. Na ovaj način bira se vrsta topografskih formi (elemenata) koje treba ekstraktovati, kao i nivo detaljnosti i značaja ekstraktovanih, odnosno zanemarenih topografskih formi terena. Procedura ekstrakcije je implementirana kao poluautomatski sistem koji sadrži i alate za manuelno brisanje, korigovanje i izmene pojedinačnih linijskih elemenata topografskih formi nezavisno od njihovog značaja i prethodno sračunatih parametara. Iz radova u kojima je opisan postupak, a koji su bili dostupni autoru u trenutku pisanja ovog rada, nije bilo moguće dobiti više detalja o metodu koji je korišćen za ekstrakciju karakterističnih formi terena.

Ključno mesto u predloženom postupku zauzima interpolacija površi terena na osnovu ulaznih podataka i ekstraktovanih formi terena. Analizirano je više interpolatora koji se standardno primenjuju nad mrežom trouglova i kojima se dobija kontinualna površ terena. Obuhvaćeni su praktično svi numerički postupci izloženi u poglavlju 3.3.2.3. Zaključeno je da se korišćenjem postojećih Bézier-ovih splajn trougaonih površinskih zakrpa ne mogu ispuniti svi zahtevi u pogledu geomorfološkog kvaliteta rekonstruisane površi terena. Kao i kod analize ovih interpolatora u pomenutom poglavlju ovog rada, konstatovano je da se korišćenjem zakrpa petog stepena dobija globalna  $G^1$  kontinualnost površi, ali se ne može obezbediti ograničavanje površi s obzirom na ekvidistanciju, nije moguće eliminisanje suvišnih depresija, a primetne su i pojave neželjenih ondulacija površi. Kubni polinom i polinom četvrtog stepena ne obezbeđuju  $G^1$  kontinualnost, ali omogućavaju ograničavanje površi s obzirom na ekvidistanciju. Korišćenjem Clough-Tocher šeme obezbeđuje se  $G^1$  kontinualnost, ali se ne eliminišu drugi pomenuti nedostaci rekonstruisane površi. Autor predlaže da se dalje ispita mogućnost korišćenja takozvanih Coons zakrpa (Farin 1993). Ove četvorougaoone ili trougaone zakrpe treba formirati tako da interpoliraju granične krive date preko izohipsi, sračunatih linija najvećeg pada terena i ekstraktovanih strukturnih linija terena.

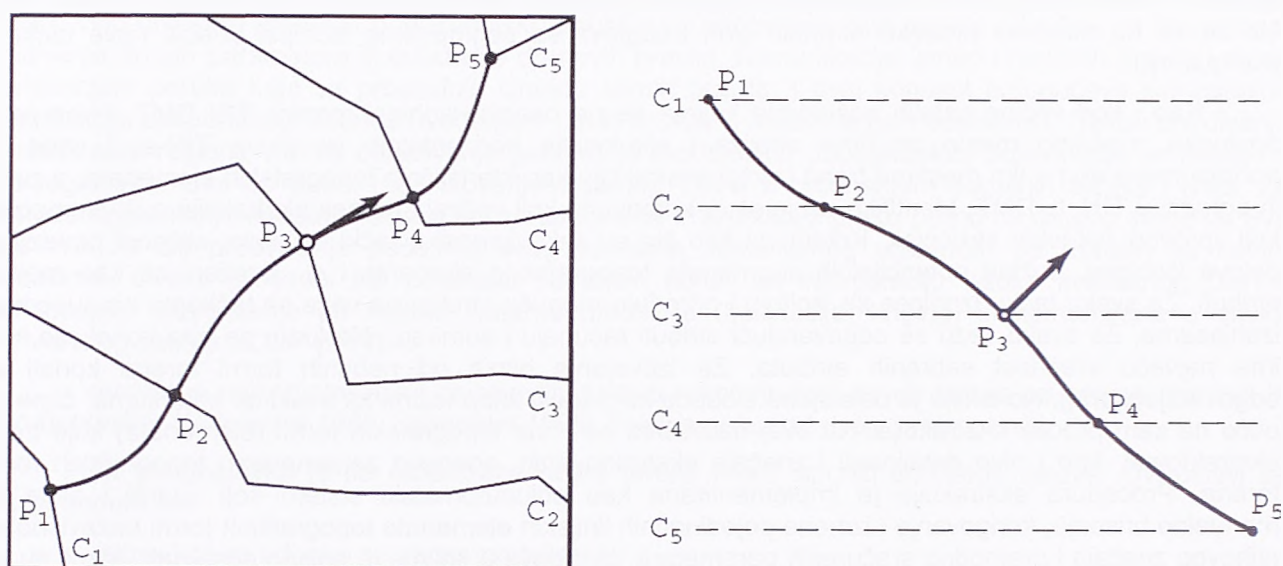
Posebna pažnja je posvećena problemu geomorfološki solidne ocene normala u tačkama izohipsi. Zaključeno je da ocena ovih normala ima presudan uticaj na kvalitet rekonstrukcije površi terena na osnovu izohipsi. Predložen je jedan iterativni pristup koji se zasniva na proračunu normala korišćenjem linija najvećeg pada terena. Praćenje linije sa najvećim padom terena započinje od tačke izohipse. Koristi se postupak vrlo sličan onom opisanom na početku ovog poglavlja (Aumann 1990, Aumann 1992). Polazi



se od pretpostavke da je najveći pad terena u tački izohipse upravan na izohipsu ili u pravcu simetrale ugla koji zaklapaju dva susedna segmenta izohipse. U pravcu ovog pada, a na unapred zadatom malom rastojanju računa se nova tačka linije najvećeg pada terena. Dalje praćenje ove linije vrši se sukcesivnim proračunom normala u novoodređenim tačkama linije najvećeg pada. Ovaj proračun se vrši korišćenjem splajn funkcije (trougaone površinske zakrpe) formirane nad posmatranim trouglom (Slika 3.42, a). Praćenje linije najvećeg pada terena se nastavlja do mesta gde se javlja vrh ili depresija, do granice područja od interesa ili nakon što je pronađen presek sa dve izohipse (Slika 3.42, b).



a) Rekonstrukcija linije najvećeg pada terena u trouglu na osnovu postojećih vektora normala u temenima trougla



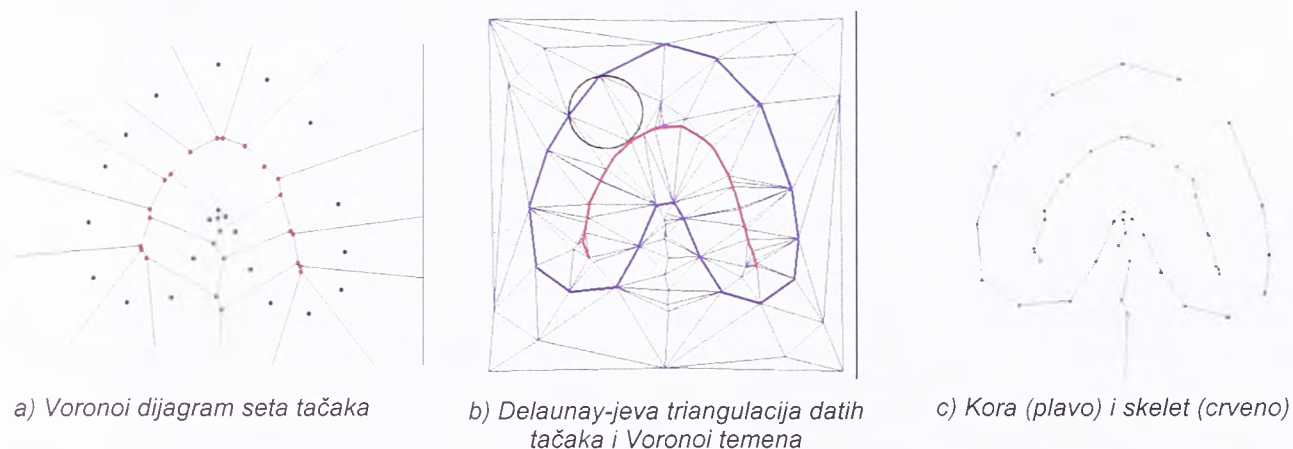
b) Ocena normala u tačkama izohipse na osnovu konstruisanih linija najvećeg pada terena; levo: pravac komponente normale u horizontalnoj ravni određen je simetralom ugla između dva susedna segmenta izohipse u posmatranoj tački; desno: komponenta normale u vertikalnoj ravni određena je računanjem interpolacionog profila (krive) po profilu duž linije najvećeg pada terena.

Slika 3.42: Geomorfološki solidna ocena normala u tačkama izohipse (Schneider 1998)

Praćenje linije najvećeg pada terena za svaku tačku izohipse izvodi se naviše i naniže. Na osnovu dobijenih linija najvećeg pada vrši se ocena normale u tački izohipse. Vertikalna komponenta vektora normale se određuje na osnovu splajn krive koja interpolira posmatranu tačku izohipse (tačka  $P_3$ , Slika 3.42, b) i sve presečne tačke linije najvećeg pada terena i susednih izohipse (tačke  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_4$  i  $P_5$ , Slika 3.42, b). Za proračun ove interpolirajuće krive koristi se takođe Bézier-ov splajn. Ovako određene normale u tačkama izohipse služe kao osnov za proračun linija najvećeg pada u sledećoj iteraciji. Postupak se iterativno ponavlja dok se ne obezbedi da su promene normala između dve iteracije zanemarljive, tj. u okviru unapred specificiranog praga.

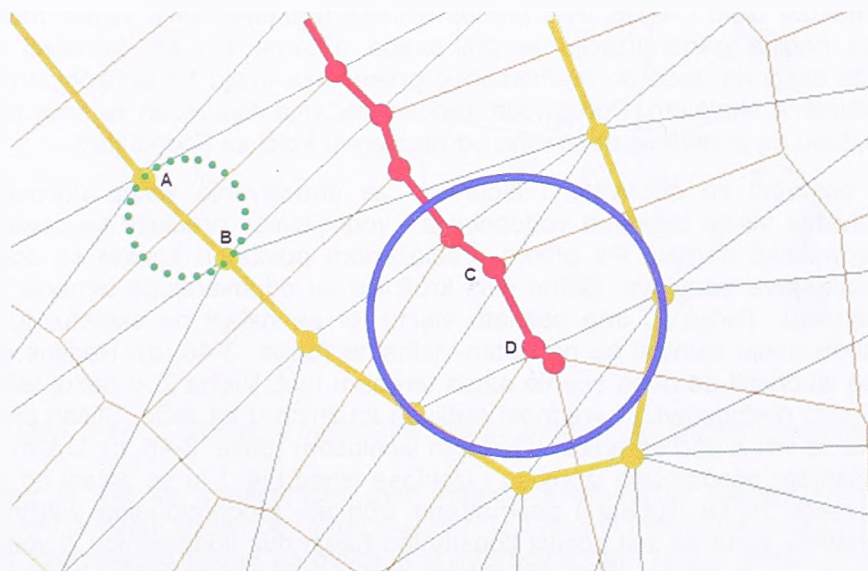
U literaturi se može naći više postupaka koji se baziraju na korišćenju svojstava Voronoi dijagrama i njegovog duala, Delaunay-jeve triangulacije, za dobijanje srednjih osa iz izohipse, tj. za realizaciju MAT algoritma nad vektorskim podacima. Ovi postupci se zasnivaju na svojstvima Voronoi dijagrama dobijenog teselacijom skupa tačaka koji pripadaju krivim. Nina Amenta (*w29*) i njeni saradnici su istraživali problem rekonstrukcije krive u ravni na osnovu skupa tačaka te krive (Amenta 1998, Amenta 1998a, Amenta 1999). Podrazumeva se da su tačke krive prikupljene sa odgovarajućom gustinom i rasporedom. Zaključeno je da se ovaj problem može uspešno realizovati na osnovu posebnih grafova krive: **kora** (engl. *crust*) i **skelet** (engl. *skeleton*). Ovi grafovi se mogu koristiti i za očuvanje topoloških

odnosa između segmenata krive, što je vrlo bitno ne samo za rekonstrukciju krive, već i za eventualne postupke generalizacije krive. Slične konstatacije važe i za slučaj rekonstrukcije, odnosno generalizacije površi. Neka je dat skup  $S$  tačaka u ravni i neka je  $V$  skup svih temena Voronoi dijagrama skupa tačaka  $S$ . Neka je skup  $S'$  unija  $S \cup V$ . Posmatrajmo Delaunay-jevu triangulaciju skupa  $S'$ . Stranica Delaunay-jeve triangulacije skupa  $S'$  pripada kori ako obe njene krajnje tačke pripadaju skupu  $S$ . Ukoliko tačke iz skupa  $S$  predstavljaju tačke neke krive  $C$  koje su prikupljene sa odgovarajućom gustinom, onda kora predstavlja poligonalnu rekonstrukciju krive  $C$ . Amenta i dr. su došli do zaključka da se kora neke krive može dobiti na osnovu dovoljno dobro prikupljenih tačaka te krive, ako se prvo formira Voronoi dijagram od tih tačaka, a zatim se od temena tako dobijenog Voronoi dijagrama i datih tačaka te krive formira nova Delaunay-jeva triangulacija (Slika 3-43). Kora se dobija selekcijom svih stranica Delaunay-jeve triangulacije koje povezuju date tačke.



Slika 3-43 : Kora i skelet – konstrukcija korišćenjem Voronoi dijagrama i Delaunay-jeve triangulacije (Gold 1999)

Gold (w31, w32) i ostali su zaključili da se do kora i skeleta može doći na jednostavniji način, bez potrebe da se u dva koraka prvo formira Voronoi dijagram, pa zatim Delaunay-jeva triangulacija (Gold 2000, Gold 2002, Gold 1999, Dakowicz 2002, Dakowicz 2002a, Thibault 2000). Za istovremeno dobijanje i kora i skeleta dovoljno je lokalno testiranje parova Voronoi/Delaunay stranica. Ako za neku Delaunay-jevu stranicu postoji kružnica koja ne sadrži nijedno Voronoi teme, onda je ta stranica deo kora (Slika 3-44, zelena tačkasta kružnica, Delaunay-jeva stranica AB). U suprotnom, Voronoi stranica koja čini par sa posmatranom Delaunay-jevom stranicom je skeleta (Slika 3-44, plava kružnica, Voronoi stranica CD).

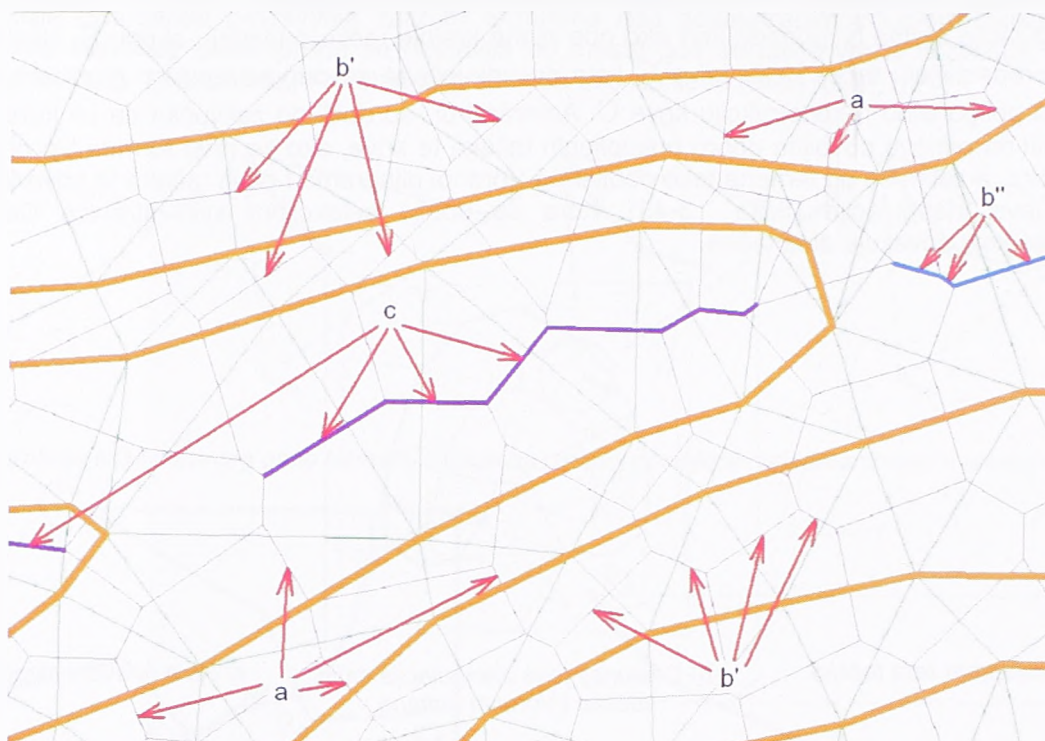


Slika 3-44 : Kriterijum selekcije Voronoi stranica koje čine skelet i Delaunay-jevih stranica koje čine koru (Cvijetinović 2004b)

Gold i ostali su za ovo ispitivanje koristili poznatu *quad-edge* strukturu podataka (Guibas 1985, poglavlje 3.1.2). Svaki par se posebno testira i označava ili kao deo kora ili kao deo skeleta. Kada je reč o podacima koji se sastoje od tačaka izohipsi, naravno da je najinteresantnija ekstrakcija stranica skeleta



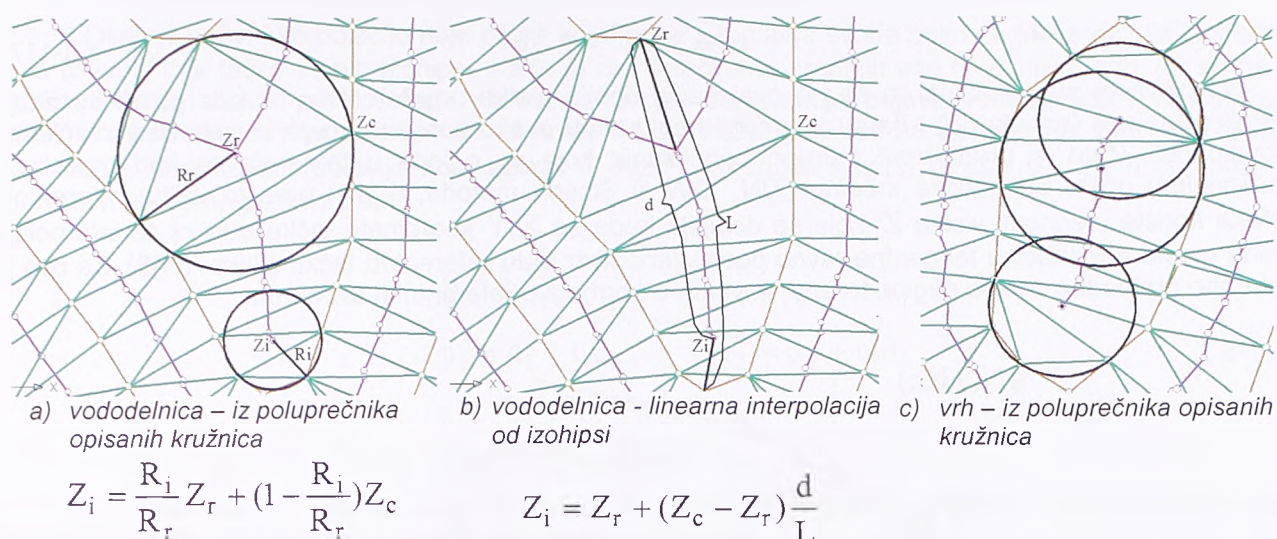
koje razdvajaju tačke istih izohipsi, ili bar izohipsi sa istim visinama (skelet predstavljen  $b''$  i  $c$  Voronoi stranicama, Slika 3-45).



Slika 3-45 : Voronoi stranice (VS) i srednje ose izohipsi (izohipse – narandžasto, stranice TIN-a – zeleno, voronoi stranice – ljubičasto, a – VS između između dva temena jednog segmenta izohipse,  $b'$  – VS između temena na dvema izohipsama,  $b''$  – VS između temena na dvema izohipsama iste visine,  $c'$  – VS između dva temena iste izohipse koji ne pripadaju istom segmentu)

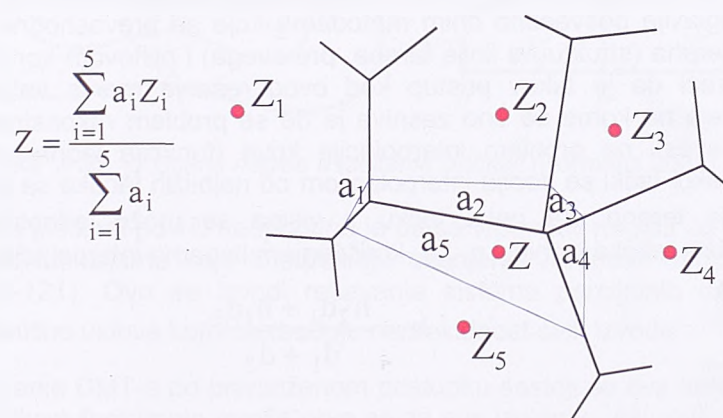
U pomenutim radovima je predstavljen i interesantan pristup za generalizaciju (glačanje) izohipsi, odnosno skeleta korišćenjem koncepta takozvanog uvlačenja skeleta (engl. *skeleton retraction*). Naime, u teoriji i praksi je poznato da se i manje nepravilnosti (šumovi) u graničnim krivama (izohipse) reflektuju na skelet u vidu njegovog neželjenog grananja. Koristeći pristup za određivanje kore i skeleta u jednom koraku koji su predložili Gold i ostali, ovaj proces uvlačenja skeleta se u velikoj meri pojednostavljuje. Prednost ovakvog načina generalizacije je pre svega u tome što se, koristeći topologiju Voronoi dijagrama ne može desiti da dođe do međusobnog presecanja dveju krivih (izohipsi) koje se generališu pošto su one razdvojene skeletom. Pored toga, proces glačanja nije vezan za prag tolerancije izražen u metričkom smislu, tako da je rešenje nezavisno od razmere u kojoj su podaci dati.

Predloženi postupci su obuhvatili i algoritme za dodeljivanje visina novoodređenim tačkama skeleta. Za određivanje visina tačkama vododelnica i vodoslavnica predlaže se postupak koji polazi od pretpostavke o jednakosti nagiba. Po prvom predloženom postupku koriste se poluprečnici opisanih kružnica za Delaunay-jeve trouglove. Centri ovih kružnica su odgovarajuća temena Voronoi dijagrama, dakle tačke na skeletu. Tačka  $Z_r$  ima poznatu visinu jer se nalazi na skeletu, tj. tačno na polovini ekvidistancije između dveju izohipsi sa poznatim visinama (Slika 3-46, a). Radijus opisane kružnice u ovoj tački može se iskoristiti da bi se ocenio nagib terena u njoj. Visina  $Z_l$  u nekoj tački skeleta se onda određuje koristeći ovu pretpostavku i vrednost radijusa kružnice u toj tački. Sličan princip se koristi i za određivanje skeleta za vrh ili dno ograničeno jednom izohipsom (Slika 3-46, c). U tom slučaju pad terena se određuje korišćenjem posmatrane izohipse i izohipse ispod nje. I tu se polazi od pretpostavke da je visinska razlika između tačke skeleta i posmatrane izohipse proporcionalna veličini radijusa opisane kružnice. U slučajevima kada se želi postići konstantan nagib duž vododelnice ili vodoslavnice, predlaže se drugačiji postupak. To je jednostavna linearna interpolacija duž vododelnice polazeći od više ka nižoj izohipsi (Slika 3-46, b). U tom slučaju potrebno je produžiti liniju skeleta (vododelnice ili vodoslavnice) do preseka sa gornjom i donjom izohipsom. U softverskoj implementaciji ovog postupka automatski se bira postupak pod a) kad god nije moguće doći do vrednosti visina za gornju ili donju izohipsu, ili kad su ove vrednosti jednake (vrh, ili sedlo), dok se u svim ostalim slučajevima koristi postupak linearne interpolacije.



Slika 3-46 : Način određivanja visina za tačke skeleta (po Gold 2002)

Autori su takođe razmatrali i problem interpolacije koristeći ulazne podatke u formi izohipsi i dopunjene sračunatim tačkama skeleta. Jedna od razmatranih opcija je linearna interpolacija iz TIN-a korišćenjem opšte aritmetičke sredine vrednosti visina u temenima trougla i baricentričnih koordinata posmatrane tačke kao težina. Naravno, konstatovan je diskontinuitet površi preko stranica trouglova, ali i da je metod veoma brz. Takođe je razmatrana i metoda inverznih rastojanja i konstatovano je da se njome ne dobijaju zadovoljavajući rezultati. Zaključak je da se najbolji rezultati postižu korišćenjem **Sibson metod interpolacije**. Ovaj metod se još naziva i **interpolacija prirodnog suseda - NN** (engl. *Natural Neighbor Interpolation*). Suština ove metode je da se za optimalan izbor susednih tačaka od kojih se određuje nepoznata visina u zadatoj tački iskoristi Voronoi dijagram. Naime, tačka u kojoj se želi sračunati visina se ubacuje u Voronoi dijagram formiran od datih tačaka, a zatim se tražena visina računa kao opšta aritmetička sredina visina susednih Voronoi temena koristeći pri tome površine koje su prilikom ubacivanja tačke "osvojene" od tih susednih temena (površine  $a_i$ , Slika 3-47). Kod implementacije se nova tačka ne ubacuje stvarno u Voronoi dijagram, već se ovo ubacivanje samo simulira.



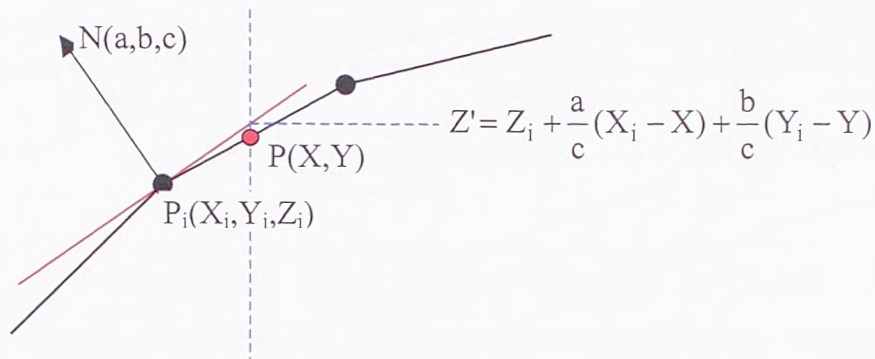
Slika 3-47 : Sibson-ov metod interpolacije (interpolacija prirodnog suseda)

Konstatovano je da se korišćenjem ove metode interpolacije dobijaju mnogo bolji rezultati interpolacije nego oni dobijeni linearnom interpolacijom iz TIN-a ili metodom inverznih odstojanja (IDW). Ovakvim načinom interpolacije dobija se površ koja interpolira date tačke, glatka je između tih tačaka i ima prekid glatкости preko vododelnice i vodoslivnica. Štaviše, površ ima diskontinuitet nagiba u svim datim tačkama što je svakako nešto što se želi izbeći. Zato su predložena i dodatna poboljšanja koja se mogu primeniti kod svih triju testiranih metoda inetrpolacije. Prvo poboljšanje je da se umesto standardnih težina kod proračuna koriste popravljene težine koje bi se računale po unapred utvrđenoj funkciji. Predloženi oblik funkcije za računanje popavljenih težina glasi:



$$w' = 3 \cdot w^2 - 2 \cdot w^3 \quad (3-117)$$

Ispitivanja su pokazala da se na ovaj način dobija glatka površ terena, ali i da površ poseduje neželjene talase (ondulacije) i da su vrednosti nagiba kod ovako dobijene površi u svim datim tačkama jednaki nuli. Zato je predloženo i drugo poboljšanje koje se ogleda u tome da se kod proračuna korišćenjem opšte aritmetičke sredine (TIN, IDW ili Sibson metoda, tj NN) umesto visina referentnih tačaka koriste vrednosti visina  $Z'$  koje se dobijaju kada se  $X, Y$  koordinate tačke u kojoj se interpoluje visina uvrste u jednačinu tangentne ravne postavljene kroz datu referentnu tačku (Slika 3-48). Za ovo je potrebno prethodno oceniti nagibe terena, tj. vektore normala u referentnim tačkama.

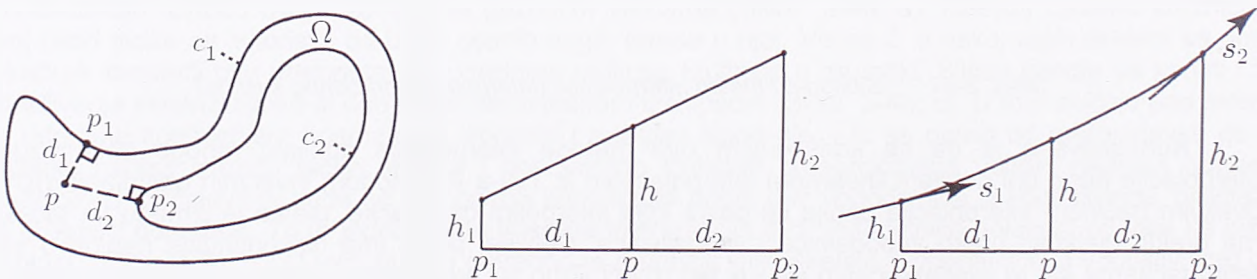


Slika 3-48 : Vrednost visine u tački sračunata iz uslova pripadnosti tangentnoj ravni date referentne tačke (Dakowicz 2002a)

Autori u radu zaključuju da se sa ovakvim računanjem visina čak i sa interpolacijom iz TIN-a dobijaju rezultati koji su, za gust raspored datih tačaka duž izohipsi, skoro jednako dobri kao oni ostvareni Sibson metodom interpolacije. Poboljšanja su dobijena čak i kod IDW interpolacije. Sibson metod interpolacije sa ovim poboljšanjima daje rezultate koji su dobri čak i za retku gustinu tačaka po izohipsama. Pa ipak, konstatovano je da površ pokazuje neželjene oscilacije manjeg ili većeg intenziteta za sve predložene metode interpolacije.

U literaturi je u skorije vreme objavljen još jedan pristup za rekonstrukciju površi terena na osnovu izohipsi. Ovo rešenje kombinuje mnoge elemente do sada pobrojanih metoda interpolacije (Hormann 2003). Iako je ovo poglavlje posvećeno onim metodama koje se prevashodno zasnivaju na ekstrakciji karakterističnih formi terena (strukturne linije terena, pre svega) i njihovom korišćenju kod rekonstrukcije površi terena, treba reći da je takav pristup kod ovog rešenja manje važan segment celokupnog koncepta. Osnovna ideja na kome se ono zasniva je da se problem rekonstrukcije površi kao funkcije dveju varijabli može svesti na problem interpolacije krive (funkcija jedne varijable). U tom smislu, interpolacija visine u nekoj tački se dobija interpolacijom od najbližih tačaka sa poznatim visinama i to po pravcu najvećeg pada terena. Za neku tačku  $p$  visina se može jednostavno odrediti linearnom interpolacijom od najbližih tačaka izohipsi  $p_1$  i  $p_2$  korišćenjem linearne interpolacije (Slika 3-49) po formuli

$$h = \frac{h_2 d_1 + h_1 d_2}{d_1 + d_2} \quad (3-118)$$



Slika 3-49 : Linearna i Hermite interpolacija (Hormann 2003)

Ovakav način interpolacije daje površ koja je bar  $C^1$  glatka svuda osim za tačke duž linija srednjih osa izohipsi i za tačke samih izohipsi. Kada je reč o tačkama srednjih osa to je i povoljno, jer se na taj način verno modelira površ terena na mestima gde se očekuje pojava vododelnica i vodoslivnica. Međutim, svakako da nije poželjno da se javlja diskontinuitet glatkosti na izohipsama. Zato se predlaže korišćenje Hermite interpolacije koja uzima u obzir i vrednosti nagiba terena  $s_1$  i  $s_2$  u tačkama sa poznatim visinama po formulama:

$$\begin{aligned} t_i &= s_i \frac{d_1 + d_2}{h_2 - h_1}, \quad i = 1, 2 \\ u_1 &= d_1 + t_1 d_2, \quad u_2 = d_2 + t_2 d_1 \\ h &= \frac{h_2 d_1 u_1 + h_1 d_2 u_2}{d_1 u_1 + d_2 u_2} \end{aligned} \quad (3-119)$$

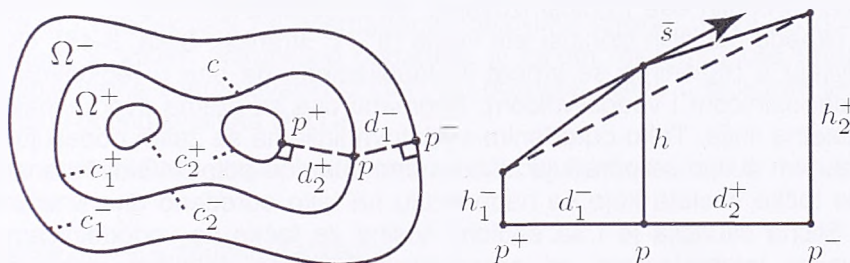
Za tačke koje se nalaze unutar jedne izohipse (vrh ili dno terena) vrednost visine se dobija samo na osnovu jedne poznate tačke korišćenjem jedne od formula:

$$h = h_1 + s_1 d_1 \quad \text{ili} \quad h = h_2 - s_2 d_2 \quad (3-120)$$

Prethodne formule se mogu koristiti i za slučaj linearne interpolacije, s tim što se može usvojiti da su nagibi  $s_1$  i  $s_2$  jednaki jedinici.

Za slučaj Hermite interpolacije neophodno je računanje nagiba  $\bar{s}$  u tačkama izohipsi (Slika 3-50). Predloženo je da se to uradi računanjem nagiba u ovim tačkama kao opšte aritmetičke sredine nagiba određenih na osnovu niže i više izohipse po formuli:

$$\bar{s} = \frac{h_2^+ - h_1^-}{d_2^+ + d_1^-} \quad (3-121)$$



Slika 3-50 : Ocena nagiba u tačkama izohipsi (Hormann 2003)

Da bi se obezbedila glatkost površi neophodno je da se vrednosti nagiba za čitavo područje odrede tako da se mogu opisati funkcijama koje interpoliraju ocenjene vrednosti nagiba u tačkama izohipsi sračunate po formuli (3-121). Ovo se izvodi rešavanje sistema parcijalnih diferencijalnih jednačina  $\Delta s_i = 0$ , uz dodatne granične uslove koji obezbeđuju neprekidnost ovih izvoda.

Algoritam za formiranje DMT-a po predloženom postupku sastoji se dva koraka: formiranja mreže i rekonstrukcije površi. Prilikom formiranja mreže prvo se za sve izohipse vrši glačanje primenom B-splajn interpolacije (dodatak A.1), a zatim se dobijene krive diskretizuju tačkama na jednakom rastojanju. Zatim se formira ograničena Delaunay-jeva triangulacija – CDT kod koje se segmenti izohipsi tretiraju kao obavezni segmenti. Tokom formiranja TIN-a vrši se i njegovo profinjavanje (poglavlje 3.3.1.3) da bi se dobili trouglovi mreže što približniji jednakokraničnim trouglovima, tj što ravnomerniji raspored tačaka TIN-a. Upravo u ovim novim tačkama i treba sračunati visine da bi se rekonstruisala površ terena. Pre toga se u triangulaciju ubacuju i srednje ose određene korišćenjem Delaunay-jeve triangulacije, odnosno njenog duala Voronoi dijagrama, a po prethodno opisanom algoritmu zasnovanom na konceptu kore i skeleta. U drugom koraku, tj, rekonstrukciji površi, prvo se za svaku tačku TIN-a sa nepoznatom visinom (tačke koje ne pripadaju izohipsama) vrši računanje odstojanja do najbližih tačaka na susednim izohipsama. Pri tome se koristi postojeća topologija TIN-a. Zatim se vrši proračun nagiba terena za sve tačke izohipsi (nagiba u jednom pravcu i osrednjenih nagiba). Sa ovako sračunatim nagibima formira se i rešava sistem parcijalnih diferencijalnih jednačina sa graničnim uslovima. Iako se radi o jednom simetričnom sistemu linearnih jednačina sa slabo popunjenim matricama, iz prikaza rezultata sprovedenih



eksperimenata može se nedvosmisleno zaključiti da je upravo rešavanje ovog sistema jednačina vremenski najzahtevnija faza proračuna. Ona zahteva više vremena nego sve ostale faze obrade zajedno, a za slučaj veće količine ulaznih podataka taj odnos je još nepovoljniji. Konačno, nakon dobijanja vrednosti nagiba, vrši se proračun visina u svim tačkama koje ne pripadaju izohipsama.

Konstatovano je da se korišćenjem gore opisanog postupka uspešno rekonstruiše površ terena i na mestima gde se ova površ "račva" (deli na dva uzvišenja ili dve doline) i gde se javljaju ostale složenije forme terena. Dobijena površ je svuda glatka sem na mestima gde se javljaju vododelnice i vodoslivnice. Autori na kraju zaključuju da se manji nedostatak predloženog postupka ogleda u tome što nije jasno izražen lom terena na mestima gde vododelnica ili vodoslivnica seče izohipsu. To je zato što ekstraktovane srednje ose nisu produžene do izohipsi, tj. nisu međusobno povezane, pa je predviđeno dalje usavršavanje postupka da bi se ovo otklonilo.

### 3.4.2.1.2 Rasterske analize

Kao što je već rečeno, problem određivanja strukturnih (skeletnih) linija terena može se, pod određenim pretpostavkama svesti na problem određivanja srednjih osa izohipsi. U literaturi je predložen jedan postupak koji se u celosti bazira na rasterskom procesiranju digitalne slike sa izohipsama (Tang 1991, Tang 1992, Tang 1992a). I ovaj postupak razvijen je od strane tima istraživača sa Katedre za fotogrametriju Univerziteta u Minhenu. Paradoksalno za ovaj postupak je to što se on bazira na rasterskim operacijama, ali za izdvajanje skeletnih linija (srednjih osa) ne koristi standardni MAT algoritam. Naime, za implementaciju ovog postupka razvijeni su postupci za formiranje ograničene Delaunay-jeve triangulacije primenom rasterskih operacija nad rasterizovanim ulaznim podacima. Do topologije TIN-a (u vektorskom obliku) dolazi se posredno, formiranjem njenog duala Voronoi dijagrama. U ovim postupcima se koristi termin kvazi Voronoi dijagram – QVD (engl. *Quasi Voronoi Diagram*) zbog razlika u odnosu na vektorsku varijantu tog dijagrama. Ovaj dijagram se formira u potpunosti primenom rasterskih operacija. Srednje ose izohipsi se formiraju primenom rasterskih operacija nad dobijenim QVD-om. Iz skupa svih srednjih osa izohipsi izdvajaju se specijalne ose. To su one koje leže između delova iste izohipse ili između različitih izohipsi iste visine ( $b''$  i  $c'$  stranice, Slika 3-45). Ove ose se dalje dele na one koje se javljaju u regionima sa vrhom ili udubljenjem, na one u regionima sa sedlom i na one u regionima sa vododelnicom i vodoslivnicom. Segmenti osa se prema ovome klasifikuju i na osnovu njih se formiraju skeletne linije. Tako određenim skeletnim linijama se zatim dodeljuju visine. Visine za tačke koje predstavljaju vrh ili dno se određuju tako da one budu na polovini ekvidistancije od najbliže izohipse. Visine za ostale tačke skeleta koje se nadovezuju na tako određeno dno ili vrh računaju se linearnom interpolacijom. Slična situacija je i sa sedlom. Visine za tačke na vododelnicama i vodoslivnicama se određuju linearnom interpolacijom od presečnih tačaka sa najbližim izohipsama. Na osnovu ovih podataka i izohipsi formira se TIN DMT, ili se pak, ovi podaci mogu iskoristiti za formiranje grid DMT-a.

Određivanje strukturnih linija terena može se izvesti i korišćenjem standardnih algoritama iz oblasti digitalne obrade slika, ali se ovde neće detaljnije ulaziti u razmatranje ovih postupaka. Zainteresovani čitalac se može bolje upoznati sa ovim postupcima u članku (Pilouk 1992).

### 3.4.2.2 Postupci bazirani na grid DMT-u

Jedan od prvih publikovanih postupaka za automatsku detekciju strukturnih linija terena je postupak koji se zasniva na korišćenju informacija o nagibu terena (Inaba 1988). Algoritam je dosta sličan gore opisanom algoritmu koji se takođe zasniva na proračunu pravca najvećeg nagiba (Aumann 1990, Aumann 1992). Kod ovog postupka prvo se računaju jedinični vektori pravca najvećeg pada terena za sve tačke na sredini segmenata izohipsi. Ovi vektori se jednostavno dobijaju kao upravne na segmente izohipsi. Korišćenjem metode konačnih elemenata - FEM (poglavlje 3.2.3) i posebnim tretiranjem  $X$  i  $Y$  komponenti ovih vektora kao poznatih vrednosti u rasutim tačkama, vrši se prelazak na pravilni grid, tj. na model sa vrednostima vektora pravca najvećeg pada u tačkama pravilne mreže. Iz ove mreže se vrlo jednostavno, primenom bilinearne interpolacije, može sračunati pravac najvećeg pada terena u bilo kojoj tački modela. Ključni deo postupka je praćenje pravca najvećeg pada terena (engl. *aspect tracing*) počevši od tačaka pravilne mreže naviše i naniže. Ove linije praćenja se sustiču u zajedničke linije. Te linije predstavljaju linije skeleta terena. Da bi se ove linije izdvojile iz mnoštva linija dobijenih praćenjem

vektora pravca najvećeg pada terena koristi se jednostavan princip: ako su sukcesivni vektori pravca najvećeg pada terena sa obe strane linije usmereni ka samoj liniji, onda je ta linija deo skeleta terena. Pored ekstrakcije linija skeleta, predviđeno je i korišćenje sračunatih vektora pravaca najvećeg nagiba terena pri formiranju DMT-a po metodi konačnih elemenata. Ovo se postiže formiranjem dodatnih jednačina popravaka.

U ovu grupu algoritama spadaju i algoritmi čiji cilj i nije podizanje kvaliteta DMT-a, već korišćenje DMT-a za hidrološke analize (Rieger 1992, Rieger 1992a, Prodanović 1999). Ovi algoritmi polaze od toga da je fini grid DMT već formiran na neki od do sada opisanih načina (poglavlje 3.2) na osnovu podataka sa izohipsama. Prevažodni cilj obrade ovim algoritmima je da se dobije mreža površinskog oticanja i granica podslivova. Sastavni deo tih mreža su i vodoslivnice i vododelnice. Ovako dobijena mreža bi se mogla iskoristiti za popravljavanje DMT-a u smislu redukcije podataka i prelaska sa izohipsi ili vrlo finog grid DMT-a na grid DMT sa razumnom veličinom ćelije grida. Međutim, primenom ovih procedura ne može se očekivati poboljšanje polaznog DMT-a u po pitanju visinske tačnosti.

S obzirom da se u postupku koji je opisan u poglavlju 3.4.1.3 (Hutchinson 1988, Hutchinson 1989, Hutchinson 1996, w21) određuju i strukturne linije terena, taj postupak bi takođe mogao da se svrsta i u ovu grupu metoda za formiranje DMT-a.

### 3.5 Analize DMT-a

U ovom poglavlju se u skraćenom obliku daju osnovni pojmovi vezani za razvoj procedura za analizu formiranog DMT-a. Svakako da su te procedure i njihovi rezultati konačan cilj zbog kojeg se DMT upravo i formira. Ovde su te procedure posebno značajne sa aspekta njihovog korišćenja za verifikaciju samog DMT-a, jer se verifikacija DMT-a po pravilu izvodi manje-više standardnim funkcijama za analizu DMT-a. Naime, nad DMT-om se izvode različiti proračuni (proračun visina i vrednosti funkcionala površi u datim tačkama, konstrukcija izohipsi, iscrtavanje profila, 3D vizuelizacija i sl.), a zatim se na osnovu analize dobijenih rezultata donosi sud o kvalitetu samog DMT-a. Na primer, pojava velikog broja nerealno velikih nagiba koji su inače retki i neočekivani na posmatranim delovima terena, može se doneti zaključak o greškama koje se nastale, ili tokom prikupljanja podataka, ili tokom rekonstrukcije (modeliranja) površi terena. Slično, upoređenje visina interpolovanih iz DMT-a i poznatih visina u tačkama terena predstavlja najčešći način za kontrolu i ocenu kvaliteta DMT-a.

Svakako da je za analizu DMT-a neophodno obezbediti bar minimalan skup numeričkih postupaka koji omogućavaju proračun:

- vrednost funkcije površi u zadatim tačkama;
- vrednosti nagiba terena;
- pravce najvećeg nagiba terena (gradijent površi);
- vrednost zakrivljenosti (krivina) površi (tangencijalna krivina, krivina po zadatom profilu, krivina u ravni).

Proračun vrednosti u zadatim tačkama najčešće se vrši za tačke zadate u formi rasutih tačaka, za tačke pravilne mreže, ili za tačke zadate po nekom profilu. Kada je reč o proračunu ostalih funkcionala površi, oni se uglavnom vrše ili za rasute tačke, ili za tačke pravilne mreže. Rezultati ovih analiza se najčešće predstavljaju u grafičkom obliku, posebno kada je reč o velikoj količini tačaka u kojima treba ove vrednosti sračunati.

Ovde se neće detaljnije ulaziti u razmatranje algoritama i numeričkih postupaka koji se koriste za ove svrhe, s obzirom da su oni relativno jednostavni i da su u velikoj meri određeni samom strukturom i organizacijom DMT-a.

Najčešće se vrednost visine u zadatoj tački iskazuje i računa kao vrednost funkcije dveju promenljivih  $z=f(x,y)$ . Ako se ova funkcija može dobiti u analitičkom obliku, onda se vrednosti svih ostalih funkcionala površi dobijaju korišćenjem osnovnih principa diferencijalne geometrije (Mitasova 1993a).

Za slučaj DMT-a baziranog na TIN-u vrednost funkcionala se može dobiti na prethodno opisani način, s tim da proračun dieferencijala Bézierovih trougaonih zakrpa u analitičkom obliku, iako izvodljiv, nije baš jednostavan. Određivanje vektora normale (prvog izvoda) na površ u nekoj tački trougaone



zakrpe može se jednostavno izvesti korišćenjem de Casteljau-ovog algoritma za konstrukciju površi i principa opisanog u dodatku A.2.2.

U okviru ovog poglavlja posebno će biti razmatrana dva važna aspekta kada je reč o analizama DMT-a. Prvi je napredna 3D vizuelizacija DMT-a kao jedna od važnijih analiza DMT-a, a drugi su analize DMT-a koje imaju za cilj verifikaciju DMT-a u smislu njegovog kvaliteta.

### 3.5.1 3D vizuelizacija DMT-a

Trodimezionalna vizuelizacija je za korisnika jedan od najprirodnijih načina da se sagleda modelirana površ. Najnovija dostignuća u oblasti računarskog hardvera i softvera omogućavaju da se i za modele koji se sastoje od velikog broja tačaka postigne vrlo realistična vizuelizacija sa osvežavanjem prikaza u realnom vremenu. Pa ipak, s obzirom na količine podataka koje se danas standardno prikupljaju savremenim metodama za prikupljanja podataka o terenu, zadatak da se obezbedi osvežavanje kvalitetnog 3D prikaza terena u realnom vremenu nije nimalo jednostavan. Neretko, radi se o stotinama hiljada, pa i milionima tačaka kojima se predstavlja površ terena. Zato su i istraživanja na ovom polju vrlo intenzivna poslednjih par decenija.

Danas se za razvoj softvera koji treba da omogući realističnu 3D vizuelizaciju najviše koristi *OpenGL* grafička biblioteka koje je praktično standard za ove primene (w22). Neke od glavnih prednosti koje ova biblioteka pruža korisniku su:

- veliki broj funkcija za realističnu 3D vizuelizaciju (z-baferisanje, senke, materijali, polaganje rasterskih slika na površ, relativno jednostavna realizacija stereo moda, transformacije koordinata, animacija, selekcija elemenata, i sl.);
- omogućava maksimalno korišćenje mogućnosti hardverske akceleracije iscrtavanja sadržaja;
- prenosivost razvijenog softvera na različite hardverske i softverske platforme.

Pored *OpenGL*-a tu je i *Microsoft*-ova *DirectX* biblioteka (w23) sa vrlo sličnom funkcionalnošću, ali je ona ipak daleko manje zastupljena posebno u stručnim i naučnim primenama. Koristeći ove biblioteke moguće je razviti vrlo kvalitetene alate za vizuelizaciju i verifikaciju modela terena (*Wiggenhagen 2000*). Druga opcija je korišćenje gotovih alata za vizuelizaciju u realnom vremenu. Primeri ovakvih alata su *Open Scene Graph* i *libMini* koje su besplatne i mogu se koristiti pod uslovima *GNU LGPL* (*Fritsch 2004*). Ovi alati su se pokazali kao vrlo efikasni u radu sa izuzetno velikim setovima podataka i vrlo su jednostavni za ugradnju u druga softverska okruženja.

Zajedničko za obe ove biblioteke je da se prikaz i vizuelizacija složenih prostornih 3D modela, a posebno je to slučaj sa modelima terena, po pravilu izvodi korišćenjem prostornih trouglova. Naime, ove grafičke biblioteke i hardver koji ih podržava su optimizovani upravo za brz rendering (iscrtavanje) velikog broja prostornih trouglova na displeju ekrana.

S obzirom da se radi o izuzetno velikom broju tačaka (nekoliko stotina hiljada, ili čak nekoliko miliona), a da se istovremeno uglavnom zahteva prikaz i kretanje po prostornom modelu u realnom, ili skoro realnom vremenu, potrebna je kvalitetna optimizacija prikaza. Postoji više tehnika za optimizaciju 3D vizuelizacije velikih setova podataka o terenu. Ove tehnike se prema vrsti podataka preko kojih se površ terena predstavlja mogu podeliti na:

- metode kod kojih su podaci uređeni u pravilnu strukturu podataka, tj. hijerarhijskim triangulaciju koja se najčešće bazira na kvadratnoj strukturi podataka (engl. *quadtree*);
- metode koje nemaju ograničenja u pogledu rasporeda visina iz ulaznih podataka – ove metode koriste TIN za predstavljanje mreže prostornih trouglova.

I u jednom i u drugom slučaju prikaz površi terena se izvodi tako što se kao osnovni element prikaza koristi prostorni trougao. Kod pravilnog rasporeda visina to znači da se element grida razbija na dva ili četiri trougla, dok je u slučaju nepravilnog rasporeda visina to trougao TIN-a. Cilj optimizacije je da se smanji broj trouglova koje je potrebno iscrtati za dati prikaz terena, a da se time ne naruši kvalitet prikaza. Optimizacija prema tome mora biti kontrolisana odgovarajućim pragom za grešku aproksimacije. Dodatno, različiti vidljivi delovi terena mogu biti iscrtani sa različitim LOD - nivoom detaljnosti (engl. *LOD – level-of-detail*). Ovo podrazumeva da triangulacija mora biti prilagođena tipu terena: veći trouglovi za delove terena sa zaravnjenom površinama, a manji trouglovi na složenijim delovima terena. Treba

naglasiti da neke od metoda iz prve grupe, rezultat rada kod nekih metoda koje za ulazne podatke. Pored toga, model triangulacije mora biti takav da omogućava brzu ekstrakciju predstava površi za promenljive zahteve u pogledu tačnosti prikaza, tako da višestruki LOD-ovi mogu biti podržani u toku izvođenja prikaza. Kod optimizacije vizuelizacije mora se voditi računa o sledećem:

- brzom postupku triangulacije podataka u zavisnosti od složenosti terena (i njegovog položaja u odnosu na poziciju posmatrača-kamere);
- kontinualan LOD prikaz modela sa efikasnom selekcijom delova modela koje je potrebno prikazati;
- efikasnom vođenju računa o kvalitetu geometrije;
- racionalnom smeštanju i brzom pristupu podacima;
- brzom iscrtavanju geometrijskih primitiva.

Efikasno predstavljanje površi terena prostornim trouglovima podrazumeva pojednostavljeno predstavljanje površi terena, tj. smanjivanje kompleksnosti prikaza tako da se sa smanjenim brojem prostornih trouglova predstavi površ terena. U zavisnosti od toga da li se radi o podacima uređenim u pravilnu, grid strukturu, ili je reč o mreži nepravilnih trouglova TIN (engl. *Triangular Irregular Network*), izvodi se na sledeće načine (Garland 1995):

- hijerarhijske metode podele prostora (engl. *hierarchical subdivision methods*) koje su bazirane na kvadratnim stablima, k-d stablima i hijerarhijskim triangulacijama
- metode sa izborom karakterističnih elemenata terena u jednom prolazu (engl. *feature methods*) kod kojih se skup karakterističnih tačaka terena (vrhovi, dna, vododelnice, vodoslivnice) biraju i koriste za formiranje triangulacije;
- metode profinjenja u više prolaza (engl. *multi-pass refinement methods*) koje započinju sa minimalnim setom podataka i triangulacijom koja aproksimira teren, a zatim se u sukcesivnim prolazima dodaju nove tačke u triangulaciju;
- metode decimacije u više prolaza (engl. *multi-pass decimation methods*) koje započinju sa triangulacijom koja se sastoji od svih tačaka iz ulaznog seta podataka, a zatim se triangulacija postepeno pojednostavljuje brisanjem iz triangulacije tačaka manje značajnih za predstavu terena
- druge metode, uključujući tu i tehnike izravnjanja, metode bazirane na postupcima optimizacije i sl.

Samo prva grupa metoda rezultira sa podacima koji su uređeni u jednu pravilnu strukturu podataka u vidu hijerarhijske triangulacije, dok je rezultat rada ostalih metoda nepravilna triangulacija - TIN. Kao što je to poznato, TIN može biti formiran po principu *Delaunay*-jeve triangulacije, čime se maksimizira minimalni ugao u mreži TIN-a ili po nekim drugim principima (minimizacija sume stranica TIN-a, minimizacija maksimalnog ugla u mreži i sl.). Ako se kod formiranja TIN-a koriste kao kriterijum i visine u datim tačkama, ond je reč o triangulaciji koja zavisi od podataka (engl. *data-dependant triangulation*).

Ukoliko se pri pojednostavljivanju prikaza, pored karakteristika površi koja se modelira, koristi i pozicija posmatrača, onda metod spada u grupu metoda za formiranje triangulacije koje zavise od pogleda (engl. *view-dependant triangulation*), u suprotnom radi se triangulaciji koja ne zavisi od pogleda (engl. *view-independant triangulation*). Svakako da je prva grupa metoda daleko bolja, jer se smanjuje broj trouglova koje treba iscrtati, ali su i algoritmi za realizaciju ovih metoda složeniji.

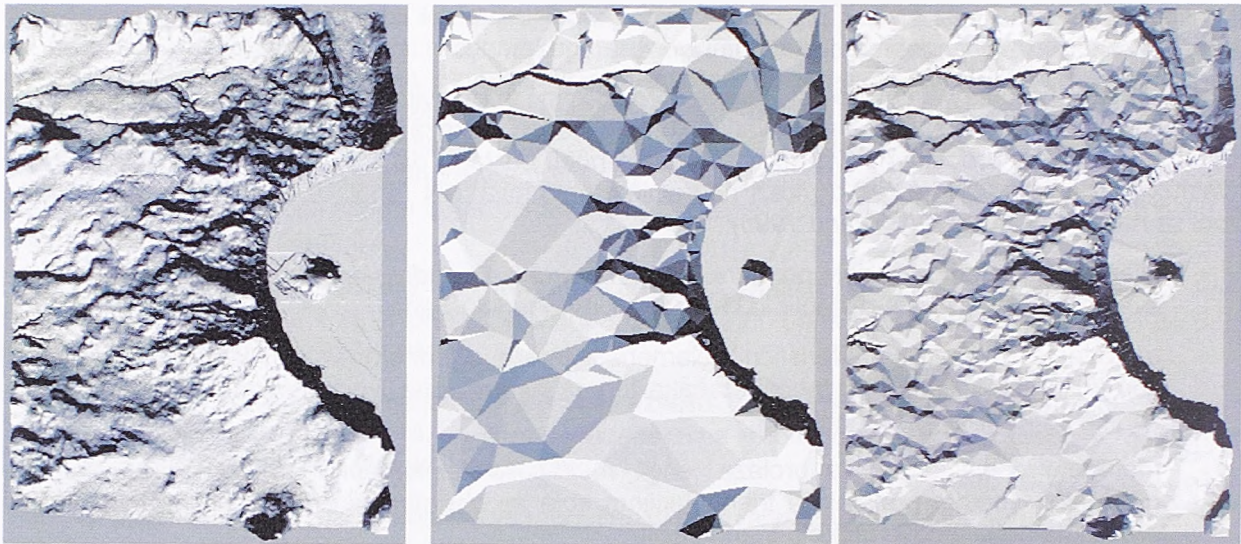
Generalno, koriste se tri pristupa za kontinualan LOD prikaz 3D modela, bez obzira na to da li je reč o pravilnoj ili nepravilnoj strukturi podataka:

- formiranje više verzija modela koji odgovaraju različitim LOD nivoima prikaza, pri čemu se u zavisnosti od pozicije posmatrača bira odgovarajuća LOD verzija modela (Garland 1995);
- formiranje hijerarhije mreža, čime su unutar jednog modela hijerarhijski već ugrađeni različiti LOD nivoi – kod prikaza se donosi odluka da li neki deo modela pada u vidno polje za prikaz, i ako pada koji LOD nivo treba izabrati za prikaz u zavisnosti od pozicije tog dela mreže u odnosu na posmatrača (Danovaro 2003, Floriani 2004);
- selektivno i progresivno profinjavanje i simplifikacija mreže u realnom vremenu, u zavisnosti od pogleda, orijentacije elemenata površi i greške aproksimacije (Hoppe 1998).



Svakako da su metode koje se zasnivaju na poslednjem pristupu najkvalitetnije, ali i najkompliciranije za implementaciju. Najčešće se mogu naći implementacije metoda koje koriste drugi pristup.

Kod razvoja metoda koje rade sa podacima uređenim u TIN strukturu podataka istraživanja su uglavnom usmerena ka brzom formiranju TIN-a sa redukovanim setom ulaznih podataka sa unapred zadatom greškom aproksimacije (Garland 1995, Sato 1999) i razvoj metoda za formiranje hijerarhijski uređenih TIN-ova u piramidalnu strukturu (Floriani 2004, Danovaro 2003). Kod formiranja TIN-a i redukcije podataka najčešće se koriste metode profinjavanja. Kod ovih metoda se formira inicijalni TIN, a zatim se u taj TIN insertuje u više prolaza po jedna nova tačka (sekvencijalni algoritam) ili više novih tačaka (paralelni algoritam). Kriterijum za selekciju tačaka koje se biraju za ubacivanje u TIN je najčešće greška u poznatoj i interpolovanoj visini za testiranu tačku.

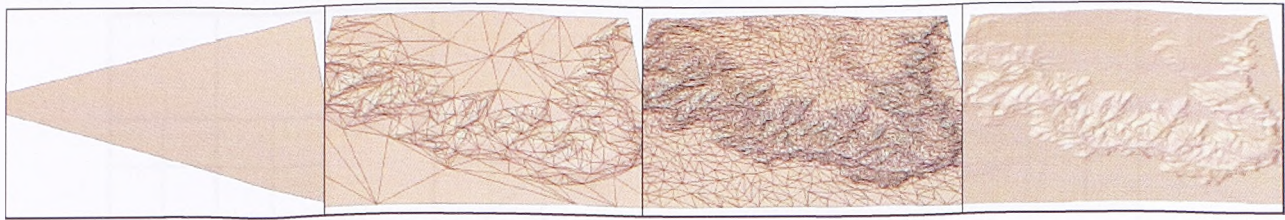


Slika 3-51 : Primer redukcije podataka kroz formiranje TIN-a – originalni set podataka (54224 tačke, levo), redukovani set tačaka sa 0.5% podataka (771 tačke, sredina) i redukovani set sa 5% podataka (7711 tačaka, desno) (Garland 1995)

Pored metoda profinjavanja koriste se i metode decimacije (simplifikacije) mreže koje polaze od kompletnog TIN-a, a onda koristeći određene kriterijume izbacuju iz mreže čvorove koji nisu relevantni za zadati nivo detaljnosti (Danovaro 2003, Kobbelt 1998). Simplifikacija mreže se obično izvodi u off-line režimu, dakle kao pretprocesiranje modela pre njegove vizuelizacije ili neke druge analize. Simplifikacija treba da se rukovodi morfološkim kriterijumima, tj. da očuva karakteristične oblike u modelu. Rezultat obrade je model terena sa multirezolucijom. Ovakav model omogućava kasniju on-line ekstrakciju modela sa varijabilnom rezolucijom, a u zavisnosti od korisnički definisanih zahteva (LOD). Da bi se očuvale morfološke karakteristike modela simplifikacija obično započinje sa deljenjem celokupnog domena na oblasti sa uniformnim morfološkim svojstvima. Kritične tačke i linije koje razdvajaju ove oblasti formiraju kritičnu mrežu. Tek nakon toga se vrši simplifikacija modela, uklanjanjem nepotrebnih čvorova mreže.

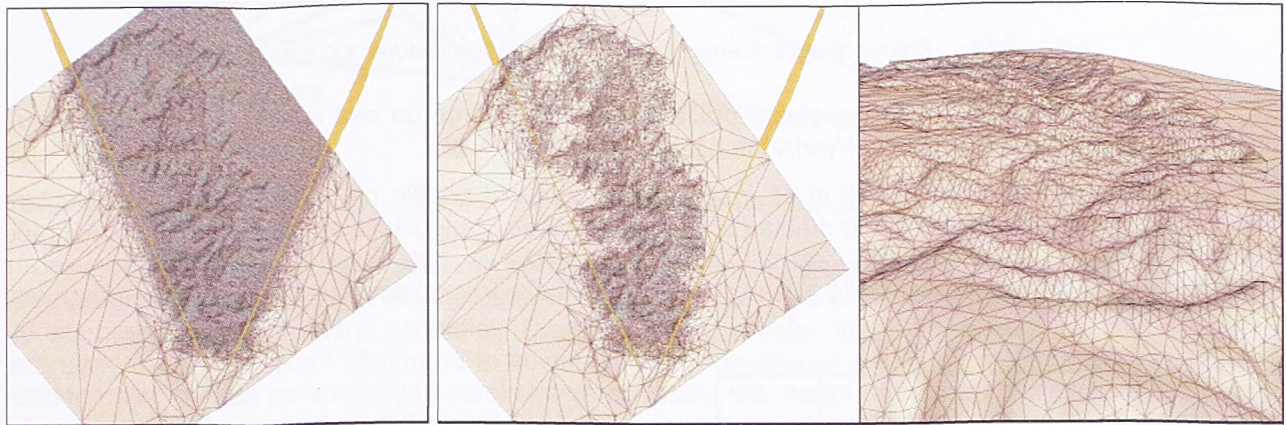
Razvijene su i metode za selektivno profinjavanje i pojednostavljivanje TIN-a u realnom vremenu, čime je uveden pojam progresivnih mreža (engl. *progressive mesh*). Iako je vladalo mišljenje da nije moguće ostvariti profinjavanje progresivnih mreža nepravilnog oblika (TIN) u realnom vremenu tokom samog prikaza, najnovija istraživanja i softverske implementacije su pokazale da je to ostvarljivo (Hoppe 1998). Pri tome se razlikuju progresivne mreže koje zavise od pozicije posmatrača (engl. *VDPM – View-dependant Progressive Mesh*) i mreže koje ne zavise od posmatrača (engl. *VIPM – View-independant Progressive Mesh*).





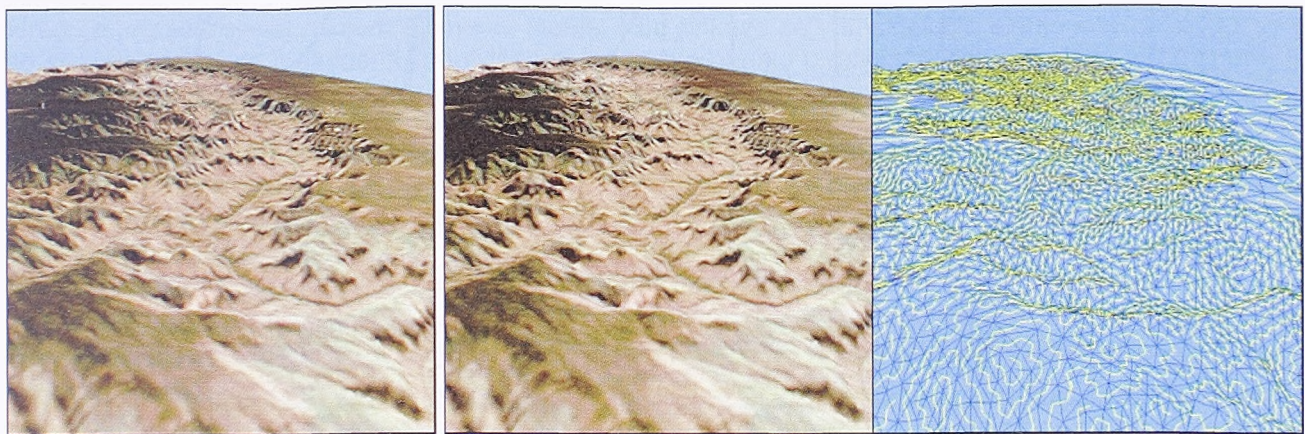
a) Osnovna mreža –  $M^0$  (1 trougao)    b)  $M^{514}$  (1000 trouglova)    c)  $M^{5066}$  (10000 trouglova)    d) Kompletna mreža -  $M^7$  (79202 trougla)

Slika 3-52 : VIPM progresivne mreže za LOD predstavljanje površi terena (Hoppe 1998)



a) Pogled odozgo ( $\tau=0.0\%$ , 33119 trouglova)

b) Pogled odozgo i sa strane ( $\tau=0.33\%$ , 10013 trouglova)



a) Pogled sa teksturom (79202 trouglova)

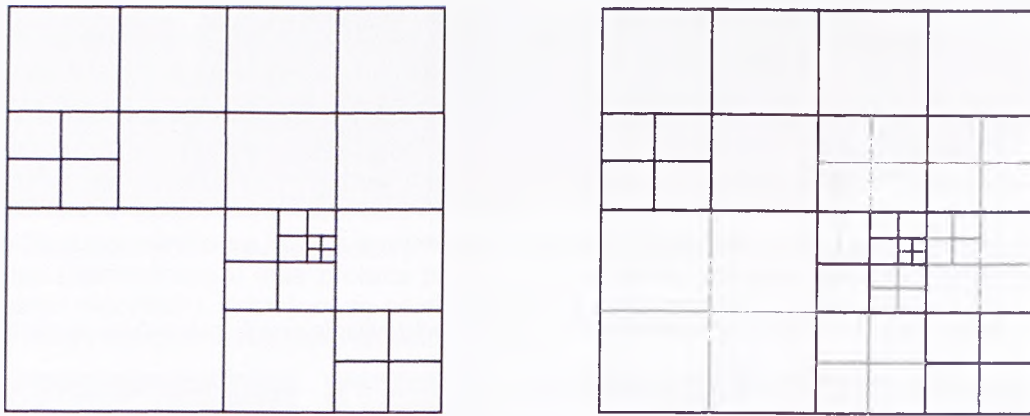
d) Pogled sa teksturom (10013 trouglova)

e) 764 generalizovana niza trouglova

Slika 3-53 : Profinjavanje mreže u zavisnosti od pogleda (VDPM) korišćenjem frustum (žuto) i greške za geometrijsku toleranciju u prostoru ekrana, i to 0% za a) i 0.33% veličine prozora ( 2 piksela za sliku od 600x600 piksela) za primere pod b), d) i e) (Hoppe 1998)

Gore pomenuti algoritmi sa VIPM i VDPM progresivnim mrežama nepravilnog oblika zahtevaju komplikovanu topologiju i hijerarhiju TIN-a za različite LOD-ove, algoritmi su komplikovani za implementaciju, potrebno je značajno vreme za procesiranje, kao i memorijski resursi. Zato su u praksi najviše zastupljene metode 3D vizuelizacije terena koje polaze od ulaznog seta podataka u formi visina uređenih u pravilnu mrežu – grid. Kroz postupke profinjavanja inicijalne, grube mreže ili postupke pojednostavlivanja inicijalne kompletne mreže grida, a na osnovu analize regiona, formira se hijerarhijska struktura podataka u formi kvadratnog stabla (engl. *quadtree*). Ovaj princip je dosta sličan principima progresivnog samplinga kod prikupljanja DMT podataka na analitičkim fotogrametrijskim instrumentima. Kao što je to prikazano na narednoj slici stablo može biti ograničeno (engl. *restricted*) i neograničeno (engl. *unrestricted*) (Pajarola 2002).

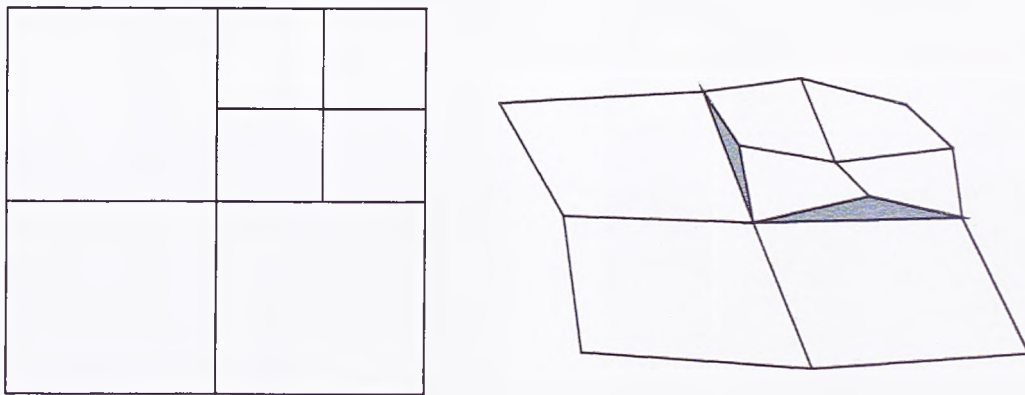




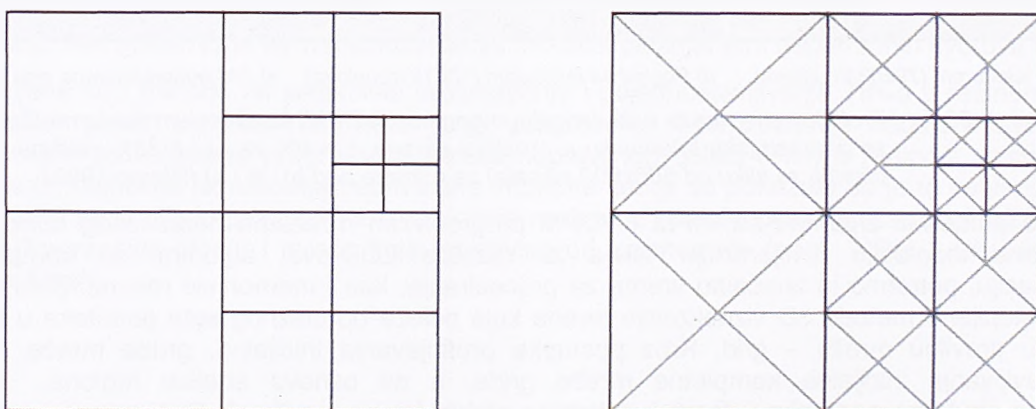
Slika 3-54 : Primer neograničenog (levo) i ograničenog kvadratnog stabla (desno)

Kod ograničenog kvadratnog stabla postavlja se ograničenje da dva susedna regiona moraju biti unutar jednog hijerarhijskog nivoa kvadratne hijerarhije.

Da bi se izbegli rascepi koji bi se inače pojavili kada bi se išlo na poligonalnu predstavu terena kvadratnim elementima kvadratnog stabla (Slika 3-55) vrši se triangulacija svakog regiona vodeći računa o njegovim susednim regionima. Zahvaljujući ograničenjima koja se uvode za ograničenu hijerarhiju kvadratnog stabla, ova triangulacija se naziva podudarajuća triangulacija (engl. *matching triangulation*) (Slika 3-56).

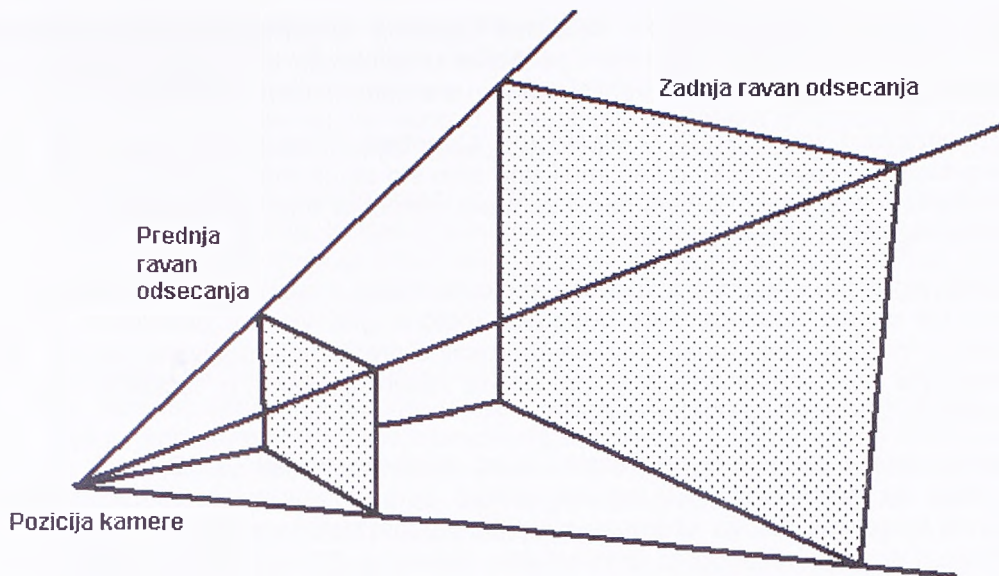


Slika 3-55 : Primer pukotina koje nastaju prilikom poligonalne predstave površi kvadratnim elementima kvadratnog stabla



Slika 3-56 : Podudarajuća triangulacija tačaka uređenih u kvadratno stablo

Optimizacija prikaza podrazumeva i tehnike za brzo selektovanje delova terena koji padaju u vidno polje posmatrača. U tom slučaju najčešće se koristi takozvana frustum selekcija (engl. *frustum culling*), kojom se testira da li objekat pada u vidno polje ograničeno sa 6 ravni (prednja, zadnja, gornja, donja, leva i desna). Ova optimizacija se koristi spregnuto sa LOD prikazom modela.



Slika 3-57 : Vidno polje (engl. view frustum)

Napredne tehnike frustum selekcije podrazumevaju da se ne testiraju svi elementi koji se iscrtavaju (u slučaju prikaza površi terena to su prostorni trouglovi), već da se ti elementi prostorno sortiraju i urede u jednu hijerarhijsku strukturu podataka. Drugim rečima, prostor koji se modelira se deli na manje, hijerarhijski uređene celine i obično su to kocke ili kvadri, po principu oktalnog stabla. Može se koristiti i kvadratno stablo kada se sortiranje i indeksiranje podataka vrši samo na osnovu projekcije u XOY ravni. Kod oktalnog stabla svaka kocka (kvadar) se sukcesivno deli na osam manjih kocki jednake veličine. Ovo deljenje se nastavlja dok se ne dostigne specificirani broj nivoa podele ili dok se ne postigne da u jednom elementu stabla nema više elemenata od unapred zadatog maksimalnog broja. Za svaki prostorni objekat određuje pripadnost najmanjem elementu stabla. Kod prikaza se vrši selekcija elemenata za prikaz tako što se prvo testira da li elementi iz najvišeg nivoa stabla padaju u celosti ili bar delimično u u frustum, tj. vidno polje kamere (posmatrača). Ako neki elemenat pada u vidno polje onda se svi objekti koji su povezani za njega iscrtavaju, a zatim se testiraju svi elementi stabla iz sledećeg nivoa koji pripadaju ovom elementu. Ako neki elemenat stabla pada potpuno van frustum, onda se prekida dalje testiranje svih elemenat koji se nalaze u njemu. U praksi se koriste i druge tehnike optimizacije frustum selekcije, tako što se prvo izvode jednostavniji, približni testovi, a zatim oni komplikovaniji i tačniji. Na primer, na početku se umesto tela definisanog sa 6 ravni odsecanja kao aproksimacija frustum koristi konus opisan oko frustum. Umesto testiranja da li kocka (kvadar) oktalnog stabla pada u frustum, testira se opisana lopta oko njega. Umesto testiranja da li neki složeni element koji treba iscrtati pada u frustum, prvo se testira neki jednostavniji geometrijski element koji ga aproksimira (najčešće opisani kvadar).

Za kontinualni LOD prikaz modela posebno je važan i brz pristup trouglovima mreže. Zato su razvijene posebne tehnike indeksiranja i arhiviranja trouglova mreže. S obzirom da se često ne mogu svi podaci smestiti u memoriju računara, posebno je važno da se podacima pristupa tako da se omogući što bolje keširanje podataka.

Pored toga, za brzo iscrtavanje niza trouglova na ekranu vrlo je važno da se trouglovi prosleđuju OpenGL-u (ili nekoj drugoj grafičkoj biblioteci) u formi niza trouglova (engl. *triangle strip*), pri čemu se za svaki naredni trougao u nizu daje samo jedna tačka dok se za ostala dva temena koriste poslednje dve tačke od prethodnog trougla. Upravo zato su i metode za prolazak kroz mrežu trouglova koje treba iscrtati takođe predmet istraživanja (Lindstrom 1996, Lindstrom 2002, Pajarola 2002).

Neki od poznatijih algoritama koji se baziraju na gore postavljenim principima sa manjim ili većim modifikacijama u pogledu kriterijuma za formiranje triangulacije i indeksiranje prostornih podataka su:

- *CLOD* algoritam (engl. *CLOD - continuous level-of-detail*) kod koje se inicijalna triangulacija kompletnog grida pojednostavljuje postepenim spajanjem trouglova; sa korišćenjem kriterijuma u vidu greške aproksimacije koja je u funkciji udaljenosti od posmatrača i koja je izražena u ekranskim koordinatama, sa usaglašenom metodom pristupa podacima i njihovom položaju na disku i obezbeđenom geomorfingu (eliminacija nepravilnosti na spojevima delova modela na različitim LOD nivoima), obezbeđena je vizuelizacija seta podataka veličine 1 gigabajta i na običnom PC računaru (Lindstrom 1996, Lindstrom 2002, Pajarola 2002);



- *ROAM* algoritam (engl. *ROAM – Real-time Optimally Adapting Meshes*) koji koristi pristup kao i *CLOD* algoritam; ovde je iskorišćen postupak organizacije trouglova u vidu hijerarhije binarnog stabla; optimizacija mreže se izvodi u relanom vremenu (*Duchaineau 1997*);
- *RQT* algoritam (engl. *RQT – Restricted Quadtree Triangulation*) kod koje se hijerarhijska triangulacija ne čuva direktno već implicitno tako što se uz svaku tačku grida, pored visina čuvaju i greške aproksimacije; na ovaj način se štedi memorija koja bi inače bila korišćena za strukturu kvadratnog stabla (*Pajarola 2002*);
- *SCAPE* algoritam i njegova softverska implementacija – ovaj algoritam se zasniva na formiranju TIN-a na osnovu ulaznog seta podataka (obično grid visina), postupnim ubacivanjem novih tačaka u inicijalni TIN, koristeći kriterijum lokalne greške interpolovane visine u tački kandidatu; primenjene su tehnike lokalnog preračuna novih grešaka u tačkama kandidatima nakon poslednjeg insertovanja (*Garland 1995*).

Biblioteka *libMini*, pomenuta na početku ovog poglavlja, koristi *CLOD* (engl. continuous level-of-detail) algoritam za optimizaciju 3D prikaza velikog seta podataka (*Lindstrom 1996*) i sa opcijom geomorfinga na spojevima delova terena sa različitim nivoom detaljnosti (LOD). Obiman skup materijala, linkova, softvera i drugog, vezanog za problematiku napredne 3D vizuelizacije terena i pojava na njemu može se naći na Internet prezentaciji [www.vterrain.org](http://www.vterrain.org).

### 3.5.2 Verifikacija DMT-a

Bez obzira kojom su metodom prikupljeni, podaci DMT-a su, kao uostalom i sva merenja, opterećeni neizbežnim greškama merenja. Svakako da otkrivanje i eliminacija grešaka u prikupljenim podacima za formiranje DMT-a ima izuzetno veliki značaj. Otkrivanje grešaka u podacima ove vrste otežano je, pre svega, zbog činjenice da se radi o vrlo velikoj količini prikupljenih podataka, pa je i prikupljanje značajnijeg broja kontrolnih merenja koja će ukazati na prisustvo grešaka nerealno. Uz to, sama površ terena po svojim karakteristikama je relativno nepravilnog oblika, pa i to otežava otkrivanje grešaka. Naime, često je vrlo teško na osnovu prikupljenih podataka sa sigurnošću utvrditi da li je pojava određene anomalije na modelu terena posledica grešaka u merenjima, ili stvarnog oblika površi terena.

Za verifikaciju prikupljenih DMT podataka na raspolaganju su:

- vizuelna verifikacija, i
- verifikacija primenom analitičkih metoda.

Po pravilu se ove metode verifikacije izvode tako što se na osnovu prikupljenih podataka formira DMT, pa se onda njegovom analizom otkrivaju greške u prikupljenim podacima ili se ocenjuje kvalitet tih podataka.

#### 3.5.2.1 Vizuelna verifikacija

Najčešća metoda za kontrolu prikupljenih podataka DMT-a je njihova vizuelna kontrola. Ova kontrola se najčešće izvodi na jedan od sledećih načina:

- pregled izohipsi konstruisanih na osnovu DMT-a generisanog korišćenjem prikupljenih podataka;
- superimpozicija prikupljenih podataka i/ili konstruisanih izohipsi i fotogrametrijskog stereomodela;
- vizuelni pregled 3D modela generisanog korišćenjem prikupljenih podataka na ekranu monitora;
- vizuelni pregled rezultata DMT analiza u grafičkom obliku (karte nagiba, karte sa greškama predikcije i sl.);
- pregled podužnih ili poprečnih profila terena na kritičnim mestima.

Glavna mana svih ovih metoda je u tome što su sve one subjektivne i u velikoj meri zahtevaju znatan nivo obučenosti osobe koja vrši kontrolu podataka. Osim toga, velika je verovatnoća da će i nakon izvršene kontrole neke greške ostati neotkrivene. Treba istaći i to da sve metode verifikacije koje se zasnivaju na analizi DMT-a dobijenog na osnovu prikupljenih podataka u značajnoj meri zavise i od kvaliteta primenjenih algoritama za formiranje i analizu tog DMT-a, tako da to treba takođe imati u vidu.

Vizuelna verifikacija izohipsi konstruisanih iz DMT-a formiranog na osnovu prikupljenih podataka ima za cilj da se analizom geometrije iscrtanih izohipsi oceni kvalitet dobijenog DMT-a i uoče eventualni nedostaci i greške u podacima. Pojava iznenadnih lomova na izohipsama ili pojava više zatvorenih izohipsi (udubljenje ili uzvišenje) na nekom mestu može biti signal da se radi o grešci u ulaznim podacima.

Kada se kontroliše DMT dobijen na osnovu digitalizacije postojećih podloga, gde su ulazni podaci po pravilu u formi izohipsi, praktikuje se da se na osnovu dobijenog DMT-a konstruišu izohipse sa ekvidistancijom koja je jednaka polovini ekvidistancije digitalizovanih izohipsi. Na taj način se može videti da li postoje neke nepravilnosti kod interpolacije visina iz DMT-a na mestima udaljenim od referentnih tačaka (tačke izohipsi). Konstruisane izohipse se mogu kod prikaza kombinovati sa digitalizovanim izohipsama da bi se proverio dobijeni DMT, odnosno ulazni podaci.

Superimpozicija prikupljenih podataka i/ili konstruisanih izohipsi u okviru fotogrametrijskog stereomodela (trodimenzionalna vizuelizacija podataka i foto-modela) je vrlo pouzdan način kontrole prikupljenih podataka i formiranog DMT-a. Ova mogućnost je standardno podržana na digitalnim fotogrametrijskim radnim stanicama, a nekad se realizuje i na analitičkim instrumentima. Vrlo često se koristi u praksi. Kod formiranja DMT-a na osnovu digitalizacije postojećih podloga, ova vizuelizacija ima smisla samo ako se sprovodi u okviru projekta izrade ortofotoa ili ažuriranja i dopune digitalizovanih podataka, tj. u slučajevima kada se već raspolaže sa aerofotogrametrijskim snimcima odgovarajuće razmere.

Vizuelni pregled 3D modela DMT-a generisanog korišćenjem prikupljenih podataka na ekranu monitora, kao i vizuelizacija konstruisanih izohipsi, ima za cilj da ukaže na eventualne nelogičnosti kod dobijenog DMT-a u morfološkom smislu. Kvalitetna 3D vizuelizacija sa dobro izabranim osvetljenjem, senkama i komandama za kretanje u okviru 3D modela može biti vrlo efektna za otkrivanje propusta u ulaznim podacima. Pri tome je neophodno obezbediti efikasan pristup i izmenu podataka sa greškom. Kod interaktivne verifikacije je takođe potrebno kroz posebne tehnike optimizacije obezbediti efikasan 3D prikaz velikih DMT-ova. Ove metode optimizacije su opisane u poglavlju 3.5.1.

I ostale metode vizuelne verifikacije se zasnivaju na vizuelnom pregledu grafičkog prikaza rezultata analize DMT-a formiranog na osnovu prikupljenih podataka.

### 3.5.2.2 Verifikacija korišćenjem analitičkih metoda

Za razliku od vizuelnih metoda verifikacije DMT podataka, gde je subjektivni uticaj stručnjaka koji verifikuje prikupljene podatke veoma značajan, analitičke metode verifikacije su daleko objektivnije. U ove metode verifikacije DMT-a ubrajaju se:

- upoređenje visina interpolovanih iz DMT-a sa poznatim visinama u datim tačkama;
- markiranje susednih digitalizovanih izohipsi čija je visinska razlika veća od osnovne ekvidistancije na planu ili karti;
- krosvalidacija i validacija;
- otkrivanje mesta u DMT-u sa nedovoljnom količinom podataka za rekonstrukciju površi terena korišćenjem različitih metoda interpolacije..

Tipičan primer analitičkih metoda verifikacije DMT-a sa kojim se mogu otkriti grube greške u podacima DMT-a je da se prikupi izvestan broj kontrolnih merenja. To su najčešće tačke sa poznatim visinama. Postupak se sastoji u tome da se na osnovu prikupljenih podataka, ali bez korišćenja kontrolnih merenja, formira privremeni DMT. Interpolacijom visina na osnovu ovog DMT-a u tačkama sa poznatim visinama i njihovim poređenjem sa poznatim visinama mogu se otkriti greške DMT-a, odnosno greške u prikupljenim podacima. Problem kod ovog postupka je što je obezbeđivanje kontrolnih tačaka vrlo skupo, pa ih nije moguće dobiti u većoj količini. Zbog toga mnoge greške mogu proći neopaženo u podacima DMT-a. Zato se ovaj postupak više koristi za dobijanje objektivne ocene o kvalitetu prikupljenih podataka



nego za otkrivanje i eliminaciju grešaka u njima. I u ovom slučaju izbor algoritama za formiranje DMT-a može značajno da utiče na donošenje odluka.

Krosvalidacija je standardna geostatička procedura koja se sastoji u tome da se iz ulaznog skupa tačaka sa poznatim vrednostima funkcije izbacij jedna tačka. Zatim se vrednost u toj tački odredi korišćenjem vrednosti u preostalim tačkama. Procedura se ponavlja željeni broj puta sa pojedinačnim izbacivanjem drugih tačaka iz ulaznog skupa. Razlike sračunatih i datih vrednosti predstavljaju osnov za ocenu kvaliteta metode interpolacije, ali se na ovaj način mogu otkriti i propusti i greške u prikupljenim podacima. Verifikacija podataka se može izvoditi i po metodi validacije. Ona se sastoji u tome da se iz ulaznog seta podataka izdvoje podaci koji neće učestvovati u formiranju DMT-a i koji će nakon formiranja DMT-a biti iskorišćeni za kontrolu tačnosti visina interpolovanih iz modela dobijenog na osnovu preostalih podataka.

Ostale analitičke metode za otkrivanje i eliminaciju grešaka mogu se osmisлити tako što se usvoje određene pretpostavki o karakteristikama površi terena i njenom modelu. Zatim se onda vrši provera tih pretpostavki kroz analizu DMT-a formiranog na osnovu prikupljenih podataka. Na primer, može se zahtevati da prikupljeni podaci omoguće vernu predstavu terena korišćenjem prostih metoda interpolacije i aproksimacije. Za slučaj modeliranja površi terena primenom TIN-a može se postaviti uslov da matematička površi terena dobijena korišćenjem ravnih trougaonih faceta i trouganih zakrpa koje predstavljaju delove kubnih površi ne odstupaju na celom području za više od utvrđenog kriterijuma. Na ovaj način se mogu otkriti greške visina ili položaja kod već izmerenih podataka, ali isto tako se mogu efikasno otkriti i mesta gde nema dovoljno prikupljenih podataka, što takođe predstavlja grešku kod prikupljanja podataka. Na ovaj način se obezbeđuje dobro obuhvatanje površi terena neophodnim brojem merenja, tj. bira odgovarajući uzorak. Rezultati ovih analiza se zatim prikazuju na ekranu na pogodan način, tako da korisnik može locirati i korigovati eventualne greške u podacima.

### 3.6 Zaključna razmatranja

Za kraj ovog razmatranja metoda formiranja i analize DMT-a još jednom treba podvući najznačajnije opšte karakteristike pojedinih metoda formiranja DMT-a i dati generalne preporuke kada je u pitanju njihova primena:

- kvalitet DMT-a se meri ne samo tačnošću i pouzdanošću visina koje se iz njega mogu dobiti, već i tačnošću i pouzdanošću drugih morfometrijskih parametara površi terena (nagib i pravac maksimalnog nagiba, krivina površi u ravni i po profilu, itd.), pa o ovome treba voditi računa kod izbora odgovarajuće metode interpolacije;
- ne postoji opšte prihvaćena najbolja univerzalna metoda interpolacije pogodna za formiranje DMT-a za sve tipove terena i vrstu i raspored ulaznih podataka; izbor odgovarajuće metode interpolacije je uslovljen podacima na osnovu kojih se vrši interpolacija (način prikupljanja podataka, tačnost podataka, gustina i raspored podataka), karakteristikama realne površi koja se modelira i namene DMT-a;
- izbor odgovarajuće metode i parametara interpolacije zahteva solidno poznavanje teorije digitalnog modeliranja terena i iskustvo; od velike pomoći u tom smislu mogu da budu softverski alati koji se zasnivaju na metodama krosvalidacije i validacije; problem je u tome što primena ovih metoda ne garantuje dobijanje optimalnih metoda i parametara interpolacije, pošto je u nekim slučajevima očuvanje geometrijskih svojstava površi terena važnije od visinske tačnosti DMT-a, a što je inače ciljna funkcija kod optimizacije primenom krosvalidacije i validacije (*Mitas 1999, Wood 1996*);
- posebno treba biti obazriv kod primene metoda interpolacije koje se baziraju na splajnovanju (splajn tankih ploča, splajn sa tenzijom, regularizovani splajn, TIN i splajnovanje trougaonim površinskim zakrpama) jer su ove metode vrlo osetljive na greške u ulaznim podacima i na raspored tačaka sa visinama u ulaznim podacima; zato kod primene ovih metoda treba posebno obratiti pažnju na filtriranje podataka (otklanjanje šumova i slučajnih grešaka merenja); za te potrebe se mogu koristiti ili geostatističke metode (kriging ili kolokacija) ili neka od varijacionih metoda za popravljavanje površi (poglavlje 3.3.2.1, *Desbrun 2000, Kobbelt 1998, Pfeifer 2002*);

- najlošiji kvalitet kako u smislu visinske tačnosti, tako i u smislu ostalih pokazatelja kojima se ocenjuje kvalitet DMT-a (nagibi, krivina površi, i dr.) ostvaruje se korišćenjem metoda interpolacije kao što su metoda inverznih odstojanja i TIN sa linearnom interpolacijom;
- statističke metode interpolacije (kriging i kolokacija) su kvalitetne metode interpolacije i jedine kod kojih se kroz obradu podataka dobija i ocena tačnosti interpolacije, ali i metode koje karakteriše obiman proračun.

Formiranje i organizacija DMT-a korišćenjem pravilne mreže tačaka, tj. grida je u prošlosti bila dominantna, pre svega zbog svoje jednostavnosti. Ovo se odnosi na samu organizaciju podataka, ali i na algoritme i numeričke postupke za analizu površi terena. I danas se ovaj pristup često koristi, najviše iz razloga efikasnog rukovanja DMT-om sastavljenim od velike količine podataka (stotine hiljada i milioni) visina. Prednost ovog pristupa ogleda se i u mogućnosti primene brojnih algoritama i postupaka razvijenih za digitalnu obradu slika (filteri, kompresija, formati zapisa, i sl.). Međutim, fleksibilnost i univerzalnost TIN DMT-a učinili su da se ovaj pristup danas koristi sve više. Zahvaljujući napretku računarskog hardvera i softvera, ovaj pristup digitalnom modeliranju terena se može uspešno primeniti i za rukovanje DMT-om većom količinom podataka. Ovakav način modeliranja površi terena je posebno zastupljen u fazi prikupljanja i verifikacije prikupljenih podataka (interaktivna vizuelizacija i izmena i dopuna prikupljenih podataka). Pristup sa pravilnom mrežom tačaka za ove namene je vrlo ograničenih mogućnosti i po pravilu se vrlo retko koristi.

Za modeliranje površi terena korišćenjem postupaka triangulacije ulaznog seta podataka i predstavljanja površi terena prostornim trouglovima (trougaonim facetama) ili trougaonim površinskim zakrpama važi sledeće:

- algoritmi i softver za formiranje mreže trouglova danas se, zahvaljujući velikom broju kvalitetnih algoritama, mogu vrlo uspešno realizovati i koristiti za obradu izuzetno velike količine podataka; tome svakako značajno doprinosi i visok stepen razvoja računarskog hardvera i softvera; kod implementacije ovih algoritama treba posebno obratiti pažnju na robustnost ovih algoritama s obzirom na greške u podacima i greške numeričkog proračuna;
- triangulacija ulaznog seta podataka se najčešće izvodi tako da se dobije Delaunay-jeva triangulacija; ova triangulacija ima vrlo korisna svojstva i omogućava brojne analize podataka korišćenjem tih svojstava;
- za modeliranje površi terena korišćenjem Bézier-ovih trougaonih površinskih zakrpa na raspolaganju je veliki broj numeričkih postupaka koji obezbeđuju kontinualnost i glatkost modela površi terena; ovi postupci su uglavnom razvijeni za potrebe kompjuterski podržanog geometrijskog projektovanja – CAGD, ali se mogu uspešno koristiti i za modeliranje površi terena;
- postoje i drugi postupci za rekonstrukciju površi korišćenjem mreže trouglova, kao što su postupci zasnovani na sukcesivnom deljenju i profinjavanju mreže (poglavlje 3.3.2.4), ali su ovi postupci slabo zastupljeni i nedovoljno istraženi kada je reč o njihovim primenama za digitalno modeliranje terena.

Za rekonstrukciju površi terena na osnovu podataka dobijenih digitalizacijom postojećih podloga mogu se formulisati sledeći zaključci:

- opšte metode interpolacije nisu u stanju da iskoriste sve informacije koje su sadržane u podacima digitalizovanim sa postojećih podloga i samim tim ne obezbeđuju DMT dovoljnog kvaliteta; posebno su problematični rezultati u delovima terena gde se javljaju vododelnice, vodoslivnice, vrhovi, dna i sl;
- standardna GIS softverska rešenja retko nude kvalitetne metode interpolacije koje su u stanju da iskoriste sve raspoložive informacije (rasute tačke, karakteristične tačke i linije terena, izohipse); izuzetak su *Topo To Raster* metod ArcGIS-a koji je zasnovan na ANUDEM algoritmu po metodi konačnih razlika sa forsiranjem odvodnjavanja (*Hutchinson 1988, Hutchinson 1989, Hutchinson 1996, ESRI 2004*); specijalizovani softveri za DEM interpolaciju kao što su pomenuti ANUDEM softver i SCOP takođe raspolazu visoko kvalitetnim metodama interpolacije (*Heitzinger 2001, w14*);
- jedno od najčešće korišćenih rešenja za uspešnu primenu opštih metoda interpolacije je da se podaci koji se sastoje od digitalizovanih izohipsi dopune podacima koji se odnose na karakteristične tačke i linije terena; ovi podaci se mogu prikupiti naknadnim merenjima (najčešće su to fotogrametrijska merenja) ili analizom digitalizovanih izohipsi i ekstrakcijom



karakterističnih elemenata terena (ovo se najčešće izvodi softverski, automatskim procedurama); postoji veliki broj specijalizovanih postupaka razvijenih upravo za ovu namenu.

## 4 RAZVOJ NUMERIČKIH POSTUPAKA I SOFTVERA ZA FORMIRANJE I VERIFIKACIJU DMT-A

U okviru ovog poglavlja opisan je razvoj numeričkih postupaka i originalnog softvera za formiranje i verifikaciju DMT-a. Za ovaj razvoj, kao i za predstavljanje rezultata tog razvoja, intenzivno su korišćena najnovija dostignuća iz oblasti digitalnog modeliranja terena izložena u poglavlju 3. Procenjeno je da se kroz ovaj razvoj mogu ostvariti značajne pretpostavke za implementaciju i dalje unapređenje tehnologije digitalnog modeliranja terena kod nas. Takođe, razvijeni alati treba da podrže realizaciju metodologije formiranja nacionalnog DMT-a koja je predložena u poglavlju 5 ovog rada.

### 4.1 Polazne pretpostavke i osnovna koncepcija

Jedan od osnovnih pretpostavljenih ciljeva razvoja je da se obezbedi morfološki verna rekonstrukcija površi terena na osnovu svih raspoloživih vrsta ulaznih podataka: digitalizovane izohipse i visine tačaka nepravilno raspoređenih po terenu, strukturne i prelomne linije terena i tačke u pravilnom gridu (sistematski sampling). Prednost je data razvoju postupaka koji će biti u stanju da iskoriste sve informacije sadržane u bilo kojoj kombinaciji ulaznih podataka za formiranje DMT-a. Nisu razmatrana rešenja koja bi podrazumevala korišćenje posebnih softverskih alata u zavisnosti od vrste ulaznih podataka i namene DMT-a. Posebna pažnja je posvećena rekonstrukciji površi terena na osnovu ulaznih podataka u vidu izohipsi, jer se pošlo od pretpostavke da to može biti jedan od najznačajnijih izvora podataka za formiranje nacionalnog DMT-a.

Kada je reč o izboru osnovne strukture i organizacije DMT-a polazna pretpostavka je bila da DMT baziran na TIN-u nudi najviše prednosti kada je reč o prihvatanju podataka iz različitih izvora. Ovakva struktura i organizacija DMT-a, kako je to već detaljno izloženo u poglavlju 3.1.2, omogućava jednostavno formiranje DMT-a bez obzira na raspored, gustinu i topologiju (tačke, linije ili površine) ulaznih podataka. Sa druge strane, iz analize sprovedene u poglavljima 3.3.1 i 3.3.2 može se zaključiti da se u stručnoj i naučnoj literaturi može naći veliki broj algoritama i numeričkih postupaka za samo formiranje TIN-a i modeliranje površi terena na osnovu tako formiranog TIN-a.

Iz pregleda najnovijih dostignuća u oblasti digitalnog modeliranja terena izloženog u poglavlju 3.4.2, takođe se može zaključiti da je najveći deo istraživanja kada je reč o rekonstrukciji površi terena na osnovu izohipsi zasnovan upravo na TIN modelu podataka. Kod formiranja TIN DMT-a na osnovu izohipsi omogućena je kvalitetna rekonstrukcija površi terena i u slučajevima kada pojedine izohipse nedostaju, ili su izohipse prekinute, ili postoje i dodatne izohipse na manjem visinskom intervalu. Ovi podaci po potrebi mogu vrlo jednostavno biti dopunjeni i dodatnim merenjima što ne bi trebalo bitno da utiče na razvijene algoritme i numeričke postupke za formiranje TIN DMT-a.

Formiranje nacionalnog DMT-a podrazumeva rad sa izuzetno velikom količinom podataka. Može se očekivati da će ti podaci biti prikupljeni u različitim epohama i uz korišćenje različitih tehnika i metoda rada. Zato treba predvideti i pojavu velikog broja grešaka u podacima, bilo da su one nastale tokom prvobitnog prikupljanja podataka ili u postupku prevođenja već postojećih podataka u digitalni oblik. Razumljivo je onda da poseban značaj u celokupnoj metodologiji rada zauzimaju i procedure za verifikaciju tih podataka i otklanjanje uočenih grešaka u njima. Jedan od osnovnih ciljeva ovog razvoja su prema tome i softverski alati za efikasnu i kvalitetnu verifikaciju velike količine prikupljenih podataka. Ovo podrazumeva visoku efikasnost svih numeričkih postupaka i algoritama, kao i mogućnost povezivanja razvijenih softverskih alata sa drugim softverskim alatima za prikupljanje i rukovanje prostornim



podacima. I ovde se TIN pokazao kao vrlo podesna struktura podataka. TIN DMT se vrlo jednostavno može formirati za manji skup podataka, a u cilju verifikacije tako formiranog DMT-a i samih podataka. Pri tome se mogu koristiti isti alati koji će biti korišćeni i kasnije za formiranje konačnog DMT-a. Na ovaj način može se uspešno realizovati koncept on-line verifikacije prikupljanja DMT podataka, bez obzira da li je reč o primarnim ili sekundarnim metodama prikupljanja (Aumann 1992). Kod TIN-a je obezbeđena neposredna veza između prikupljenih podataka i samog DMT-a, jer su podaci merenja direktno uključeni u samu strukturu DMT-a. Ovo procedure za otkrivanje i eliminaciju grešaka u ulaznim podacima čini krajnje jednostavnim za implementaciju. I postupci 3D vizuelizacije, kao efikasne metode verifikacije podataka, vrlo često se implementiraju korišćenjem prostornih trouglova, pa je i to prednost ovakvog pristupa.

## 4.2 Softversko okruženje za razvoj

Pri razvoju se pošlo od sledećih osnovnih zahteva koje treba da ispuni softver za obradu i verifikaciju prikupljenih DMT podataka:

- rukovanje velikom količinom podataka;
- visoke performanse u pogledu brzine procesiranja podataka, jer se najčešće radi u interaktivnom režimu rada;
- relativno veliki fond funkcija za rukovanje DMT-om (formiranje DMT-a i analize);
- relativno niska cena po radnom mestu, jer se radi o alatima koje treba obezbediti za više editorskih radnih mesta;
- mogućnost objedinjavanja više raznorodnih podataka u jedinstvenom okruženju (DMT podaci, vektorski sadržaj, rasterske podloge);
- podrška različitim formatima podataka (vektorski, rasterski, DMT);
- mogućnost mrežnog rada.

Za razvoj i softversku implementaciju tehnoloških postupaka i rešenja za obradu i verifikaciju podataka visinske predstave izabrani su softverski paketi *Surfling* i *MapSoft*. To su alati koje je autor, zajedno sa grupom autora, razvio i konstantno unapređuje počevši od 1992. godine. Procena autora je da se gore navedeni zahtevi mogu uspešno zadovoljiti funkcijama koje, ili već postoje, ili se mogu dodatno implementirati u okviru pomenutih softverskih okruženja. Zato su u ovom poglavlju dati i osnovni koncepti i karakteristike pomenutog softvera.

Ovakav pristup je opravdan iz sledećih razloga:

- koncepcija na kojoj su bazirani ovi alati u velikoj meri odgovara zahtevima koji su gore postavljeni;
- nema ograničenja koja su posledica neke usvojene koncepcije, tj. mogu se razviti visoko specijalizovani alati;
- korišćenjem ovih alata razvijeni numerički postupci mogu se direktno implementirati u okviru same aplikacije bez opasnosti da će performanse procesiranja biti dovedene u pitanje usled generalne koncepcije aplikacije;
- moguće je unutar postojećih algoritama vršiti modifikacije u cilju postizanja željenih rezultata (modifikacija algoritma za formiranje TIN-a, iterativno formiranje TIN-a i proračun normala na površ terena, modifikacija algoritma za 3D prikaz DMT-a), što je po pravilu neizvodljivo ili komplikovano kada je reč o komercijalnim softverskim rešenjima;
- moguće je povezivanje više aplikacija u jednu jedinstvenu tehnološku celinu;
- moguće je razviti softverska rešenja koja bi bila primenljiva u praksi za relativno jeftino osposobljavanje više radnih mesta, bez potrebe za licenciranjem skupog softvera;
- razvijena softverska rešenja mogu poslužiti za dalja istraživanja i razvoj.

Najveći deo eksperimenata sprovedenih u okviru ovog istraživanja izveden je korišćenjem upravo ovih softverskih alata i razvijenih rešenja. To ujedno predstavlja i potvrdu njihove primenljivosti za napredne obrade i analize kod digitalnog modeliranja terena kakve se i inače zahtevaju od softvera za podršku prikupljanju i verifikaciji DMT podataka i formiranju DMT-a.

#### 4.2.1 MapSoft

*MapSoft* je softver čija je prvobitna namena rukovanje digitalnim sadržajem krupnorazmernih geodetskih planova i karata. Zato je i glavni akcenat kod razvoja *MapSoft*-a i bilo obezbeđenje kvaliteta geometrije i topologije prostornih podataka. Posebna pažnja je posvećena podršci prikupljanju i verifikaciji prostornih podataka.

Osnovne karakteristike softvera i koncepti na kojima je ovaj softver zasnovan su:

- svi prostorni (geometrija i topologija) i tematski atributi prostornih entiteta čuvaju se u georelacionoj bazi podataka koja je jedinstvena za jedan projekat i bez vidljive podele na manje prostorne jedinice (listovi plana ili karte);
- osnovni prostorni entiteti su tačka, linija i površina;
- za rukovanje georelacionom bazom podataka koriste se standardni RDBMS alati i formati baza podataka - *DBF* tabele, *Access*, *Microsoft SQL Server*, *Oracle*;
- svi prostorni entiteti indeksirani su koristeći tehniku kvadratnog stabla (engl. *Quadtree*) što obezbeđuje efikasan pristup i rukovanje prostornim podacima;
- u memoriji računara čuvaju se samo privremeni podaci koji omogućavaju brže procesiranje;
- gore pomenuti koncepti omogućili su efikasno rukovanje sa velikom količinom podataka unutar jednog projekta, standardizovanu obradu podataka drugim softverskim alatima, i mrežni rad uz istovremen pristup i izmene podataka od strane više korisnika;
- omogućeno je povezivanje prostornog sadržaja sa sadržajem koji se vodi u drugim relacionim bazama podataka;
- podržano je više tehnika prikupljanja podataka (digitalizacija sa ekrana korišćenjem rasterskih slika - skenirane podloge i ortofoto, digitalizacija na digitajzeru, restitucija na analognom fotogrametrijskom instrumentu);
- korisniku su na raspolaganju standardne funkcije za efikasno rukovanje prostornim sadržajem (izmene, pretraživanje, brisanje, i dr.) ;
- podržana je obostrana konverzija sa drugim GIS i CAD softverima koristeći standardne formate (*AutoCAD DXF*, *ESRI shape*, *MapInfo MIF*, *DBF* i drugi);
- mogućnost uvoza u radno okruženje neograničeno velikog broja georeferenciranih rasterskih podloga u praktično svim standardnim formatima (TIF, JPEG, BMP, PNG, BMP, PCX, ECW i dr.) i njihovo efikasno procesiranje i prikaz;
- podržana je mogućnost istovremenog rukovanja sa podacima iz više nezavisnih projekata, tj. objedinjavanje više projekata (bez konverzije i fizičkog objedinjavanja podataka) u grupu projekata;
- razvijeni su posebni moduli specifični za razne geodetske poslove (rad sa zapisnicima terenskog snimanja, COGO alati, računanje površina, održavanje planova);
- softver karakteriše standardni *Windows* korisnički interfejs sa velikim mogućnostima podešavanja okruženja (meniji, palete alatki, "vrući" tasteri, i sl.).

Kvalitet ovog softvera u smislu funkcionalnosti i performansi je proveren na brojnim projektima na kojima je primenjen. To su uglavnom projekti koji se odnose na državni premer, tj. izradu i održavanje krupnorazmernih katastarskih i topografskih podloga u razmerama 1:500 do 1:5000. Najčešće se radi o projektima koji se odnose na cele katastarske opštine, ali ima i projekata sa ciljem izrade topografskih podloga za posebne namene. Drugi projekti na kojima je softver takođe dokazao svoju primenljivost su projekti razvoja i implementacija krupnorazmernog GIS-a (elektrodistribucija, urbanizam, vodovod, i sl.). U



praksi je isproban i potvrđen komforan rad sa bazama podataka u kojima je smešteno više miliona prostornih entiteta.

Ono što je posebno bitno za ovaj softver kada je u pitanju mogućnost njegovog korišćenja kod formiranja DMT-a, je njegova tesna veza sa softverom *Surflng*. Naime, *MapSoft* sa svojim funkcijama za prikupljanje, obradu i analize prostornih podataka, u kombinaciji sa *Surflng*-om i njegovim naprednim funkcijama za formiranje DMT i 3D analize i vizuelizaciju, čine solidnu softversku podršku digitalnom modeliranju terena. U najvećem broju slučajeva korisnik i nema osećaj da se radi o nezavisnim i odvojenim aplikacijama, već se komunikacija i razmena podataka između ovih aplikacija odvija u pozadini ne opterećujući samog korisnika.

Glavni nedostatak ovog softvera je što ne raspolaže bogatim fondom funkcija za interaktivno prikupljanje i editovanje prostornih podataka koji bi se mogao uspešno meriti sa najpoznatijim komercijalnim CAD i GIS softverima. Zato je prikupljanje i obrada prostornih podataka sa *MapSoft*-om manje komforno i efikasno nego kada se koriste standardni CAD i GIS softverski alati. Pored toga, softver ne raspolaže funkcijama za automatsko otkrivanje i korigovanje grešaka u geometriji i topologiji prostornih podataka, što inače može biti vrlo korisno kada je reč o digitalizaciji postojećih podloga.

#### 4.2.2 Surflng

*Surflng* je softversko rešenje koje je nastalo kao rezultat istraživanja i razvoja koje je autor započeo još 1993. godine u okviru izrade magistarskog rada (*Cvijetinović 1995*). Konceptija koja je tada postavljena u pogledu tehnologije prikupljanja i obrade digitalnih podataka visinske predstave terena važi i danas. Ova konceptija i *Surflng* i *MapSoft* kao njena softverska podrška su provereni tokom protekle decenije na brojnim projektima prikupljanja, obrade i verifikacije DMT podataka. Neki od tih projekata su:

- premeri krupne razmere (1:1000 i 1:2500) - Bileća (premer totalnim stanicama, površina ~12.5km<sup>2</sup>, karakterističan teren sa velikim brojem podzidova), Kragujevac (aerofotogrametrijska restitucija na analognim fotogrametrijskim instrumentima, površina ~125km<sup>2</sup>), područje Tivatskog zaliva (aerofotogrametrijsko snimanje i stereorestitucija na analognim fotogrametrijskim instrumentima) i mnogi drugi projekti državnog premera; *MapSoft* i *Surflng* su korišćeni za podršku prikupljanju i verifikaciji podataka, kao i za formiranje finalnog DMT-a;
- snimanja situacija 1:1000 i 1:2500 - Deonica autoputa E80 Niš-Dimitrovgrad, autoput Južni Jadran deonica Ostružnica-Takovo za potrebe izrade digitalnih topografskih podloga i DMT-ova razmera 1:1000 i 1:2500, kao i mnoga druga snimanja klasičnim i aerofotogrametrijskim metodama; *MapSoft* i *Surflng* su u okviru realizacije ovih projekata korišćeni za podršku prikupljanju i verifikaciji podataka, kao i za formiranje finalnog DMT-a;
- izrada DMT-a za potrebe ortofotoprodukcije (uglavnom u razmeri 1:5000) - Beograd 2001 (~1000km<sup>2</sup>), Beograd 2003 (~3160km<sup>2</sup>), Pančevo (~760km<sup>2</sup>), Lazarevac i Lajkovac (~800km<sup>2</sup>), Smederevo (~570km<sup>2</sup>), Požarevac (~160km<sup>2</sup>), Loznica (~700km<sup>2</sup>), Valjevo (~1100km<sup>2</sup>), Čačak (~635km<sup>2</sup>), Čajetina (razmera 1:1000, ~25km<sup>2</sup>), Vrnjačka Banja (~300km<sup>2</sup>), Aranđelovac (~60km<sup>2</sup>), Novi Pazar (~860km<sup>2</sup>) i drugi; prikupljanje DMT podataka na ovim projektima je rađeno uglavnom merenjem na digitalnim fotogrametrijskim sistemima, a u manjem obimu i na analognim fotogrametrijskim instrumentima povezanim sa računarima; za manja područja podaci su prikupljeni digitalizacijom podataka sa postojećih karata ODK 1:5000, a zatim su ti podaci verifikovani i dopunjeni merenjima na digitalnim fotogrametrijskim sistemima; u svim pomenutim projektima *MapSoft* i *Surflng* su korišćeni za integraciju podataka i formiranje DMT-a, a u nekim od njih i za prikupljanje podataka (restitucija na analognim fotogrametrijskim instrumentima);
- prikupljanje DMT podataka za izradu digitalnih topografskih karata razmere 1:5000 za delove Beograda (39 karata, ~260km<sup>2</sup>) i Pančeva (15 karata, ~100 km<sup>2</sup>); prikupljanje DMT podataka je rađeno na digitalnim fotogrametrijskim sistemima; digitalni modeli terena su verifikovani i formirani korišćenjem *MapSoft*-a i *Surflng*-a.

Osnovna konceptija i karakteristike *Surflng*-a su:

- za formiranje i analizu DMT-a se koristi metoda TIN-a i splajnovanje kubnim trougaonim zakrpama, (podržane su i linearna interpolacija trougaonim facetama i predstavljanje površi terena trougaonim zakrpama petog stepena, ali ove se opcije ređe koriste) (poglavlje 3.3.2.3);

- u okviru softvera je implementiran algoritam za formiranje Delaunay-jeve triangulacije sa inkrementalnim insertovanjem tačaka u triangulaciju i modifikovanjem dobijene triangulacije za obavezne linije, tj. formiranje ograničene Delaunay-jeve triangulacije;
- podržane su sve važnije DMT analize (proračun visina u zadatim tačkama, konstrukcija i isrtavanje izohipsi sa glačanjem, ispisom kota i izostavljanjem izohipsi na strmim područjima i posebno naznačenim područjima, interpolacija visina po podužnim i poprečnim profilima i izrada odgovarajućih grafičkih izlaza, računanje zapremina, interpolacija visina u pravilnoj mreži tačaka - gridu), i dr.;
- omogućena je kvalitetna 3D vizuelizacija DMT-a korišćenjem OpenGL-a i naprednih tehnika za optimizaciju prikaza - oktalno stablo (engl. *octtree*) i selekcija elemenata koji padaju u vidno polje kamere (engl. *frustum culling*) (poglavlje 3.5.1);
- softver je razvijen korišćenjem profesionalnih alata za razvoj softvera; pored postizanja visokih performansi u obradi podataka, ovo je omogućilo i zadovoljavanje zahteva koji se postavljaju pred današnje *Windows* aplikacije, kako u pogledu same arhitekture aplikacije, tako i u pogledu korisničkog interfejsa (Slika 4-1);
- aplikacija je integrisana i povezana sa *MapSoft*-om, ali može da funkcioniše i samostalno; za korisnika je prelazak iz *MapSoft*-a u *Surflng* neprimetan, a rezultati DMT analiza iz *Surflng*-a mogu se vizuelizovati i u *MapSoft*-u, zajedno sa ostalim prostornim sadržajem.

Detaljniji prikaz funkcionalnosti same aplikacije i implementiranih numeričkih postupaka i algoritama dat je u narednim poglavljima.

### 4.3 Formiranje TIN-a

Formiranje TIN-a je svakako jedan od važnijih algoritama koje je trebalo realizovati. Delaunay-jeva triangulacija se nametnula kao logičan izbor, kako zbog velikog broja zrelih algoritama za njeno formiranje, tako i zbog mnogobrojnih korisnih svojstava koje ona poseduje (poglavlje 3.3.1). Tu se posebno misli na njenu vezu sa Voronoi dijagramom i mogućnostima koje se tu otvaraju za određivanje srednjih osa izohipsi (poglavlje 3.4.2.1).

Za implementaciju je izabran algoritam sa inkrementalnim insertovanjem tačaka (poglavlje 3.3.1.1). U pomenutom poglavlju je već konstatovano da su ispitivanja efikasnosti pojedinih algoritama za formiranje DT pokazala da su algoritmi koji rade na principu "podeli i osvoji" najefikasniji. Međutim, izabran je algoritam sa inkrementalnim insertovanjem tačaka, jer je on najjednostavniji za implementaciju. Podjednako važno je i to što se jednostavnom modifikacijom ovog algoritma može postići naknadno dodavanje novih podataka u postojeću triangulaciju neograničen broj puta nakon što je DT već formirana. Ovo je posebno interesantno za implementaciju softverskih alata za podršku prikupljanju i verifikaciji DMT podataka.

Imajući u vidu današnje računarske resurse, algoritam je implementiran tako da se podrazumeva smeštanje kompletnog TIN-a u memoriju računara. Na ovaj način mogu se formirati digitalni modeli terena od više miliona tačaka. Algoritam je baziran na korišćenju trouglova (temena i susedni trouglovi) kao osnovne strukture za predstavljanje TIN-a u memoriji i na disku računara (Slika 3-5). Osnovne strukture podataka tj. tabele koje se vode za formirani DMT su: čvorovi TIN-a, trouglovi i izvodi površi terena u čvorovima TIN-a. Pored geometrije (koordinate čvorova TIN-a) i topologije TIN-a (indeksi temena i susednih trouglova za svaki trougao TIN-a), za čvorove TIN-a, kao i za stranice trouglova i same trouglove, vode se odgovarajući atributi u smislu njihovog prostornog značenja.

Čvorovi TIN-a se, prema svome značenju, dele na:

- masovne, tj. obične rasute tačke;
- lokalne ekstremume (vrh, dno);
- tačke strukturnih ili prelomnih linija terena;
- tačke bez poznatih visina.

Za svaku tačku vodi se i informacija o tome da li joj je visina poznata ili joj je naknadno određena (interpolovana) iz DMT-a tokom samog formiranja DMT-a.



Stranice TIN-a klasifikuju se na:

- linije bez posebnog značenja;
- strukturne linije terena (obične, padne linije, vododelnice, vodoslivnice, prevojne linije);
- prelomne linije terena (obične, linije vertikalnih zidova);
- linije koje pripadaju zatvorenim poligonima bez interpolacije;
- izohipse.

Za izohipse i linije koje pripadaju poligonima bez interpolacije takođe se vodi informacija o tome da li ove linije treba tretirati i kao prelomne linije, tj. linije preko kojih dolazi do prekida glatкости površi terena.

Trouglovi TIN-a klasifikuju se na:

- trouglove bez posebnog značenja;
- trouglove unutar oblasti u kojima ne treba iscrtavati izohipse (objekti, vodene površine);
- trouglove u kojima nije moguća interpolacija.

Implementirano je i prostorno indeksiranje trouglova korišćenjem tehnika kvadratnog stabla (engl. *quadtree*). Trenutno se tabele koje sadrže osnovne elemente DMT-a (čvorovi i trouglovi TIN-a i izvodi površi terena) na disku memorišu u datotekama sa binarnim zapisom, tj. u nestandardnom formatu zapisa. Vrlo jednostavnim modifikacijama softvera može se implementirati korišćenje standardnih formata koje koriste komercijalni RDBMS (DBF format, *MS Access MDB*), ili čak da se podaci smeštaju u okviru servera baza podataka (*Oracle* ili *MS SQL Server*). Time bi se omogućila dodatna manipulacija ovim podacima korišćenjem standardnih alata menadžera baza podataka.

Kao što je to već rečeno, ključni deo algoritma sa inkrementalnim insertovanjem tačaka je lociranje postojećeg trougla TIN-a u koji pada tačka koja se ubacuje u triangulaciju. Implementirani algoritam jednostavno pamti trougao u koji je pala poslednja tačka koja je umetnuta u triangulaciju. Polazeći od ovog trougla i koristeći topologiju i geometriju formirane mreže ide se ka trouglu u koji pada tačka koja se trenutno ubacuje u triangulaciju. Pretpostavka da nova tačka koja se ubacuje u triangulaciju pada u blizinu prethodne tačke ima puno opravdanja. Naime, ulazni podaci za *Surfling* su najčešće dobijeni iz *MapSoft*-a. Ti podaci su već prostorno sortirani po pravougaonim elementima (facetama) i po tom redosledu se i prosleđuju *Surfling*-u. Samo se pri prelasku iz jedne u drugu facetu može desiti da su sukcesivne tačke međusobno značajno udaljene. Pored toga, za podatke koji se u najvećoj meri sastoje iz izohipsi i drugih linija sukcesivne tačke su međusobno po pravilu bliske, sem u slučajevima kada se završava obrada jedne linije (izohipse) i prelazi na drugu liniju. Svakako da se problem može efikasno rešiti implementacijom algoritma koji inicijalni trougao određuje korišćenjem prostornog indeksiranja po sistemu uniformnog grida (poglavlje 3.3.1.1), ili kvadratnog stabla. Time bi bila postignuta zadovoljavajuća efikasnost i za podatke koji ne bi bili prethodno pripremljeni u *MapSoft*-u. Procena je ipak da u praktičnim primenama ovo za sada nije nešto što može imati posebnog značaja u smislu efikasnosti.

Nakon određivanja trougla u koji pada tačka koja se insertuje vrši se razbijanje tog trougla i sukcesivno lokalno prekorigovanje mreže primenom Lawson-ovog kriterijuma dok se ne postigne Delaunay-jeva triangulacija (Slika 3-18, poglavlje 3.3.1.1).

Sam algoritam je koncipiran tako da se prvo u triangulaciju ubacuju tačke segmenata obaveznih linija, a nakon toga pojedinačne tačke iz ulaznog skupa. Time se olakšava formiranje ograničene Delaunay-jeve triangulacije (CDT), jer se prekorigovanje mreže da bi se segmenti ovih linija uključili u DT vrši u ranoj fazi, odmah nakon ubacivanja krajnjih tačaka segmenta u TIN, kada je triangulacija sastavljena od relativno male količine podataka. Izuzetak je naravno slučaj kada su podaci dati u formi izohipsi, jer su tada skoro svi podaci praktično u formi linija i tada prednosti ovakvog pristupa ne dolaze do izražaja. Predviđena je i opcija formiranja konformne DT sukcesivnim deljenjem obaveznih segmenata (Slika 3-21, poglavlje 3.3.1.2).

Kompletan algoritam za formiranje TIN DMT-a uključuje veliki broj procedura kao što su:

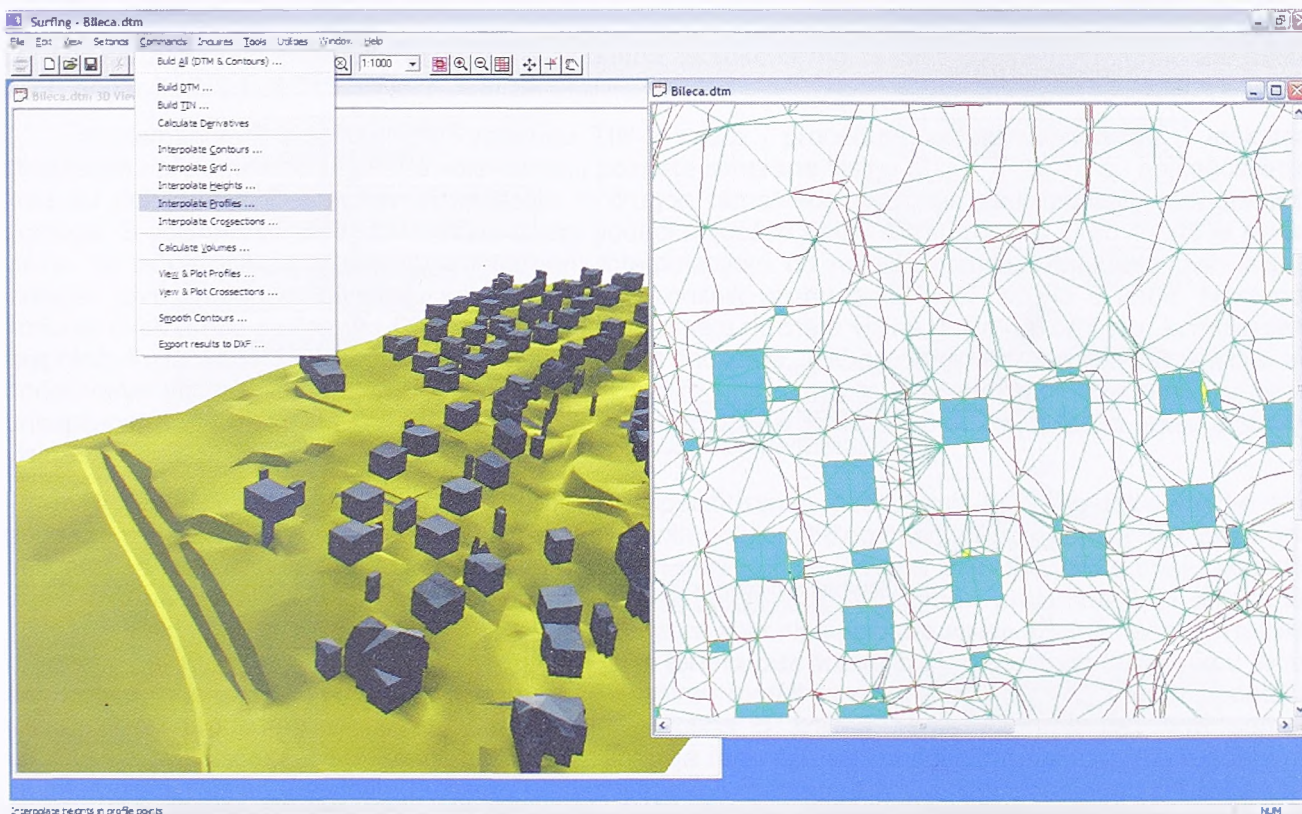
- profinjavanje TIN-a (eliminacija izduženih, tankih i velikih trouglova) dodavanjem novih tačaka u triangulaciju sa inteligentnim dodeljivanjem visina tim tačkama;
- proračun visina za tačke linija koje nemaju poznate visine;
- brisanje tačaka koje su na manjem odstojanju od obaveznih linija nego što je to dozvoljeno zadatim pragom;



- markiranje trouglova koji padaju unutar oblasti u kojima nije predviđena interpolacija visina ili iscrtavanje izohipsi;
- eliminacija horizontalnih trouglova iz mreže;
- brisanje tačaka iz triangulacije;
- brisanje trouglova na obodu mreže koji ne ispunjavaju kriterijume u pogledu kvaliteta (oblik, dužina stranica, i sl.);
- proračun izvoda površi u tačkama TIN-a;
- procedure za ekstrakciju strukturnih linija terena na osnovu izohipsi i njihovo ubacivanje u DMT;
- detekcija, korigovanje i dijagnostika grešaka u ulaznim podacima (duple tačke, tačka na liniji, presecanje obaveznih linija, i sl.);
- prostorno sortiranje i indeksiranje trouglova, i druge.

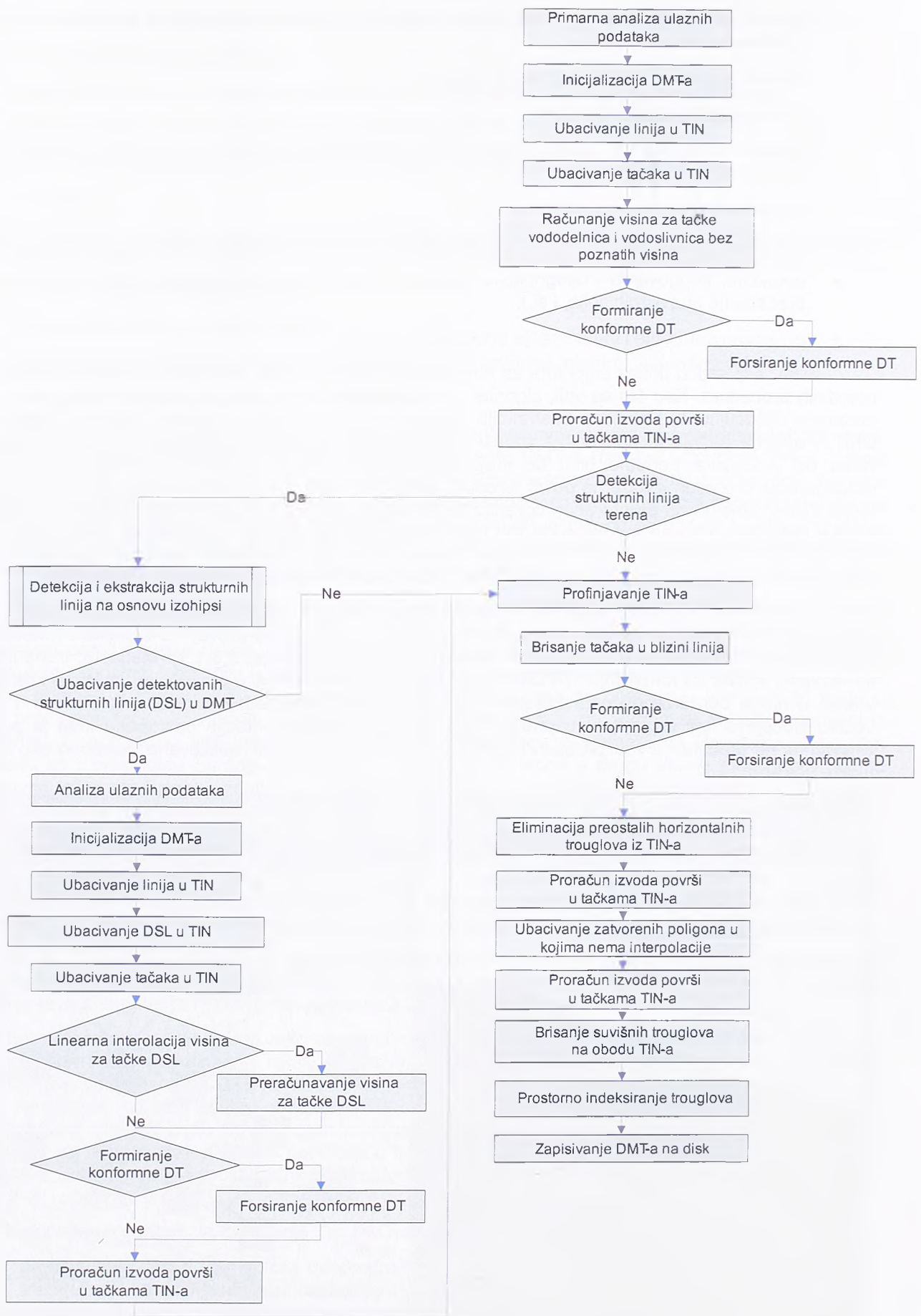
Slika 4-2 sadrži prikaz algoritma za formiranje TIN DMT-a, bez zalaženja u detalje implementacije pojedinih procedura. Kao što se vidi, algoritam je opšteg tipa i predviđen je za obradu svih vrsta ulaznih podataka uključujući tu i opcionu ekstrakciju strukturnih linija na osnovu izohipsi i njihovo ubacivanje u DMT. Posebna pažnja je posvećena robustnosti algoritma s obzirom na greške u ulaznim podacima. Neke od procedura trenutno nisu do kraja optimizovane. Tipičan primer je višestruko ponavljanje procedure za proračun izvoda na površ terena u tačkama TIN-a. Tom prilikom izvodi se računaju za sve tačke TIN-a, umesto da se proračun ograniči na delove gde je došlo do promena u topologiji i geometriji mreže. Međutim, procena autora je da to i nisu mesta koja su kritična u pogledu utroška procesorskog vremena za izvršenje algoritma. Sa druge strane, izvršavanje algoritma može se značajno ubrzati optimizacijom procedura za profinjavanje TIN-a, o čemu će biti više reči u narednim poglavljima.

U razvijene softverske alate nisu implementirani postupci koji rešavaju numeričke probleme kod formiranja TIN-a (položaj tačke u odnosu na kružnicu i u odnosu na pravu) na egzaktan i matematički ispravan način, kao onaj koji je predložio i razvio Shewchuk (poglavlje, 3.3.1.1). Međutim, treba istaći da se razvijeni softver za formiranje TIN DMT-a već duži niz godina koristi u praktičnim uslovima i da je za to vreme u njega ugrađivano dosta zaštitnih mehanizama koji obezbeđuju uspešno formiranje TIN-a za većinu slučajeva koji se javljaju u praksi. Naravno, sama implementacija postupaka koje je predložio Shewchuk ne predstavlja veći problem i najverovatnije će vrlo brzo biti realizovana, posebno ako se za to ukaže potreba.



Slika 4-1 : Korisnički interfejs Surfing-a

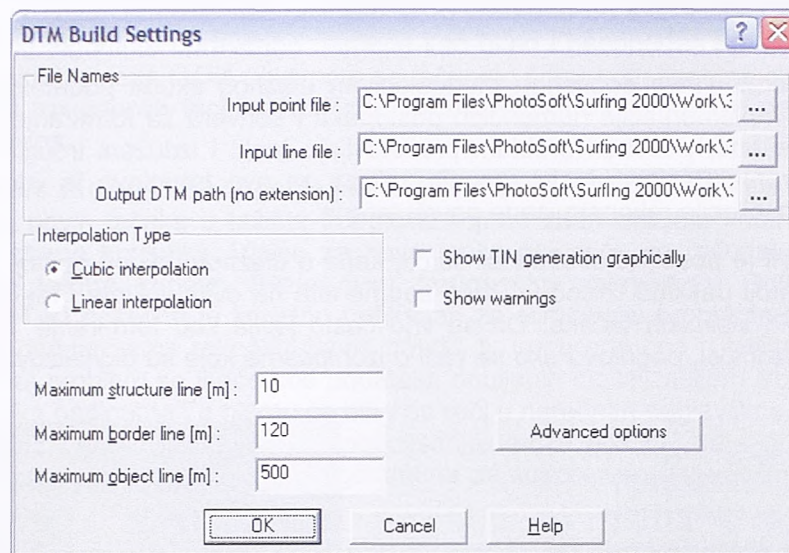




Slika 4-2: Algoritam za formiranje TIN DMT-a implementiran u okviru softvera Surfing

### 4.3.1 Respektovanje obaveznih linija

Korisniku je ostavljena mogućnost izbora da li želi formiranje ograničene DT (CDT) ili konformne DT. U svakom slučaju, segmenti linija iz ulaznog skupa podataka su obavezno stranice DT. Na raspolaganju je i opcija da se dužine linijskih segmenata koji se ubacuju u triangulaciju ograniče specificiranjem zadatog praga. Ovaj prag se posebno zadaje za strukturne i prelomne linije terena (Slika 4-3, parametar *Maximum structure line*), a posebno za linije zatvorenih poligona unutar kojih ne treba vršiti interpolaciju visina i iscrtavanje izohipsi (Slika 4-3, parametar *Maximum object line*). Skraćivanje segmenata vrši se jednostavnim umetanjem novih tačaka na segmentima i linearnom interpolacijom visina za nove tačke na osnovu visina krajnjih tačaka linijskog segmenta.



Slika 4-3 : Dijalog sa podešavanjima za formiranje TIN DMT-a

Za obe opcije, i ograničenu i konformnu DT, nakon ubacivanja krajnjih tačaka linijskog segmenta vrši se provera da li je segment predstavljen stranicom triangulacije. Ako nije, vrši se prekorigovanje triangulacije. Za slučaj ograničene DT to se radi tako što se sukcesivno sve stranice trouglova DT koje seku posmatrani linijski segment eliminišu iz triangulacije zamenom dijagonala. Kod formiranja konformne DT ovo se izvodi primenom već pomenutog algoritma za sukcesivno deljenje obaveznih segmenata (Slika 3-21, poglavlje 3.3.1.2).

Implementirani algoritam za formiranje TIN-a sadrži i procedure za proračun visina u tačkama strukturnih i prelomnih linija terena koje nemaju poznate izmerene visine (Slika 4-2). To su najčešće linije koje su dobijene digitalizacijom hidrografije ili drugog tematskog sadržaja sa postojećih topografskih podloga. S obzirom da su u tom slučaju ulazni podaci najčešće dati u formi izohipsi, predviđeno je da se visine za tačke ovih linija određuju linearnom interpolacijom od najbližih presečnih tačaka ovih linija i izohipsi. Ove procedure obavljaju se automatski i korisnik ne mora da vodi računa o tome. Naravno, korisnik uvek može da formira DMT bez linija koje nemaju poznate visine, a da nakon toga, korišćenjem raspoloživih funkcija za interpolaciju visina u datim tačkama, izabere pogodan metod interpolacije za dodeljivanje visina tačkama ovih linija. Linije sa ovako preračunatim visinama mogu se vratiti u bazu prikupljenih podataka i tretirati za naknadna formiranja DMT-a kao linije kod kojih tačke imaju poznate visine.

Problem odsecanja i eliminacije izohipsi u specificiranim područjima je rešen tako što se ova područja zadaju u ulaznim podacima u formi zatvorenih poligona. Segmenti linija koje čine ove zatvorene poligone se takođe ubacuju u DT u formi obaveznih segmenata. Za one linije čije tačke imaju poznate visine ovo se izvodi na način identičan onom koji se koristi i za strukturne i prelomne linije terena sa poznatim visinama. Izuzetak je procesiranje onih linija za koje nisu poznate visine krajnjih tačaka. Razlika u odnosu na ubacivanje strukturnih i prelomnih linija terena bez poznatih visina krajnjih tačaka je u tome što se ove linije ubacuju u DT tek nakon što je formiran model terena na osnovu svih ostalih podataka (Slika 4-2, procedura *Ubacivanje zatvorenih poligona u kojima nema interpolacije*). Pre samog ubacivanja ovih tačaka u DT, visine za tačke ovih linija računaju se korišćenjem standardnih algoritama za interpolaciju visina u zadatim tačkama na osnovu već formiranog DMT-a. Ubacivanjem u DT linija koje čine zatvorene poligone i označavanjem svih trouglova DT koji padaju unutar ovih zatvorenih poligona, problem eliminacije izohipsi unutar ovih poligona se rešava krajnje jednostavno. Naime, same izohipse se

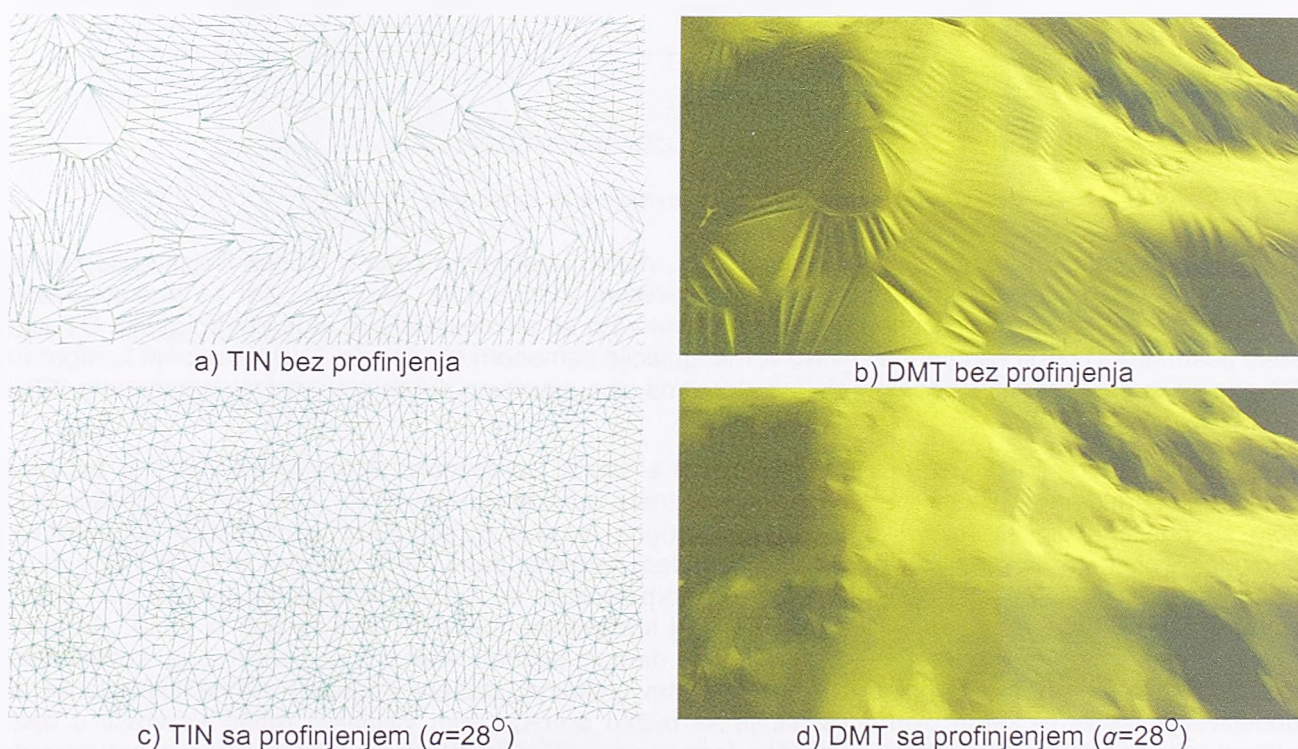


konstruišu jednostavnim algoritmom koji sukcesivno obrađuje jedan po jedan trougao DT, pri čemu je redosled obrade tih trouglova manje-više proizvoljan. Pri tome se preskaču oni trouglovi koji su označeni da pripadaju zatvorenim poligonima unutar kojih ne treba iscrtavati izohipse. Svaki trougao se obrađuje tako što se seče horizontalnim ravnima koje se postavljaju na visine koje zavise od izbrane ekvidistancije i visina samih temena trougla. Dobijene presečne linije predstavljaju segmente izohipsi koji se smeštaju na disk i indeksiraju (ulančavaju) prema visinama. Nakon toga se po potrebi ovi segmenti učitavaju u memoriju računara i povezuju u polilinije.

### 4.3.2 Profinjavanje TIN-a

Problem profinjavanja TIN-a dobijenog triangulacijom ulaznog skupa podataka posebno je razmatran prilikom razvoja i implementacije numeričkih postupaka i softvera za formiranje DMT-a. Kao što je to u više navrata naglašeno, poseban problem predstavljaju tanki i izduženi trouglovi. Proračun normala u temenima i formiranje Bézier-ovih trougaonih zakrpa za ove trouglove je vrlo nepouzdan i često se javljaju neželjene oscilacije rekonstruisane površi terena.

Ovaj problem je posebno izražen za slučaj kada u ulaznom skupu postoji veći broj linija terena, a posebno kada postoji nesklad između dužine segmenata na ovim linijama i rastojanja između ovih linija, ali i gustine rasutih visinskih tačaka. On se vrlo često javlja kod formiranja TIN-a na osnovu ulaznih podataka u formi izohipsi, pogotovu ako se radi o izohipsama koje su digitalizovane sa velikom gustinom tačaka (Slika 4-4).



Slika 4-4 : Upoređenje TIN-a (DMT-a) bez profinjenja i sa profinjenjem (eliminacija izduženih i tankih trouglova)

U drugu grupu trouglova koje bi trebalo popraviti (eliminirati) spadaju trouglovi kod kojih odstupanje rekonstruisane površi terena (glatka površ data trougaonim Bézier-ovim zakrpama) od prostornih trouglova (trougaonih faceta) prelazi unapred specificirani prag (Slika 4-26).

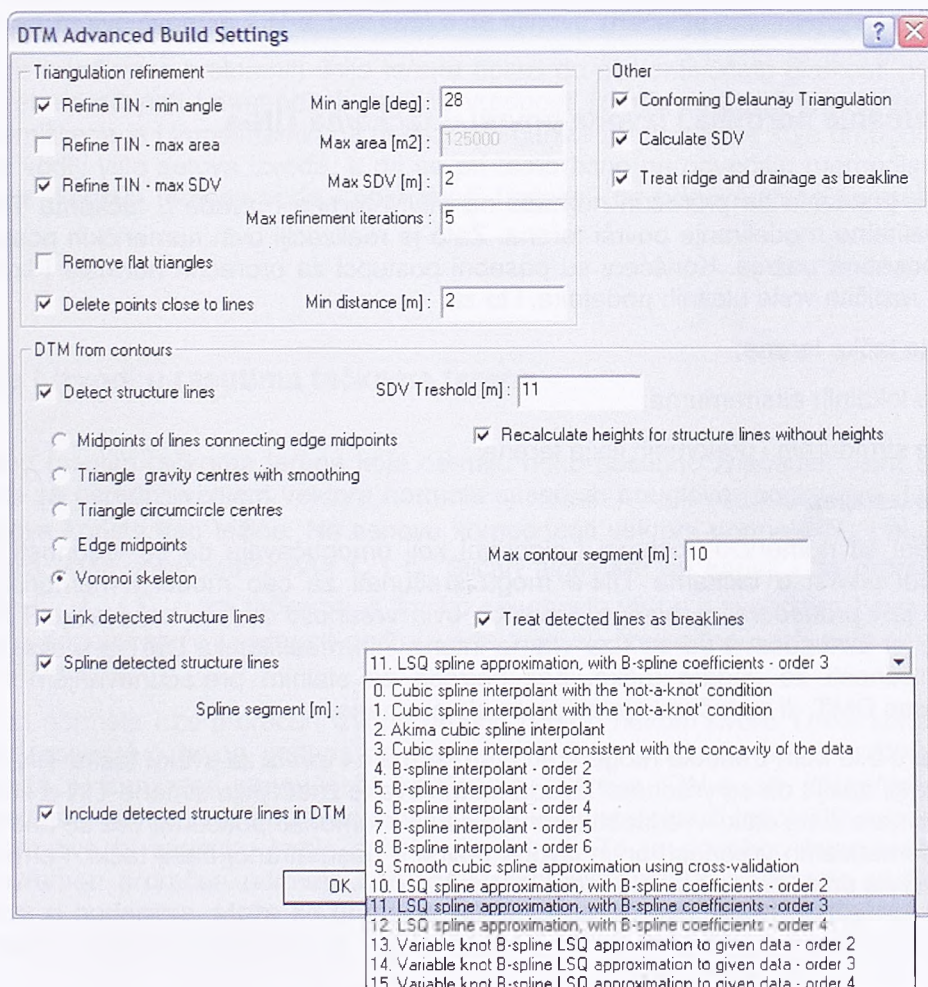
Treću kategoriju problema čine trouglovi koji po svojoj veličini (površina trougla) prelaze unapred specificirani prag. Oni generalno ne predstavljaju veći problem kada je reč o kvalitetu modeliranja površi terena, ali se i kod njih mogu javiti manje ondulacije površi terena. Ove ondulacije vizuelno nisu tako izražene kao kod tankih i izduženih trouglova, ali mogu biti značajne u smislu visinske tačnosti, tj. Javljaju se odstupanja rekonstruisane površi od prostornih trouglova, slično kao i kod druge grupe trouglova.

Za rešavanje problema eliminacije trouglova iz prve grupe implementiran je algoritam koji se zasniva na Ruppert-ovom algoritmu (poglavlje 3.3.1.3). Implementirani algoritam ne forsira striktno



zadovoljenje specificiranog kriterijuma u smislu kvaliteta trouglova (minimalna vrednost ugla u trouglu), jer bi se sa insistiranjem na striktnom inspanjenju ovog zahteva moglo lako desiti da u nekim delovima triangulacije treba formirati veoma veliki broj trouglova. U nekim slučajevima se može čak desiti da algoritam za triangulaciju nije u stanju da završi korektno rad. Neka od mogućih rešenja ovog problema, koji se po pravilu javljaju kod veoma malih uglova u ulaznim podacima u formi PSLG dao je Shewchuk (poglavlje 3.3.1.3, *Shewchuk 1997, Shewchuk 2001*). Ova rešenja su složena za implementaciju, a stav autora je da je u tim slučajevima opravdanije korigovati ulazne podatke nego formirati veći broj trouglova TIN-a. Pored toga, predviđeno je da se kroz ograničeni broj prolazaka (definisan od strane korisnika) kroz triangulaciju sukcesivno eliminišu trouglovi čiji kvalitet nije zadovoljavajući. Time se bar donekle garantuje uspešan kraj triangulacije. Implementirani algoritam nije optimizovan u smislu izbora "najgorih" trouglova koje treba prvo eliminisati iz triangulacije. Ovo se pokazalo kao značajan nedostatak, jer procedura eliminacije ovih trouglova često zahteva više procesorskog vremena od svih ostalih procedura zajedno. Zato se optimizacija ovog algoritma opravdano nameće kao bitan i neophodan korak u daljem razvoju i poboljšanju softvera. Visine za nove tačke uglavnom se računaju primenom linearne interpolacije iz TIN-a (predstava površi terena trougaonim facetama). Time se smanjuje rizik od pojave neželjenih ondulacija rekonstruisane površi terena.

Eliminacija trouglova iz druge i treće grupe jednostavno se izvodi višestrukim prolaskom kroz listu trouglova i ubacivanjem novih tačaka u težišta trouglova koji ne zadovoljavaju kriterijum kvaliteta. Broj prolazaka zadat je od strane korisnika. Visine za nove tačke najčešće se računaju primenom kubne interpolacije (predstava terena kubnim Bézier-ovim trougaonim zakrpama). Opisani algoritam za profinjavanje TIN-a (DMT-a) posebno je koristan i efikasan za eliminaciju problema koji se javljaju kod trouglova sa značajnim ondulacijama rekonstruisane površi, tj. tamo gde ona u velikoj meri odstupa od prostornih trouglova. Ovaj problem se inače kod podataka dobijenih digitalizacijom izohipsi često javlja u dolinama ovičenim strmim padinama i o njemu će biti više reči u narednim poglavljima. Dodatna prednost je što se primenom ovog algoritma, uz izvesna poboljšanja, može postići verna aproksimacija površi terena i sa trougaonim facetama, baš kao i sa algoritmima za sukcesivno deljenje i profinjavanje TIN-a (3.3.2.4).



Slika 4-5 : Napredna podešavanja za formiranje DMT-a



Opisani postupci profinjavanja TIN-a značajno doprinose kvalitetu modelirane površi terena. Rezultat uklanjanja neželjenih oscilacija površi terena jasno se može videti i prostom vizuelnom inspekcijom 3D modela površi (Slika 4-26).

Korisniku softvera je ostavljena mogućnost izbora većine neophodnih parametara za postizanje željene triangulacije (Slika 4-5, podešavanja u grupi *Triangulation refinement*).

#### 4.4 Modeliranje površi terena korišćenjem TIN-a

Modeliranje površi terena na osnovu TIN-a je realizovano korišćenjem standardnih postupaka opisanih u poglavlju 3.3.2. Za obezbeđivanje glatkosti površi terena implementirani su postupci zasnovani na Bézier-ovim trougaonim zakrpama opisani u poglavlju 3.3.2.3. Korisniku softvera je ostavljena mogućnost izbora jedne od sledećih metoda za modeliranje površi terena korišćenjem TIN-a:

- linearna interpolacija (predstavljanje terena prostornim trouglovima, tj. trougaonim facetama);
- kubna interpolacija (predstava terena kubnim Bézier-ovim trougaonim zakrpama);
- interpolacija polinomom petog stepena (predstava terena Bézier-ovim trougaonim zakrpama petog stepena).

Korisnik može izabrati bilo koju od ovih metoda interpolacije za izvođenje neke od implementiranih analiza DMT-a (interpolacija visina, konstrukcija izohipsi, računanje zapremina, 3D vizuelizacija,...).

Kao što je to opšte poznato, linearna interpolacija obezbeđuje veoma visoke performanse u radu, dok se korišćenjem kubne interpolacije i interpolacije sa polinomima petog stepena obezbeđuje glatkost površi terena svuda sem na mestima gde se javljaju prelomne linije terena.

##### 4.4.1 Računanje normala i izvoda površi u tačkama TIN-a

Istraživanje je pokazalo da proračun normala na površ terena i izvoda u tačkama TIN-a ima vrlo veliki značaj za kvalitetno modeliranje površi terena. Zato je realizaciji ovih numeričkih postupaka i algoritama posvećena posebna pažnja. Korišćeni su posebni postupci za proračun normala i izvoda za tačke koje predstavljaju različite vrste ulaznih podataka, i to za:

- rasute tačke terena;
- tačke lokalnih ekstremuma;
- tačke strukturnih i prelomnih linija terena;
- tačke izohipsi.

Razvijeni su numerički postupci i algoritmi koji omogućavaju da se vrednosti normala na površ terena i izvodi površi u tačkama TIN-a mogu sračunati za ceo model i memorisati u bazi DMT-a. Obezbeđena je i procedura za on-line proračun ovih vrednosti za bilo koju tačku TIN-a. Ova opcija je interesantna, jer omogućava da se i za vreme intenzivnih modifikacija DMT-a u svakom trenutku mogu dobiti ove vrednosti za zadate tačke, bez potrebe za stalnim preračunavanjem i ažuriranjem ovih vrednosti za ceo DMT, ili za tačke koje su pretrpele promene.

Iako se u bilo kom trenutku mogu sračunati normale i izvodi za svaku tačku TIN-a, ipak se trenutno uglavnom koristi opcija da se vrednosti izvoda nakon svake značajnije izmene TIN-a sračunaju i smeste u memoriju računara ili na disk. Vrednosti normala se ne memorišu posebno, već se one dobijaju indirektno na osnovu memorisanih vrednosti prvih izvoda površi u posmatranoj datoj tački. Formule za prelazak sa normala površi na prve izvode površi u nekoj tački su:

$$\begin{aligned}
 f &= f(x, y) \\
 f_x &= \frac{\partial f}{\partial x}, \quad f_y = \frac{\partial f}{\partial y} \\
 \vec{N} &= (N_x, N_y, N_z) \\
 N_x &= -N_z \cdot f_x, \quad N_y = -N_z \cdot f_y, \quad N_z = \frac{1}{\sqrt{f_x^2 + f_y^2 + 1}} \\
 f_x &= -\frac{N_x}{N_z}, \quad f_y = -\frac{N_y}{N_z}
 \end{aligned} \tag{4-1}$$

Na osnovu poznate normale u bilo kojoj tački DMT-a može se jednostavno sračunati i vrednost nagiba terena (ugao između tangentne ravni na površ terena u posmatranoj tački i horizontalne ravni) po formuli

$$\cos \alpha = \frac{N_z}{\sqrt{N_x^2 + N_y^2 + N_z^2}} \tag{4-2}$$

Procedura proračuna vrednosti izvoda površi u svim čvorovima TIN-a podrazumeva da se prvo sračunaju vrednosti normala, tj. prvih izvoda površi za sve čvorove TIN-a sukcesivnim prolaskom kroz listu čvorova po proizvoljnom redosledu. Pri tome se koriste različiti numerički postupci za proračun normala u čvorovima TIN-a, u zavisnosti od značenja posmatrane tačke za modeliranje površi terena (rasute tačke, lokalni ekstremumi, tačke strukturnih i prelomnih linija ili tačke izohipsi). Ovi postupci su razvijeni tako da se u potpunosti iskoriste sve informacije koje su pretpostavljene karakterom tačke u kojoj se proračun vrši. Nakon toga se računaju vrednosti drugih izvoda površi u čvorovima TIN-a. Ovaj postupak je identičan za sve čvorove TIN-a, bez obzira na njihovo značenje.

S obzirom da u tačkama prelomnih linija terena dolazi do diskontinuiteta glatkosti površi, jasno je da za ove tačke treba sračunati i memorisati različite vrednosti izvoda za površ terena sa svake strane prelomne linije. Osmišljena je i implementirana posebna organizacija podataka koja omogućava da se za svaku tačku može voditi više setova izvoda, a da se pri tome bitno ne povećaju memorijski zahtevi. Za svaki trougao se uz njegova temena vode i pokazivači (indeksi) na odgovarajuće normale i izvode na površ terena.

#### 4.4.1.1 Normale i izvodi u rasutima tačkama terena

Proračun normala u rasutim tačkama terena koje nemaju neko posebno značenje, osim što je u njima poznata visina, vrši se osrednjavanjem vektora normala susednih trouglova (poglavljje 3.3.2.2). Pri tome se površine trouglova koriste kao težine. Na osnovu komponenti vektora normale  $N_x$  i  $N_y$ , mogu se po formulama (4-1) sračunati vrednosti izvoda  $f_x$  i  $f_y$ . Sličan algoritam se koristi i za proračun vrednosti izvoda drugog reda  $f_{xx}$ ,  $f_{yy}$  i  $f_{xy}$  u tim tačkama, s tim što se umesto visina u susednim čvorovima TIN-a za taj proračun koriste odgovarajuće vrednosti prvih izvoda koje su prethodno sračunate u tim čvorovima (poglavljje 3.3.2.2, *Akima 1978*).

I za proračun normala i za proračun izvoda drugog reda u nekom čvoru TIN-a koriste se čvorovi koji čine topološko susedstvo prvog prstena za posmatrani čvor (poglavljje 3.3.2.1, Slika 3-27). Nije posebno razmatrana i isprobana mogućnost korišćenja čvorova TIN-a sa drugačijom definicijom susednosti (geometrijsko susedstvo, topološko susedstvo drugog stepena ili topološko susedstvo u obliku zvezde). Ove alternative bi svakako imalo smisla razmatrati. To je posebno interesantno za razvoj procedura za istovremen proračun normala i izvoda u čvorovima TIN-a i filtriranje slučajnih grešaka merenja, tj. šumova u podacima. Može se pretpostaviti da bi se na ovaj način dobila modelirana površ terena sa nešto manje neželjenih oscilacija.



#### 4.4.1.2 Normale i izvodi u tačkama lokalnog ekstremuma površi terena

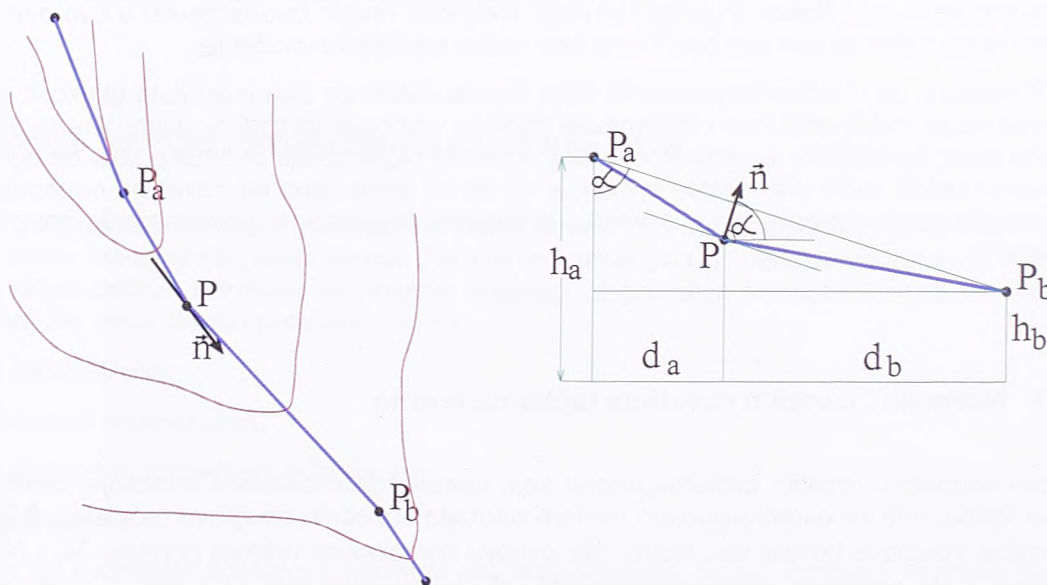
U tačkama koje predstavljaju lokalne ekstremume normala se ne određuje računski, već se polazi se od pretpostavke da je u ovim tačkama tangentna ravan na površ terena horizontalna, tj. da je normala vertikalna:

$$\vec{N} = (0, 0, 1), \quad f_x = 0, \quad f_y = 0 \quad (4-3)$$

#### 4.4.1.3 Normale i izvodi u tačkama strukturnih i prelomnih linija terena

Za proračun normala i izvoda u tačkama strukturnih linija terena implementirana su i istestirana dva algoritma. Prvi algoritam je praktično isti algoritam koji se koristi kod proračuna normala i izvoda za rasute tačke terena. S obzirom da u tačkama strukturnih linija terena površ nema prekid glatkosti, ovakav način proračuna je sasvim opravdan. Međutim, za strukturne linije terena koje predstavljaju vododelnice i vodoslivnice može se iskoristiti pretpostavka da je najveći pad terena u pravcu pružanja ovih linija. Zato je za proračun izvoda i normala u tačkama ovih strukturnih linija terena implementiran drugi algoritam. Kod ovog algoritma normala se računa tako da leži u vertikalnoj ravni određenoj strukturnom linijom, tj. tangentom na strukturnu liniju u posmatranoj tački (Slika 4-6). Proračun nagiba normale izvodi se jednostavno po formuli:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{h_b - h_a}{d_a + d_b} \quad (4-4)$$



Slika 4-6 : Proračun normala po profilu u tačkama vododelnica i vodoslivnica (levo - prikaz u horizontalnoj ravni, desno - prikaz u vertikalnoj ravni)

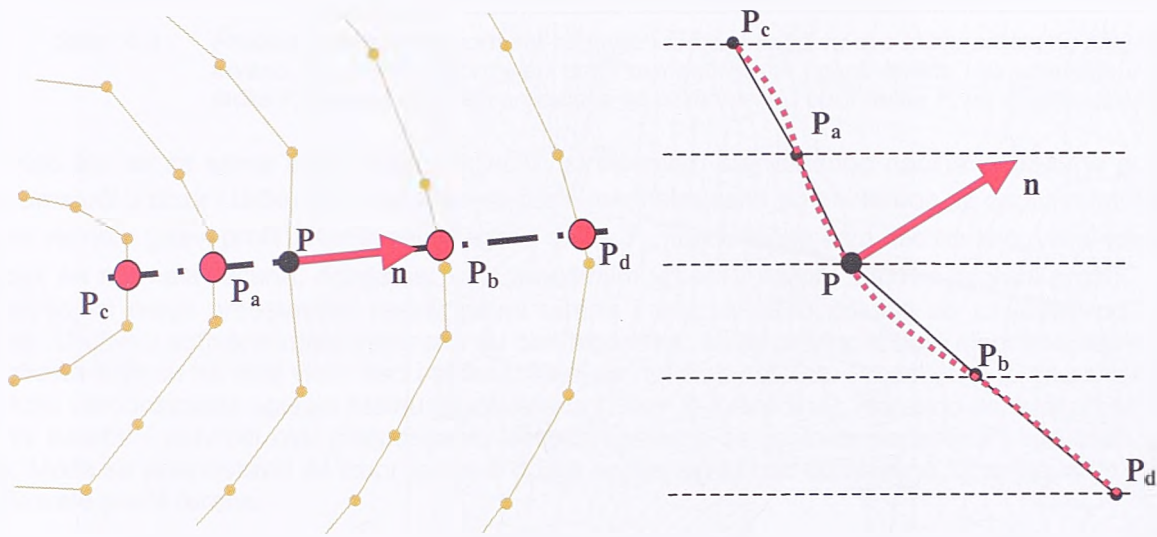
U tačkama koje pripadaju prelomnim linijama terena proračun normala i izvoda vrši se po sektorima koji su ograničeni prelomnim linijama. Za svaki sektor se računaju posebno normale i izvodi u posmatranoj tački. Normala na površ terena u posmatranoj tački za neki sektor dobija se osrednjavanjem vektora normala svih trouglova koji pripadaju tom sektoru. Ovako dobijene vrednosti normala, tj. vrednosti prvih izvoda koriste se za proračun izvoda drugog reda na standardan način, kao i za rasute tačke.

Predviđena je i posebna opcija čijim izborom se zahteva tretiranje vododelnica i vodoslivnica kao prelomnih linija terena. Tada se za sve tačke ovih linija vrši računanje više normala i izvoda, baš kao i za sve ostale prelomne linije terena.

#### 4.4.1.4 Normale i izvodi u tačkama izohipsi

Za proračun normala u tačkama izohipsi implementirana je posebna procedura. Naime, rezultati koji su dobijeni korišćenjem standardnih procedura sa osrednjavanjem vektora normala susednih trouglova (Akima algoritam) pokazali su da se na taj način ne može dobiti DMT zadovoljavajućeg kvaliteta. Zbog pojave velikog broja trouglova koji su izduženi i tanki, kao i zbog pojave velikog broja horizontalnih trouglova, dolazi do velikih oscilacija i razlika u vektorima normala za susedne tačke DMT-a. Ovo rezultira neželjenim oscilacijama rekonstruisane površi terena koje su vrlo izražene (Slika 4-8, gore levo).

Zato je ovde primenjen poseban postupak koji polazi od pretpostavke da normala na površ terena leži u vertikalnoj ravni definisanoj pravcem najvećeg pada terena i da je pravac najvećeg pada terena upravan na izohipsu. Ovaj pristup se inače vrlo često koristi kada su u pitanju izohipse (poglavlja 3.4.1.1 i 3.4.2.1). Nagib normale se određuje na osnovu profila terena definisanog presečnim tačkama linije sa pretpostavljenim najvećim padom terena i susednim izohipsama (Slika 4-7).



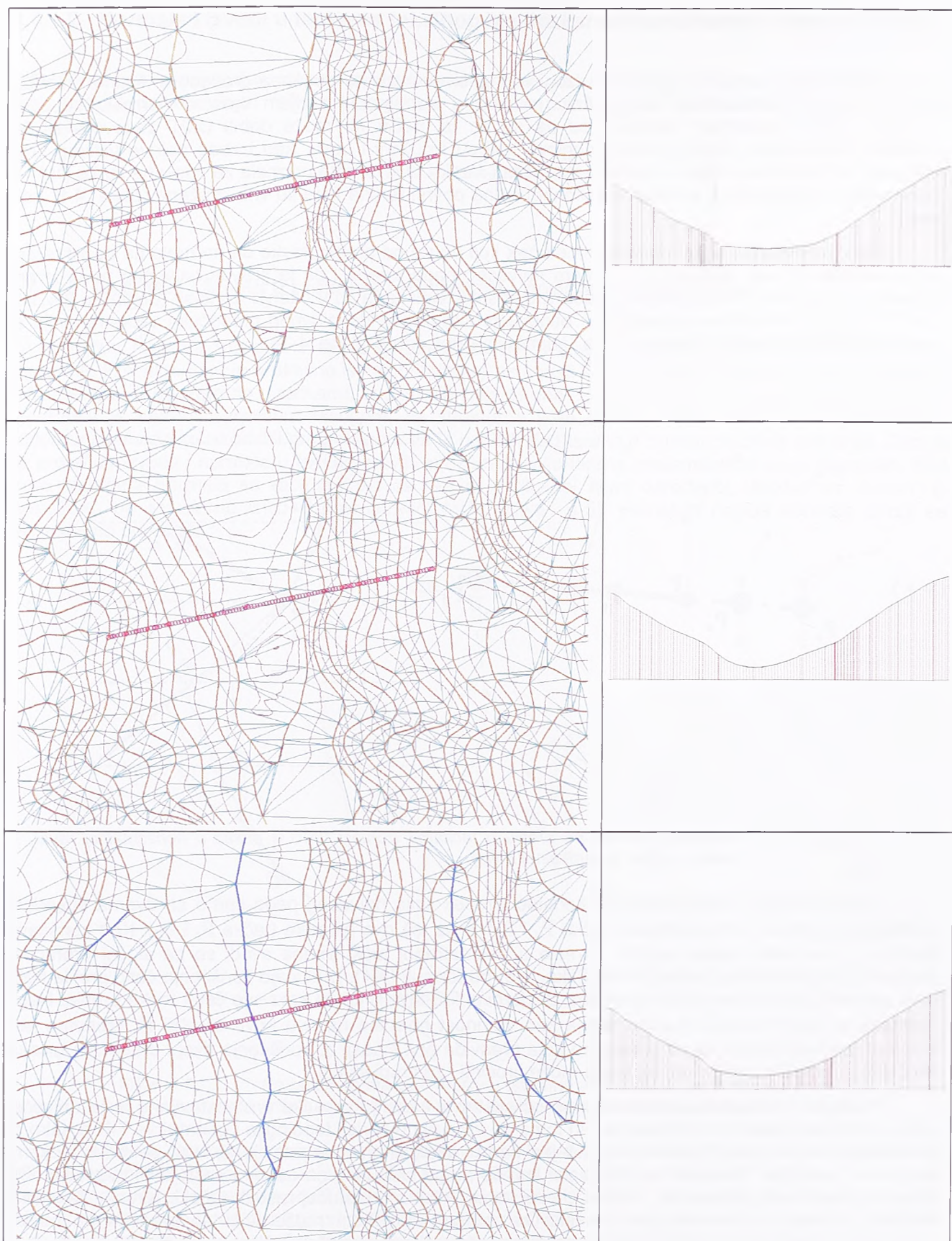
Slika 4-7 : Proračun normala po profilu u tačkama izohipsi (levo – prikaz u horizontalnoj ravni, desno – prikaz u vertikalnoj ravni)

Profil terena se može sračunati koristeći presek linije najvećeg pada samo sa dvema susednim izohipsama (gornja i donja izohipsa, tačke  $P_a$  i  $P_b$ ), ili sa još dva preseka (tačke  $P_c$  i  $P_d$ ). Kod korišćenja profila sa dve tačke ocena nagiba normale u posmatranoj tački terena svodi se na slučaj proračuna normale za vododelnice i vodoslivnice (Slika 4-6) po formuli (4-4). U slučaju korišćenja četiri profila treba prvo postaviti glatku krivu (kubni polinom, Bézierova ili B-splajn kriva) kroz sve četiri tačke profila. Nagib normale na površ terena se onda dobija kao vrednost normale na ovu krivu u tački  $P$ . Trenutno je u softveru implementirana samo procedura koja predviđa prvi slučaj, tj. korišćenje dveju presečnih tačaka. Međutim, procedura se vrlo jednostavno može proširiti i za drugi slučaj.

Postupak proračuna u najvećoj meri se sastoji u traženju preseka pretpostavljene linije najvećeg pada terena sa susednim izohipsama. Pri tome se intenzivno koristi topologija i geometrija TIN-a, tako da je postupak veoma brz. Podržani su i slučajevi kada traženi preseki ne postoje, tj. kada se radi o tačkama na granici područja. Tada se koriste nagibi koji se mogu sračunati na osnovu postojećih tačaka profila. Ukoliko uopšte nema presečnih tačaka, proračun se vrši kao za slučaj rasutih tačaka terena. Takođe je vođeno računa i o tome da pre preseka sa nekom izohipsom može doći do preseka sa nekom strukturnom ili prelomnom linijom terena, pa se onda koristi ova presečna tačka.

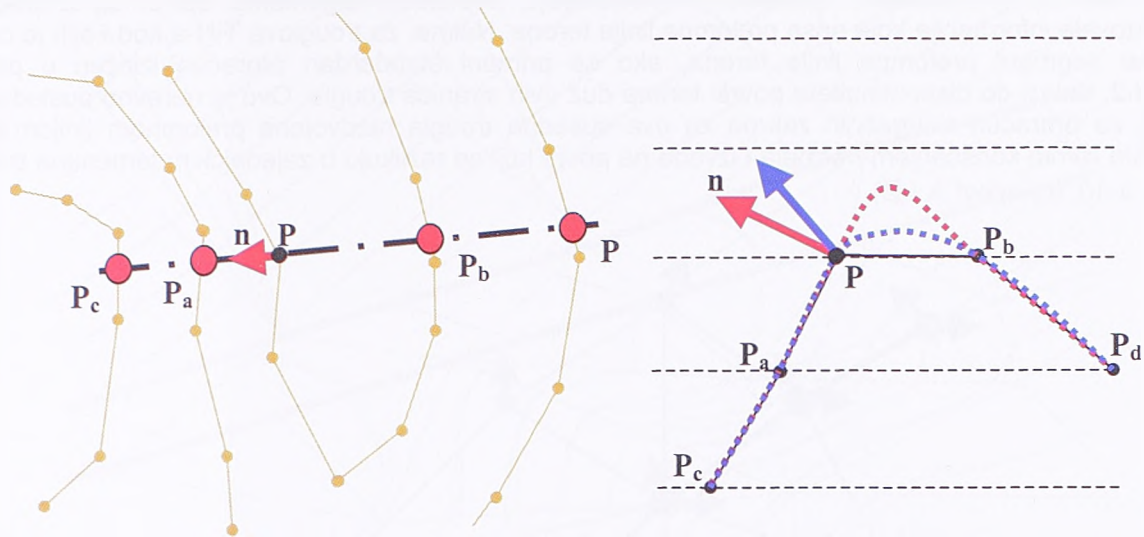
Ovde je posebno bilo interesantno rešenje za slučaj kada je jedan deo profila horizontalan, tj. kada tačka  $P$  i jedna od tačaka  $P_a$  ili  $P_b$  imaju iste visine (Slika 4-9).





Slika 4-8 : Uticaj algoritma za proračun normala na model površi terena; Akima algoritam – gore; u pravcu najvećeg pada terena – sredina; u pravcu najvećeg pada terena sa detekcijom strukturalnih linija - dole; levo su prikazane interpolovane izohipse, a na desnoj strani odgovarajući vertikalni preseki površi terena





Slika 4-9 : Problem određivanja normale za tačku izohipse kada su dve tačke profila na istoj visini; crveno je označena normala i profil rekonstruisane površi terena bez uzimanja u obzir tačke  $P_b$ ; plavo je rezultat proračuna sa uzimanjem u obzir tačke  $P_b$  na standardan način

Kao što se sa same slike može zaključiti, korišćenjem standardnog načina proračuna po formuli (4-4) uzimajući u obzir i tačku  $P_a$  i  $P_b$  dobija se profil rekonstruisane površi terena sa zaobljenim vrhom sa manjom visinom (plavi profil). Korišćenjem samo tačke  $P_a$ , dakle tačke koja nije na istoj visini kao i tačka  $P$  u kojoj se normala računa, dobija se profil sa oštrijim vrhom i većom visinom (crveni profil). I jedan i drugi slučaj bi mogli predstavljati realnu površ terena i vrlo je teško odlučiti se za jednu od ove dve varijante. U okviru softvera implementirana su oba algoritma, ali se prednost daje algoritmu koji ne koristi tačke profila koje su na istoj visini kao i tačka u kojoj se normala računa. Procenjeno je da se tako dobija površ koja verodostojnije opisuje realnu površ terena (Slika 4-8, sredina). Naravno da ovaj problem treba dodatno istražiti i potvrditi ovu pretpostavku eksperimentalno sa realnim podacima i različitim vrstama terena. Može se pretpostaviti da izbor jedne ili druge opcije zavisi i od tipa terena, tj. sastava tla i sila koje su oblikovale površ terena.

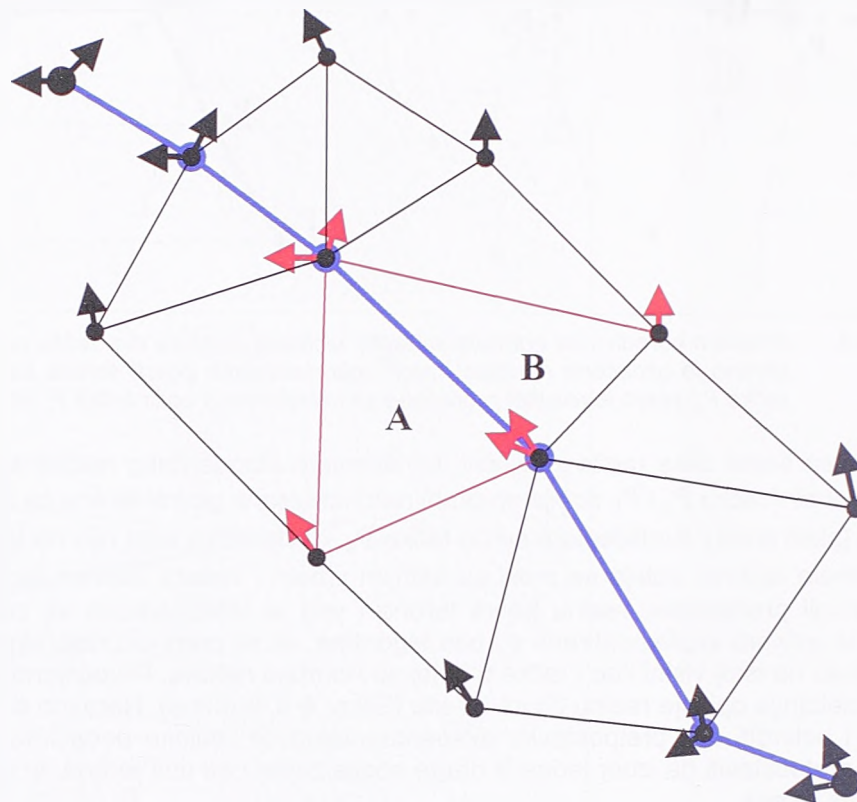
Osnovni nedostatak pristupa sa izostavljanjem iz proračuna tačke koja je na istoj visini kao i tačka u kojoj se normala računa je pojava velikog udubljenja rekonstruisane površi terena u zaravnjenim dolinama, gde je rastojanje između tačaka  $P$  i  $P_b$  veliko, a nagibi profila  $P_a-P$  i  $P_d-P_b$  takođe veliki. Na tim mestima strme padine brda obično naglo prelaze u ravnicu. Za prikazani primer koji je dobijen na osnovu realnih podataka (Slika 4-8), lako se može desiti da rezultat dobijen primenom standardnog Akima algoritma (Slika 4-8, gore) više odgovara stvarnoj situaciji i izgledu površi terena, bar na mestu izabranog profila. Svakako da se na osnovu podataka koji su, kao za dati primer, dati samo u formi izohipsi, ne može pouzdano doneti sud o tome šta se dešava na mestima gde treba rekonstruisati vododelnicu i vodoslivnicu, vrh, dno i sl. Naročito je to nesigurno baš u slučaju ovakvih dolina, pa o tome treba posebno voditi računa. Međutim, stav autora je da, ako se izuzmu pomenute doline, bolji rezultati dobijaju se sa proračunom normala po pravcu najvećeg pada terena, jer je na mestima gde se javljaju vododelnice, vodoslivnice, vrhovi i dna površ terena vernije rekonstruisana, a pri tome nisu primetne veće ondulacije rekonstruisane površi (Slika 4-8, sredina i dole). Problem dolina je posebno razmatran u delu rada koji se bavi rekonstrukcijom površi terena na osnovu izohipsi.

#### 4.4.2 Proračun trougaonih površinskih zakrpa

Već prve realizacije softvera za podršku digitalnom modeliranju terena koje je autor razvio do 1995. godine (Cvijetinović 1995) imale su implementirane metode za predstavljanje površi terena korišćenjem Bézierovih trougaonih zakrpa petog i trećeg stepena. Proračun se u osnovi zasniva na formulama datim u u poglavlju 3.3.2.3.2 i nije bitnije menjan od prvobitne realizacije. Pri tome nisu implementirani postupci za obezbeđivanje  $C^1$  glatкости trougaonih zakrpa trećeg stepena, tj. postupci za rešavanje problema konzistentnosti temena triangulacije.



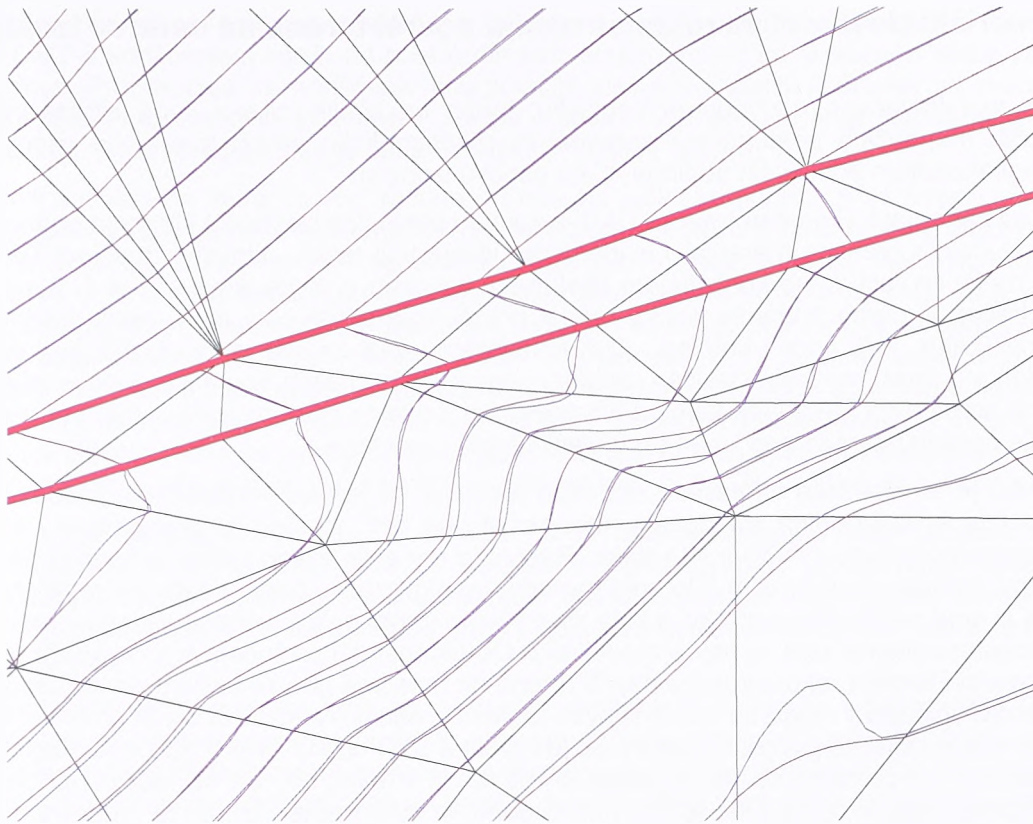
Ono što je naknadno urađeno je modifikacija postojećih algoritama da bi se u potpunosti respektovale informacije koje nose prelomne linije terena. Naime, za trouglove TIN-a kod kojih je neka od stranica segment prelomne linije terena, ako se primeni standardan proračun izložen u poglavlju 3.3.2.3.2, dolazi do diskontinuiteta površi terena duž ovih stranica trougla. Ovo je naravno posledica toga što se za proračun trougaonih zakrpa za dva susedna trougla razdvojena prelomnom linijom terena, proračun izvodi korišćenjem normala i izvoda na površ koji se razlikuju u zajedničkim temenima trouglova (Slika 4-10, trouglovi A i B).



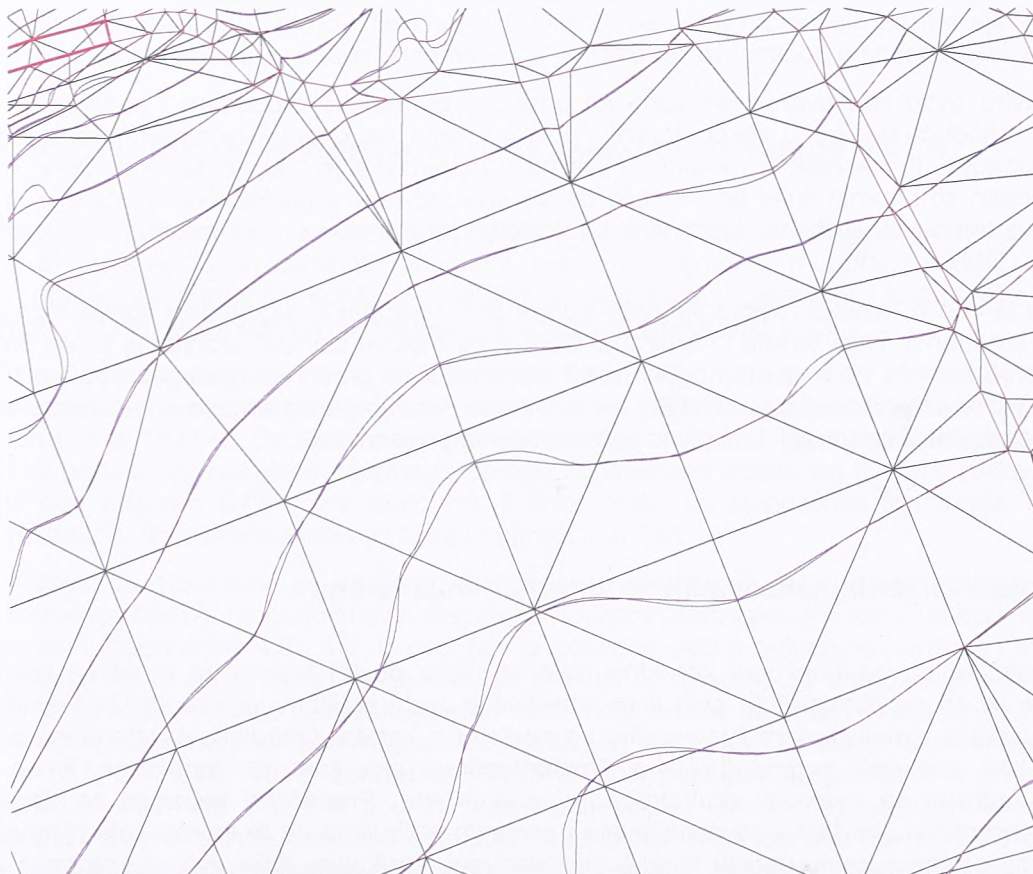
Slika 4-10 : Proračun trougaonih zakrpa za trouglove razdvojene prelomnom linijom terena

Rešenje koje je primenjeno da bi se ovaj problem prevazišao sastoji se u modifikaciji proračuna vrednosti Bézierovih ordinata u tačkama Bézierove kontrolne mreže koje leže duž zajedničke stranice, tj. stranica koja je istovremeno i segment prelomne linije. Suština je u tome da se obezbedi dobijanje identičnih vrednosti (identične trodimenzionalne koordinate) za odgovarajuće kontrolne tačke levog i desnog trougla. Ovaj proračun se može izvesti na više načina. Trenutno je u okviru softvera implementirano jednostavno rešenje kod koga se ne koriste vrednosti normala u zajedničkim temenima trouglova, već se, umesto toga, vrednosti ordinata dobijaju iz uslova da kontrolne tačke pripadaju prelomnoj liniji terena. Koristi se jednostavna linearna interpolacija visina od krajnjih tačaka zajedničke stranice trouglova. Brojne primene softvera nad realnim podacima pokazale su da je ovakav način rešenja navedenog problema u najvećem broju slučajeva sasvim zadovoljavajući (Slika 4-11).

U okviru ovog istraživanja nisu implementirani postupci za rešavanje problema konzistentnosti temena triangulacije, tj. postupci za obezbeđivanje  $C^1$  glatkosti trougaonih zakrpa trećeg stepena. Ovi postupci su detaljno opisani u poglavlju 3.3.2.3.2. Ukoliko se proceni da je to svrsishodno, postupci koji se zasnivaju na razbijanju jedne trougaone zakrpe na više trougaonih zakrpa, mogu se relativno jednostavno implementirati. Ovo je svakako jedan od očekivanih koraka u daljem razvoju softvera. U ovom trenutku, stav autora je da taj problem nije od nekog posebnog značaja i da njegovo rešenje neće bitno popraviti kvalitet modela površi terena. Pored toga, korisnik kome je vrlo važno da ostvari  $C^1$  kontinualnost površi, može i dalje koristiti trougaone zakrpe petog stepena koje taj uslov i u okviru osnovne implementacije u potpunosti ispunjavaju. Nedostatak modeliranja ovim zakrpa su neželjene oscilacije koje se pri tome mogu javiti (Slika 4-12, gornji levi ugao područja).



Slika 4-11: Rezultat modeliranja površi korišćenjem implementiranih postupaka za proračun Bézier-ovih trougaonih zakrpa sa respektovanjem prelomnih linija terena (kubna površ – crveno, petog stepena – plavo)



Slika 4-12: Rezultat modeliranja površi korišćenjem implementiranih postupaka za proračun Bézier-ovih trougaonih zakrpa (kubna površ – crveno, petog stepena – plavo)



## 4.5 Numerički postupci za rekonstrukciju površi terena na osnovu izohipsi

Kao što je to i navedeno u uvodnom poglavlju, jedan od bitnijih ciljeva ovog istraživanja je razvoj odgovarajućih numeričkih postupaka i softvera za rekonstrukciju površi terena na osnovu podataka dobijenih digitalizacijom postojećih podloga, tj. na osnovu izohipsi.

Ako se zanemare sitne deformacije DMT-a koje su posledica izostanka filtriranja podataka u smislu eliminacije slučajnih grešaka merenja, i evidentnog uticaja koji tačke, odnosno trouglovi TIN-a imaju na sam DMT, može se reći da se korišćenjem postupaka opisanih u poglavljima 4.3 i 4.4, tj. sa trougaonim zakrpama trećeg ili petog stepena, dobija model površi koja u najvećoj meri verno predstavlja realnu površ terena (Slika 4-8, gore i sredina). Ova konstatacija važi za sve vrste ulaznih podataka, pa i za ulazne podatke u formi izohipsi. Klasičan problem pojave horizontalnih trouglova ovde je izbegnut, jer se površ terena predstavlja zakrpama koje na tim mestima značajno odstupaju od samih trougaonih faceta i dosta vernije opisuju površ terena i njene ondulacije na tim mestima.

Kao što je to više puta naglašeno, na ovim mestima se javljaju vododelnice, vodoslivnice, vrhovi, dna i sedla, pa s obzirom da ovi podaci nisu eksplicitno dati, logično je pretpostaviti da je na ovim delovima terena pouzdanost DMT-a vrlo niska. Radi se o tome da je vrlo teško na osnovu podataka datih samo u formi izohipsi, korišćenjem bilo koje metode, sa sigurnošću tvrditi da se površ terena tu ponaša baš na ovaj ili onaj način. Rekonstrukcija koja se pri tome izvodi polazi od pretpostavki o karakteru površi terena, a posebno silama koje tu površ modeliraju. Od tačnosti tih pretpostavki i od kvaliteta numeričkih postupaka zavisi i kvalitet rekonstrukcije površi terena na mestima gde se javljaju horizontalni trouglovi. U najvećem broju slučajeva mogu se dobiti sasvim zadovoljavajući rezultati. Ozbiljan problem i dalje ostaju potencijalno velike oscilacije površi, tj. deformacije i greške DMT-a kod širokih dolina sa naglim prelaskom u strme padine. Taj problem se mora posebno razmotriti i rešiti, bilo da se radi o razvoju specijalnih numeričkih procedura, ili da se eksplicitno, unesu dodatne informacije i uslovi za modeliranje, kao što je zadavanje prelomnih linija terena koje razdvajaju ravnicu od brda ili obezbeđivanje veće količine tačaka sa poznatim visinama po području doline.

Konačno, treba konstatovati da je jedino pouzdano rešenje za rekonstrukciju površi terena na mestima gde se javljaju horizontalni trouglovi (i gde površ terena najverovatnije nije horizontalna) jeste da se podaci digitalizacije postojećih podloga dopune podacima koji bi se dobili naknadnim merenjem strukturnih linija terena digitalnom fotogrametrijskom stereorestitucijom ili na neki drugi način. Međutim, ovo rešenje, iako značajno podiže kvalitet DMT-a, istovremeno i značajno podiže troškove izrade DMT-a.

U okviru ovog istraživanja razvijene se posebne numeričke procedure i softver čija bi primena trebala da omogućiti kvalitetnu rekonstrukciju površi terena na osnovu izohipsi i bez posebno velikih dodatnih troškova, tj. naknadnih merenja. Polazna pretpostavka je bila da se to može efikasno izvesti respektovanjem strukturnih linija terena, bilo da su one dobijene digitalizacijom podataka sa postojećih podloga ili automatskom ekstrakcijom strukturnih linija terena na osnovu izohipsi i njihovom kasnijom ugradnjom u DMT.

Kada je reč o razvoju i implementaciji numeričkih postupaka, algoritma i softvera za automatsku ekstrakciju strukturnih linija terena i formiranje DMT-a na osnovu izohipsi, učinjen je jedan pokušaj da se razvije rešenje koje će na najbolji mogući način iskombinovati prednosti postupaka opisanih u poglavlju 3.4.2.1. Pri tome se pošlo od pretpostavke da optimalno rešenje podrazumeva prvenstveno visok kvalitet rekonstruisane površi terena, ali i relativno jednostavnu implementaciju.

### 4.5.1 Uključivanje digitalizovanih strukturnih linija terena

Jedan od načina da se obezbedi korektna rekonstrukcija površi terena na mestima gde se javljaju vodoslivnice je da se planimetrija ovih linija eksplicitno zada prilikom formiranja DMT-a. Ove linije se često mogu dobiti digitalizacijom hidrografije sa postojećih karata. Ove linije se standardno uključuju u TIN DMT kao obavezni segmenti TIN-a. Implementirani algoritam sa formiranje TIN-a dozvoljava presecanje izohipsi sa ovakvim strukturnim linijama terena. Presečnim tačkama se dodeljuju visine izohipsi. Istovremeno ove tačke se označavaju posebnim atributima da bi se olakšalo njihovo korišćenje za kasnije određivanje visina ostalih tačaka digitalizovane strukturne linije. Naime, obzirom da se ovde radi o 2D digitalizaciji javlja se problem visina za tačke ovih linija. Određivanje visina za ove tačke treba uraditi pre ili prilikom njihovog uključivanja u DMT.

U okviru razvijenog softvera predviđeno je da se ovaj problem reši tako što se na osnovu formiranog DMT-a korišćenjem nekih od postojećih softverskih procedura sračunaju visine za sve tačke strukturnih linija. Preporučuje se korišćenje interpolacije visina u zadatim tačkama sa predstavljanjem terena preko kubnih Bézier-ovih trougaonih zakrpa. Nakon toga se ove linije ugrađuju u sam DMT. Rezultat ovakvog načina procesiranja je dat u dodatku B.1 (Slika B-2).

Korisnik softvera ne mora da vodi računa o tome što tačke strukturnih linija terena nemaju visine. Postupak proračuna visina u ovim tačkama aktivira se automatski, čim softver naiđe u ulaznim podacima na obavezne linije sa atributima koji označavaju linije bez poznatih visina. Korisnik može opciono zahtevati da se u sledećem koraku preračunaju visine onih tačaka strukturnih linija koje leže između dveju izohipsi sa različitim visinama. Za ove tačke visine se određuju prostom, linearnom interpolacijom od presečnih tačaka strukturne linije i izohipsi (Slika B-3, dodatak B.1). Za neke tačke ovih linija to nije moguće uraditi, pa o tome treba posebno voditi računa. Najčešće je to slučaj sa linijama na granici DMT-a, kod prekinutih izohipsi, kao i između izohipsi sa istim visinama. Predviđena je i mogućnost da se strukturne linije digitalizovane sa postojećih podloga koriste zajedno sa opcijom detektovanja i ekstrakcije ostalih strukturnih linija terena koje nisu eksplicitno date na karti (Slika B-4 i Slika B-5, dodatak B.1).

Iz primera iz dodatka B.1 (Slika B-1 do Slika B-6) može se zaključiti koliki su efekti uključivanja strukturnih linija terena u TIN DMT, bilo da se radi o digitalizovanim ili automatski detektovanim i ekstraktovanim strukturnim linijama. Preračunavanjem visina tačaka primenom linearne interpolacije od preseka sa izohipsama delimično se eliminišu greške koje su posledica neslaganja visina za bliske tačke izohipsi i hidrografije.

Problem eliminacije grešaka koje su posledica grešaka digitalizacije i hidrografije i izohipsi, tj. njihovog međusobnog neslaganja, nije posebno rešavan u okviru razvijenog softvera. Ovde se pre svega misli na probleme kada digitalizovana vododerina (zadata svojom planimetrijom) ne ide najnižim delom DMT-a formiranog na osnovu izohipsi, već po levoj ili desnoj padini. Procenjeno je da je korektnije da se ovi problemi reše tokom same digitalizacije sadržaja ili naknadno, ali svakako pre samog formiranja DMT-a. Pri tome treba koristiti postupke za "navlačenje" jednog vektorskog sadržaja na drugi koristeći zajednički detalj. Preostala neslaganja bi se mogla otkloniti tokom samog formiranja DMT-a, pomeranjem tačaka strukturnih linija po pravcu upravanom na pravac pružanja strukturne linije, sve dok se ne dobije pozicija u kojoj model površi terena ima lokalni ekstremum, ili pozicija u kojoj je zakrivljenost površi najveća.

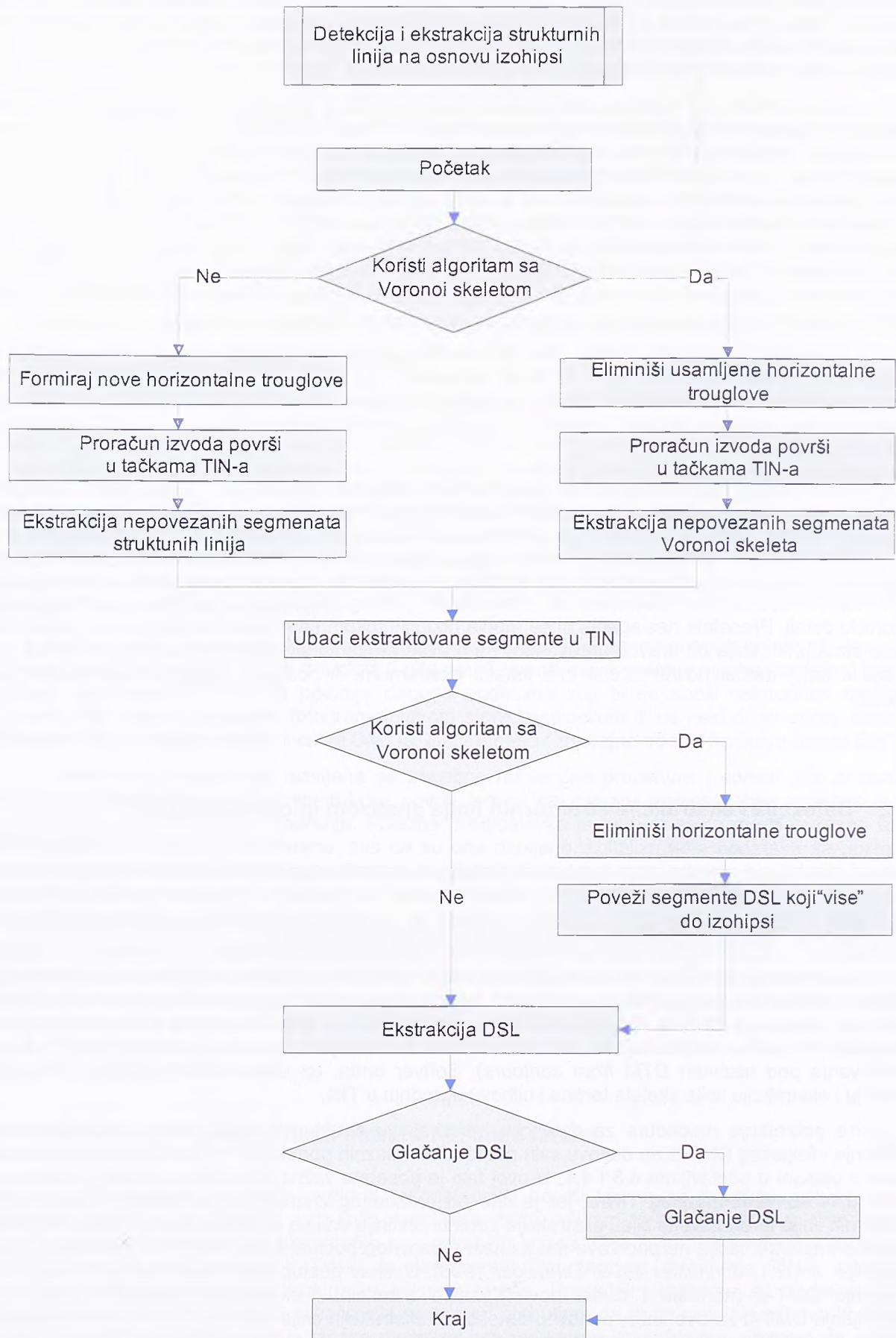
#### 4.5.2 Detekcija i ekstrakcija strukturnih linija analizom inicijalnog DMT-a

Da bi se eliminisala potreba za merenjem ili digitalizacijom svih strukturnih linija koje čine skelet terena, odnosno da bi se količina tih dodatnih podataka svela na najmanju moguću meru, u okviru ovog istraživanja razvijeni su numerički postupci i softver za automatsku detekciju i ekstrakciju tih linija na osnovu izohipsi. Razvoj je koncipiran na postupcima opisanim u poglavlju 3.4.2.1.

Na osnovu prikazanog algoritma za formiranje TIN DMT-a (Slika 4-2) vidi se da su postupci detekcije, ekstrakcije i uključivanja strukturnih linija terena u DMT ugrađeni u standardni algoritam i softver za formiranje DMT-a. Od korisnika se samo očekuje da odluči da li želi korišćenje pomenutih postupaka i da podesi odgovarajuće parametre obrade korišćenjem posebnog dijaloga (Slika 4-5, grupa podešavanja pod nazivom *DTM from contours*). Softver onda, uz standardno formiranje TIN-a, vrši i detekciju i ekstrakciju linija skeleta terena i njihovu ugradnju u TIN.

Pre pokretanja procedura za detekciju i ekstrakciju strukturnih linija terena vrši se standardno formiranje inicijalnog DMT-a na osnovu svih raspoloživih ulaznih podataka. Pri tome se koriste standardni postupci opisani u poglavljima 4.3 i 4.4. U ovoj fazi je posebno važno računanje normala i izvoda površi terena u tačkama formiranog TIN-a, jer je ono od presudnog značaja za određivanje visina za tačke strukturnih linija terena. Detekcija i ekstrakcija strukturnih linija vrši se analizom ovako formiranog DMT-a. Trenutna implementacija ne podržava mogućnost iterativnog postupka kao što je to predložio Schneider (poglavlje 3.4.2.1, *Schneider 1995, Schneider 1998*). Ovakav postupak bi podrazumevao naizmenično računanje DMT-a (normale i izvodi površi), zatim detekciju i ekstrakciju strukturnih linija terena, popravljavanje DMT-a za ove linije, ponovnu detekciju i ekstrakciju linija, itd. sve dok se za dve uzastopne iteracije ne dobiju zanemarljive razlike normala i izvoda površi u tačkama polaznog TIN-a. Iako bi se ovakav algoritam mogao implementirati, stiče se utisak da se time ne bi ostvarile takve dobiti u pogledu kvaliteta DMT-a koje bi mogle opravdati dodatno programiranje i procesiranje podataka. Zato je eventualna implementacija ovakvog algoritma ostavljena za dalji razvoj.





Slika 4-13 : Algoritam za ekstrakciju strukturalnih linija terena iz TIN DMT-a formiranog na osnovu izohipsi

Detekcija i ekstrakcija strukturnih linija terena započinje određivanjem približne geometrije strukturnih linija terena analizom horizontalnih trouglova TIN-a (Slika 4-13). Zatim se u cilju postizanja efikasnosti u toku dalje obrade vrši povezivanje pojedinačnih segmenata linija u polilinije. Istovremeno, ili nakon toga, inicijalna geometrija strukturnih linija se popravljaju vodeći računa o zakrivljenosti površi, uz korekciju visina tačaka i glačanje polilinija. Sve ovo se naravno radi u zavisnosti od parametara procesiranja koje je zadao korisnik softvera.

Rezultat obrade procedure za detekciju i ekstrakciju su strukturne linije terena sa manje-više korektnom geometrijom, kako u položajnom tako i u visinskom smislu. Ove linije se smeštaju u datoteke sa jednostavnim, tekstualnim formatom zapisa, pogodnim za dalje procesiranje podataka. Predviđeno je da se ove linije odmah nakon obrade ugrade u sam DMT, ili da se one dalje nezavisno obrađuju i eventualno tek nakon toga ugrađuju u DMT. Prva opcija omogućava potpuno automatsko formiranje DMT-a na osnovu izohipsi i posebno je interesantna u fazi verifikacije podataka, jer se može ponavljati neograničen broj puta. Njenom primenom se dobija privremeni, lokalni DMT za verifikaciju koji je po svom kvalitetu dosta blizak kvalitetu finalnog DMT-a. Sa druge strane, dodatna obrada strukturnih linija u nekom GIS ili CAD okruženju omogućava dalje podizanje kvaliteta ekstraktovanog skeleta terena. Kako će to biti objašnjeno u narednim poglavljima, i dalje postoje slučajevi za koje automatske procedure ne daju optimalno rešenje, pa ima smisla da se takvi slučajevi naknadno koriguju primenom drugih manuelnih ili automatskih postupaka (Slika B-6, dodatak B.1). Nedostatak ovog pristupa je što sve greške u prikupljenim podacima koje bi bile uočene nakon korigovanja, dovode u pitanje smisao ovih naknadnih korekcija. Naime, nakon ispravljanja naknadno uočenih grešaka u ulaznim podacima trebalo bi ponovo pokrenuti automatske procedure za detekciju i ekstrakciju skeleta terena, pa ga ponovo korigovati na mestima gde automatske procedure nisu dale zadovoljavajuće rezultate.

#### 4.5.2.1 Detekcija i određivanje približne geometrije strukturnih linija

Svi implementirani algoritmi polaze od pretpostavke da prvo treba odrediti približnu geometriju strukturnih linija terena u horizontalnoj ravni, a zatim na osnovu te geometrije odrediti visine, mada se kod nekih algoritama ovo može delimično ostvariti jednovremenim prolazom.

##### 4.5.2.1.1 Geometrija strukturnih linija u horizontalnoj ravni

Iz prikaza postupaka za ekstrakciju strukturnih linija terena na osnovu izohipsi koji se mogu naći u stručnoj i naučnoj literaturi (poglavlje 3.4.2.1) vidi se da najveći broj postupaka polazi od pretpostavke da se linije skeleta približno poklapaju sa srednjim osama izohipsi. Ova pretpostavka ima osnova samo ako su nagibi terena sa leve i desne strane strukturne linije terena približno jednaki. Ukoliko se ovi nagibi bitno razlikuju, strukturna linija odstupa od srednje ose. Zato se ovim postupcima u principu dobija samo približan položaj, tj. geometrija strukturnih linija terena.

U okviru ovog istraživanja u *Surfling* je implementirano i testirano više algoritama. Svi algoritmi se baziraju na lokalnoj analizi horizontalnih trouglova TIN-a. Nisu posebno razmatrani algoritmi kod kojih se vrši povezivanje više horizontalnih trouglova u veće celine (regione). Naravno, razmatrani su i implementirani i postupci za međusobno povezivanje detektovanih delova strukturnih linija.

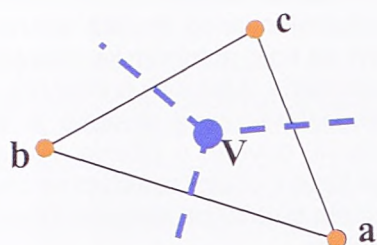
Kod razvoja ovih algoritama korišćena su dva različita pristupa, mada svaki od njih praktično ima za cilj određivanje srednjih osa izohipsi. Prvi pristup u osnovi sledi ideje koje je predložila ekipa istraživača sa ITC, Holandija (poglavlje 3.4.2.1, *Peng 1996*), a drugi je onaj koji koristi Voronoi dijagram i koncept skeleta i kore (poglavlje 3.4.2.1, *Gold 2000, Gold 2002, Gold 1999, Dakowicz 2002, Dakowicz 2002a, Thibault 2000*).

Algoritmi kod kojih se strukturne linije terena određuju po prvom pristupu polaze od pretpostavke da se pravci pružanja strukturnih linija terena, odnosno srednjih osa izohipsi unutar nekih trouglova mogu približno utvrditi koristeći lokalnu analizu tih trouglova i eventualno trouglova koji su njihovi neposredni susedi. Ova analiza je ograničena na **horizontalne trouglove kod kojih sva temena pripadaju izohipsama** (Slika 3-40 i Slika 3-41).

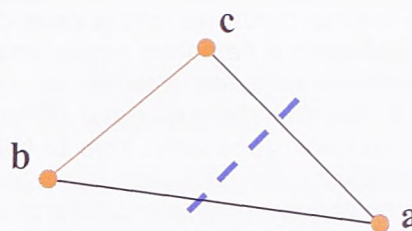


Pri tome se mogu javiti četiri vrste horizontalnih trouglova:

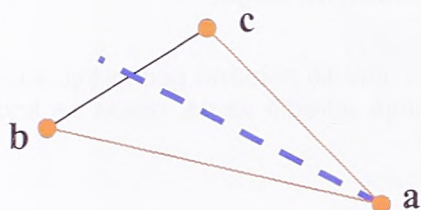
- trougao kod koga nema stranica koje su segmenti izohipsi; u ovom trouglu sustiće se (spaja i grana) više strukturalnih linija (Slika 4-14, a);
- trougao kod koga je jedna stranica segment izohipse; kroz ovaj trougao prolazi jedna strukturalna linija i ona seče stranice trougla koje nisu segmenti izohipsi (Slika 4-14, b);
- trougao kod koga su dve stranice segmenti izohipsi; ovaj trougao predstavlja kraj segmenta strukturalne linije terena između dveju izohipsi; ova strukturalna linija seče stranicu trougla koja nije segment izohipse (Slika 4-14, c);
- trougao kod koga su sve stranice segmenti izohipsi; ovaj trougao se vrlo retko pojavljuje u TIN-u dobijenom na osnovu realnih podataka; u trouglu nema strukturalnih linija terena, već se umesto toga javlja lokalni ekstremum - vrh ili dno (Slika 4-14, d).



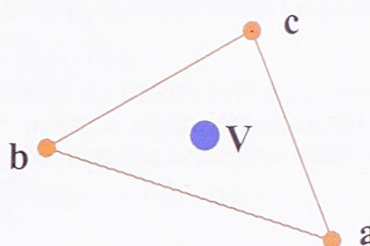
a) Trougao kod koga nema stranica koje su segmenti izohipsi



b) Trougao kod koga je jedna stranica segment izohipse



c) Trougao kod koga su dve stranice segmenti izohipsi



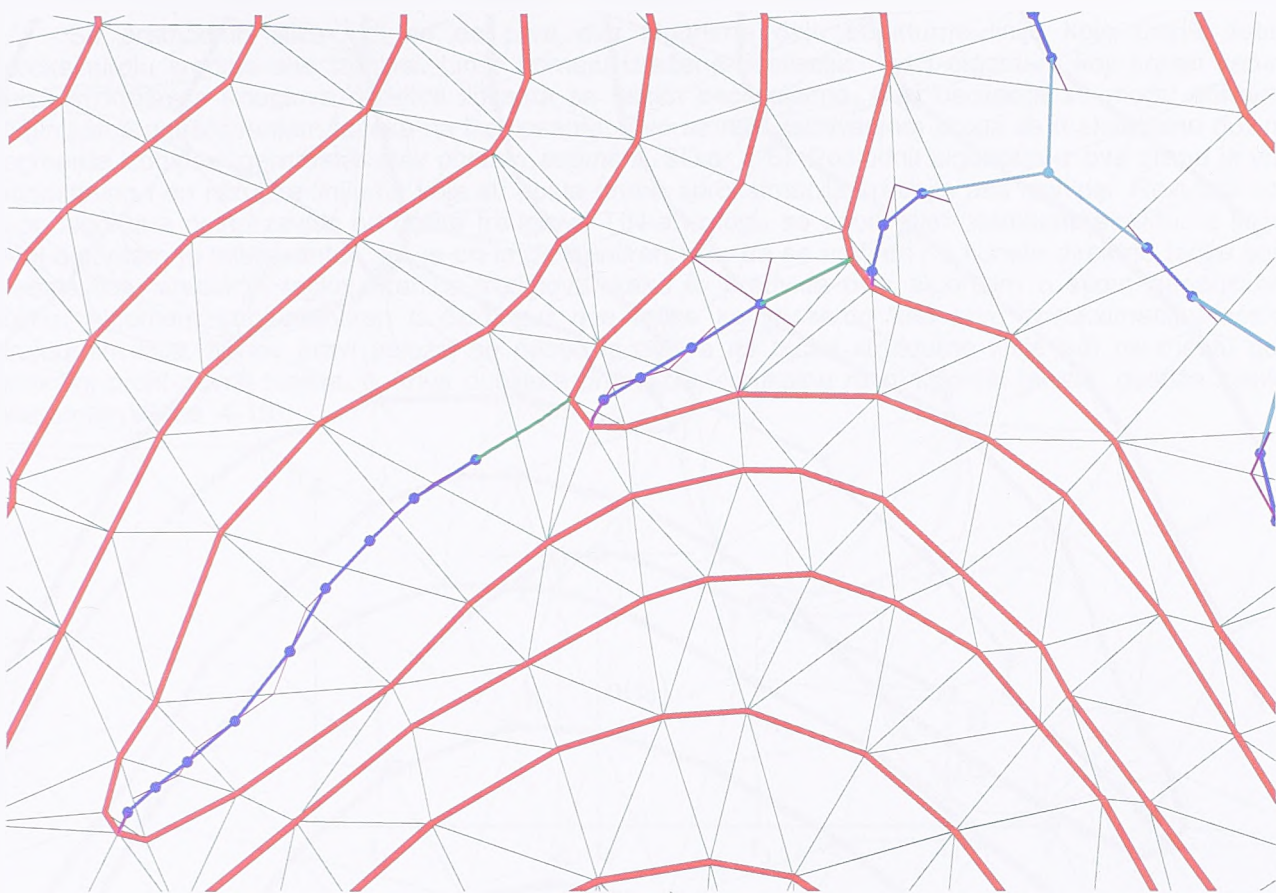
d) Trougao kod koga su sve stranice segmenti izohipsi

Slika 4-14 : Horizontalni trouglovi TIN-a dobijenog na osnovu izohipsi; segmenti i tačke izohipsi su prikazane narandžastom, a potencijalne forme terena plavom bojom

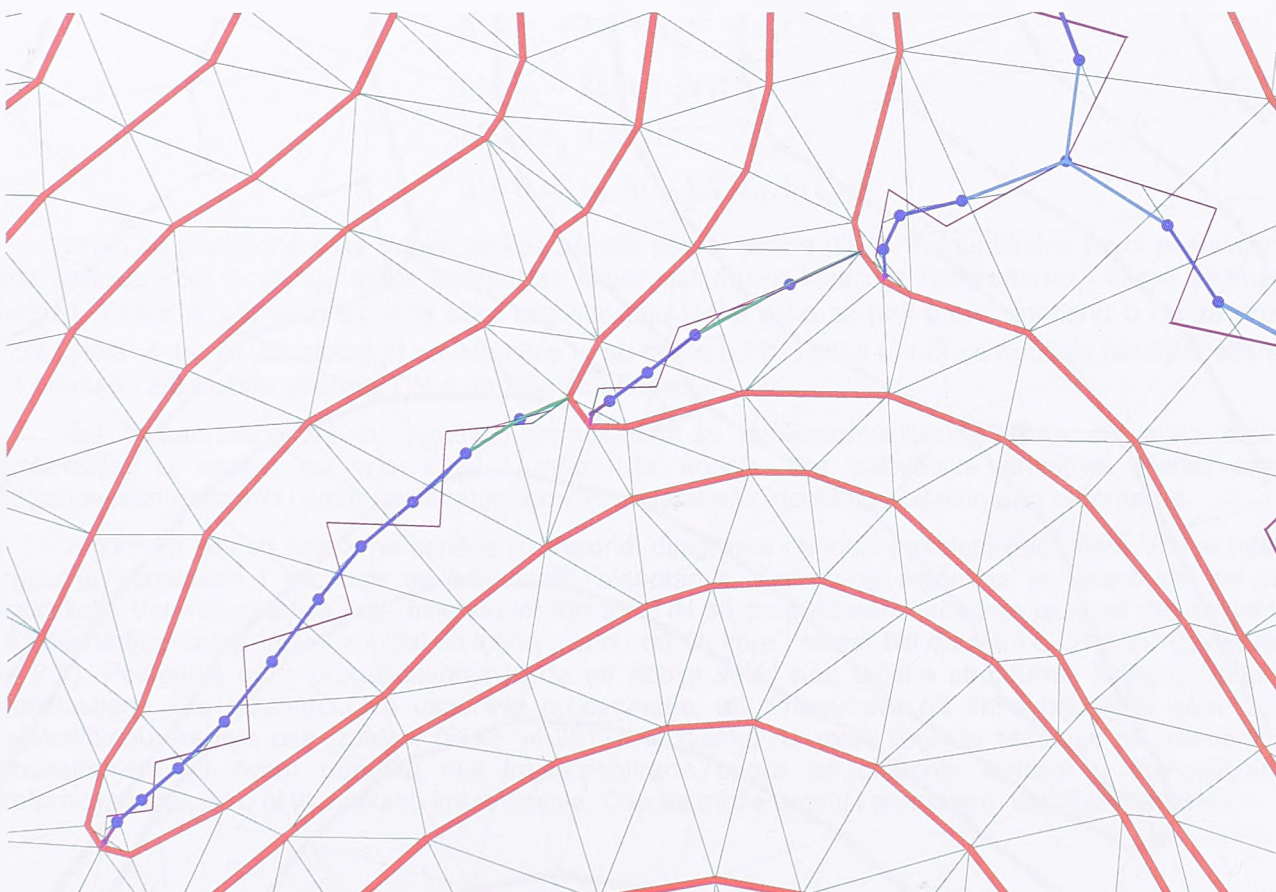
Razvijena su, implementirana i testirana četiri algoritma sa različitim, ali u osnovi sličnim, numeričkim postupcima. U principu, slučajevi pod a) i d) (Slika 4-14) su relativno trivijalni i za sve algoritme rešavaju se na isti način. Tačka V se određuje kao težište trougla. Za slučaj a) pravac pružanja strukturalne linije od tačke V ka susednim trouglovima zavisi od korišćenog numeričkog postupka, kao i za slučajeve b) i c).

Numerički postupci koji su korišćeni kod razvoja ovih algoritama za određivanje planimetrije strukturalnih linija terena su:

- formiranje segmenata strukturalnih linija povezivanjem središnjih tačaka linija koje spajaju središnje tačke linija koje seče strukturalna linija, tj stranica horizontalnih trouglova koje nisu izohipse – algoritam ME (Slika 4-15);
- formiranje segmenata strukturalnih linija na osnovu osrednjenih težišta susednih trouglova povezivanjem težišta trougla sa težištima susednih trouglova – algoritam GC(Slika 4-16);
- formiranje segmenata strukturalnih linija povezivanjem centara opisanih kružnica susednih trouglova – algoritam CC (Slika 4-17);
- formiranje segmenata strukturalnih linija povezivanjem središnjih tačaka linija koje strukturalna linija preseca, tj. stranica horizontalnih trouglova koje nisu izohipse – algoritam EM(Slika 4-18).

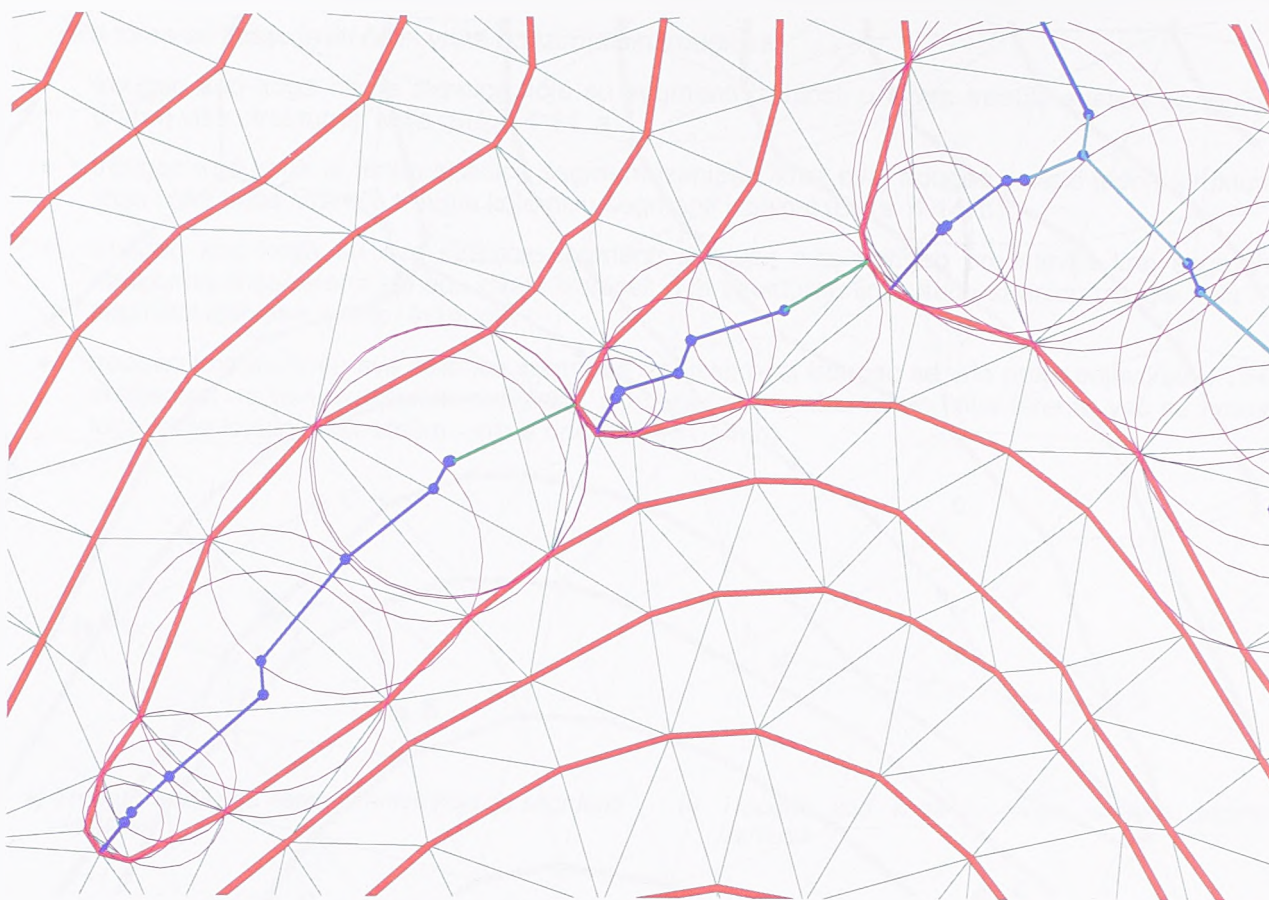


Slika 4-15 : Formiranje segmenata strukturalnih linija povezivanjem središnjih tačaka linija koje spajaju središnje tačke linija koje seče strukturalna linija – algoritam ME

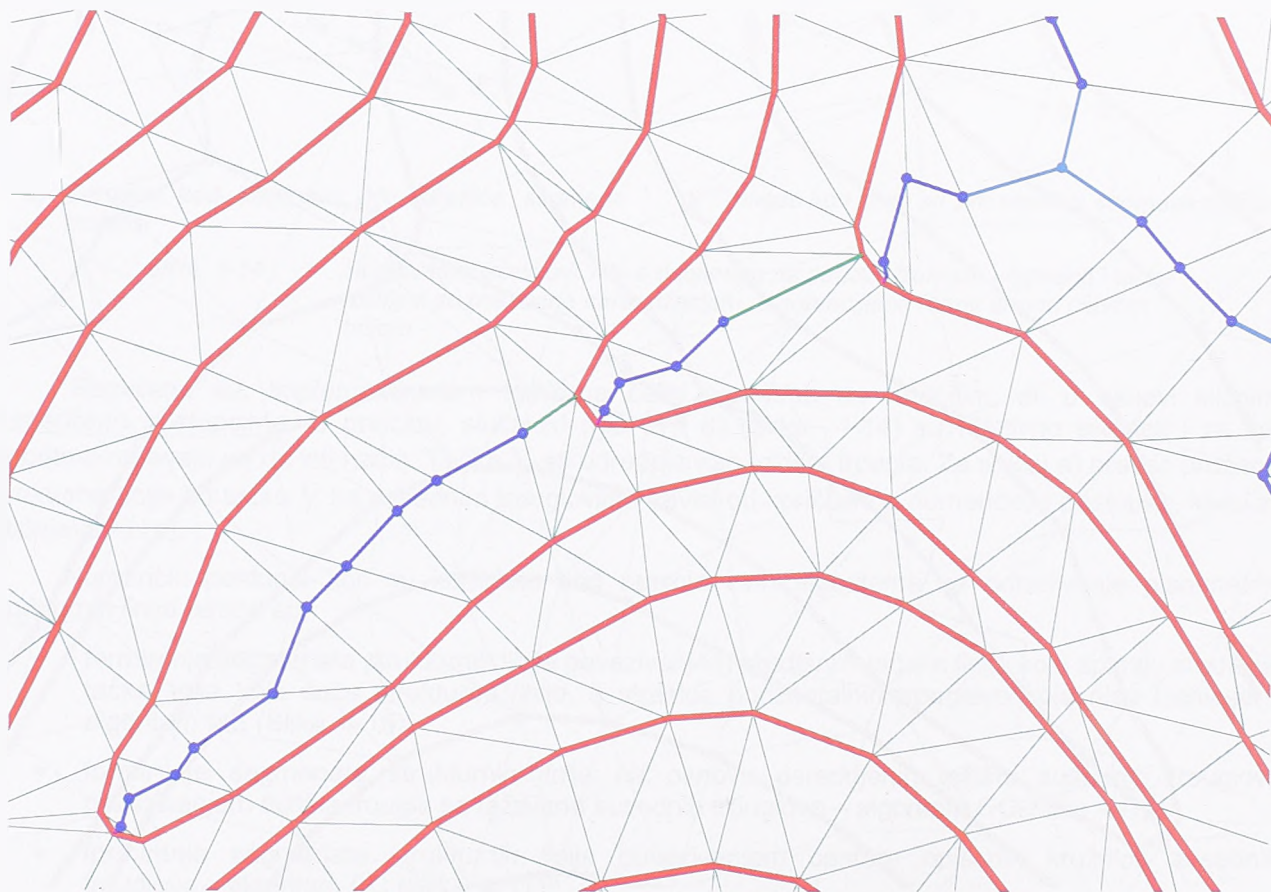


Slika 4-16 : Formiranje segmenata strukturalnih linija na osnovu osrednjenih težišta susednih trouglova – algoritam GC





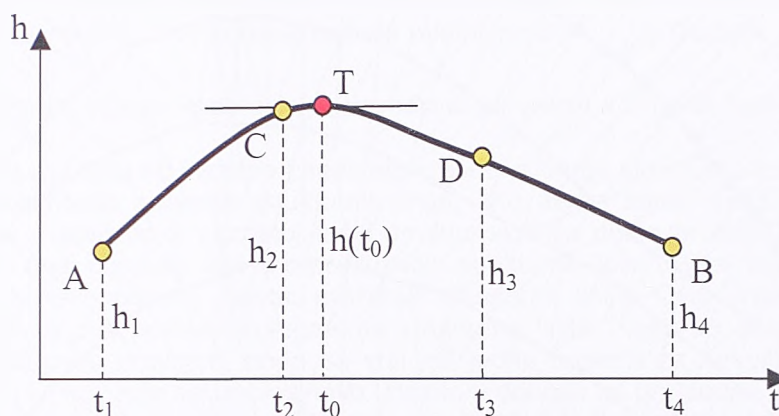
Slika 4-17 : Formiranje segmenata strukturalnih linija povezivanjem centara opisanih kružnica susednih trouglova – algoritam CC



Slika 4-18 : Formiranje segmenata strukturalnih linija povezivanjem središnjih tačaka linija koje seče strukturalna linija – algoritam EM



Sa prethodnih slika vidi se da prva dva algoritma daju strukturne linije koje dosta dobro aproksimiraju srednje ose izohipsi. Linije nemaju izražene oscilacije. Treći algoritam koji koristi centre opisanih kružnica trouglova rezultira linijama sa većim oscilacijama. Ove oscilacije se mogu efikasno eliminisati proglašavanjem tačaka na izohipsama. Ovo se radi zadavanjem praga za maksimalnu dužinu segmenta izohipse (parametar *Max contour segment*, Slika 4-5). Poslednji algoritam iz ove grupe je vrlo jednostavan i on rezultira linijama koje su dosta gruba aproksimacija srednjih osa izohipsi. Rezultati kod ovog algoritma dosta zavise od oblika trouglova TIN-a i mogu se dobiti jako izlomljene strukturne linije. Ovaj algoritam je interesantan, jer je on implementiran tako da se u stvari ne koriste direktno tačke koje predstavljaju središnje tačke stranica trouglova, kako to predviđa ovaj algoritam u svom generičkom obliku. Algoritam implementiran u *Surfling*-u ove tačke koristi samo kao prvu aproksimaciju tačaka strukturnih linija. Njihov pravi položaj se dobija iz uslova da tačka strukturne linije leži na mestu gde vertikalni profil površi terena, tj. kriva dobijena presekom vertikalne ravni i površi terena, dostiže lokalni ekstremum (Slika 4-19).



Slika 4-19 : Postupak određivanja tačke strukturne linije koristeći zahtev da je ta tačka lokalni ekstremum po profilu manje-više upravnom na strukturnu liniju

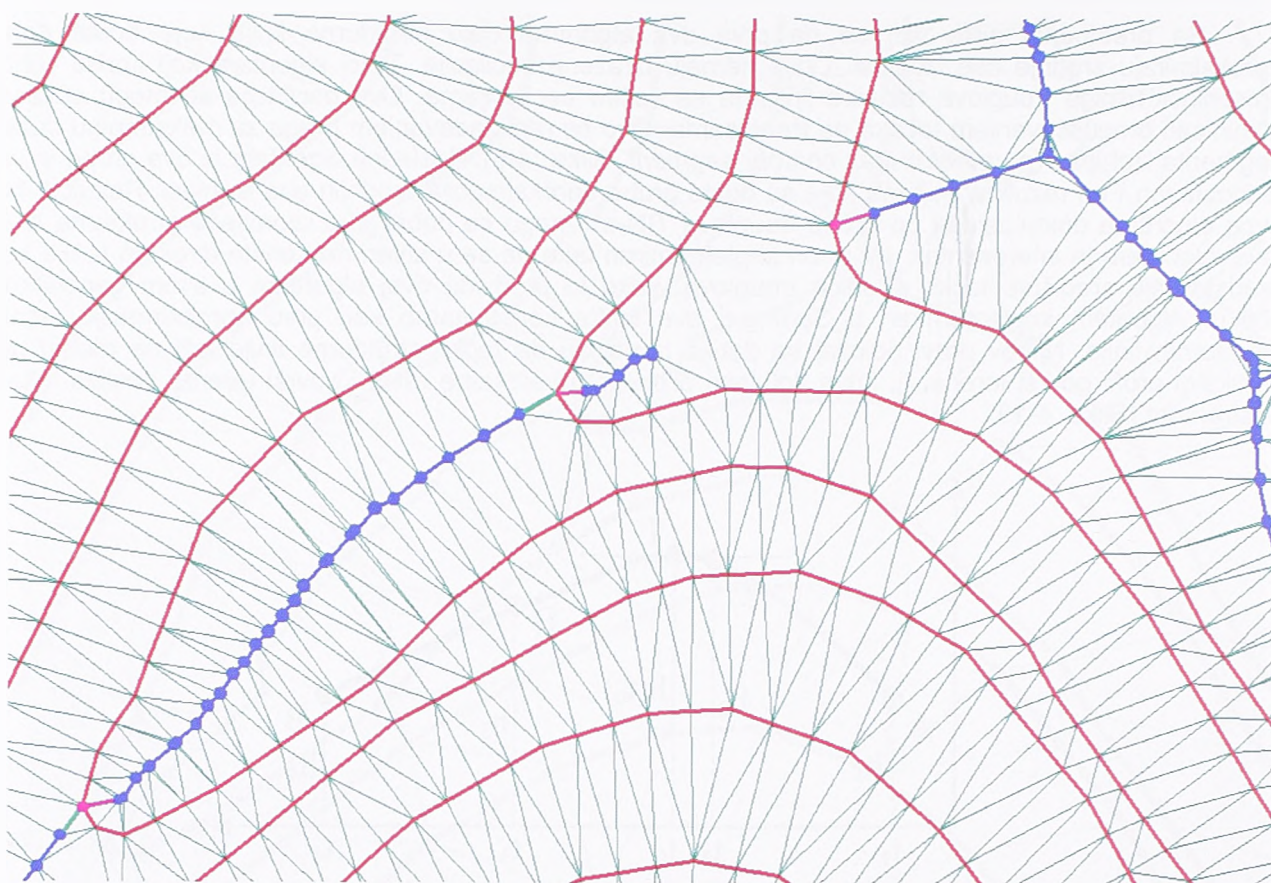
$$\begin{aligned}
 h &= a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \\
 h' &= a_1 + 2a_2 t + 3a_3 t^2 \\
 h'' &= 2a_2 + 6a_3 t \\
 h' &= 0 \Rightarrow t_0, h(t_0), T(t_0, h(t_0))
 \end{aligned}
 \tag{4-5}$$

Profil sa prethodne slike dobija se kao presek površi terena (DMT-a) i vertikalne ravni postavljene kroz stranicu koja povezuje tačke izohipsi sa istom visinom, a koja nije istovremeno i sama segment izohipsi. Tačke A i B sa prethodne slike predstavljaju tačke c i a za prvi profil, odnosno b i a za drugi profil (Slika 4-14, b). Za slučaj c) sa iste slike to su tačke b i c. Tačke C i D se dobijaju tako da leže na 1/3 odnosno 2/3 dužine stranice TIN-a na koju se odnose.

Svi opisani algoritmi su relativno jednostavni za implementaciju i odlikuje ih velika brzina izvršavanja. U osnovi su vrlo slični i mogu da koriste iste softverske primitive. Pored toga, pretprocesiranje ulaznih i postprocesiranje izlaznih podataka je identično kod svih ovih algoritama.

Algoritam koji se bazira na korišćenju Voronoi dijagrama i principa skeleta (algoritam VS) je nešto drugačije koncipiran i razlikuje se od ostalih algoritama. Kod ovog algoritma je važno da se pre ekstrakcije Voronoi stranica koje čine skelet formira TIN sa proglašćenim tačkama izohipsi. Na taj način se obezbeđuje da su tačke izohipsi dovoljno guste i da će kora i skelet biti očuvani u DT i VD (poglavlje, 3.4.2.1). Posledica ovog proglašćavanja je da se dobija veliki broj tačaka strukturnih linija, tj. linija je predstavljena vrlo detaljno. Ovo usporava procesiranje, ali omogućava da se dobiju linije koje bolje aproksimiraju srednje ose izohipsi (Slika 4-20). Broj tačaka na ovim linijama redukuje se naknadnim procesiranjem. U ovom trenutku nije implementirana opcija za glačanje izohipsi u fazi njihovog pretprocesiranja, iako bi to svakako imalo smisla. Ovo se može uraditi i primenom nekih drugih alata.





Slika 4-20 : Formiranje segmenata strukturalnih linija korišćenjem odnosa stranica Voronoi dijagrama i Deaunay-jeve triangulacije tj. principa skeleta i kore – algoritam VS

Kao i kod prva četiri algoritma redosled ekstrakcije segmenata strukturalnih linija terena je proizvoljan i izvodi se prolaskom kroz mrežu trouglova. Za sve algoritme obrađuje se jedan po jedan trougao i pri tome se koriste samo podaci koji se odnose na susedne trouglove trougla koji se obrađuje. Rezultat procesiranja svakog trougla može biti jedan ili više segmenata strukturalnih linija. Sračunati segmenti se zapisuju u tekstualnu datoteku sa jednostavnim formatom zapisa. Pri tome se vodi računa da se linije ne registruju više puta. U svim implementiranim algoritmima koristi se jednostavan princip da se trougao povezuje sa svojim susedom samo ako se po redosledu obrade taj trougao obrađuje pre svog suseda. U suprotnom, linija je već kreirana tokom obrade suseda. Redosled procesiranja može biti proizvoljan, ali najlogičnije je da to bude po redosledu memorisanja trouglova u tabelama ili listama.

U okviru svih prikazanih algoritama implementirana je i funkcija za povezivanje strukturalnih linija do izohipsi. Ova povezivanja su manje-više trivijalna za sve algoritme, sem za algoritam koji koristi Voronoi skelet.

Povezivanje do tačke izohipse koja sadrži strukturalnu liniju za prva četiri algoritma svodi se na slučaj obrade horizontalnog trougla kod koga su dve stranice segmenti jedne izohipse (slučaj c, Slika 4-14). Strukturalna linija se vodi preko tačke određene po postupku specifičnom za svaki algoritam, pa sve do temena a koje je zajedničko za stranice trougla koje su segmenti izohipse. Ovi segmenti strukturalne linije prikazani su ljubičastom bojom (Slika 4-15 do Slika 4-18). Slična je i situacija kod povezivanja sa gornjom izohipsom preko trougla koji nije horizontalan. Ovi delovi strukturalnih linija prikazani su u zelenoj boji.

Kod algoritma koji koristi Voronoi skelet problem povezivanja je rešen na drugi način. Nakon detekcije svih Voronoi stranica koje formiraju skelet izohipsi (Voronoi skelet) i njihovog zapisivanja u datoteku na disku, vrši se, kao i za sve ostale algoritme, ubacivanje ovih nepovezanih segmenata strukturalnih linija u TIN. Za razliku od ostalih algoritama kod kojih se tokom obrade horizontalnih trouglova određuju i svi segmenti koji povezuju segmente iz poslednjih horizontalnih trouglova u lancu sa gornjom izohipsom (Slika 4-15 do Slika 4-18, zelene linije), odnosno sa vrhom izohipse (ljubičaste linije), kod ovog algoritma to nije slučaj, pa je potrebno da se to uradi nakon ubacivanja svih segmenata u TIN. Procedura se sastoji u tome da se prolaskom kroz listu čvorova TIN-a traže takvi čvorovi koji pripadaju detektovanim strukturalnim linijama, ali u kojima se ne spajaju bar dva segmenta strukturalnih linija (Slika



4-21, a), čvor N). Za ove čvorove vrši se testiranje svih susjednih čvorova TIN-a kao potencijalnih kandidata za produžetak strukturne linije do najbliže izohipse ili druge strukturne linije. Razmatraju se naravno samo oni čvorovi-kandidati koji pripadaju izohipsama ili strukturnim linijama (Slika 4-21, a), čvorovi A, B, C i D). Koristi se relativno jednostavan algoritam sa par kriterijuma za izbor optimalne veze.



Slika 4-21 : Povezivanje (produžavanje) segmenata detektovanih strukturnih linija do izohipsi

Prvo se ispituje da li je neki od čvorova-kandidata kraj neke druge strukturne linije. Ako jeste, onda se on bira da bi se obezbedilo spajanje strukturnih linija. Ako nema takvih kandidata, onda se bira kandidat sa kojim bi se u poslednjoj poznatoj tački strukturne linije dobio prelomni ugao poligona od približno  $180^\circ$ , tj. bira se onaj kandidat koji je u produžetku strukturne linije (Slika 4-21, a), čvor C). Kod proračuna se u stvari koristi ocenjeni pravac pružanja strukturne linije. Ovaj pravac se može dobiti osrednjavanjem azimuta za dva poslednja segmenta strukturne linije. Kada se odredi kandidat koji je najbliži pravoj definisanoj ovim pravcem, onda se vrši još jedna provera za nekoliko kandidata (Slika 4-21, b), čvorovi B, C, D i E) koji leže na izohipsi levo i desno u odnosu na prethodno izabranog kandidata (Slika 4-21, b), čvor A). Ovo se radi zato da bi se videlo da li neki od tih kandidata ima veću zakrivljenost izohipse od već izabranog kandidata. Ova zakrivljenost se procenjuje preko vrednosti ugla između dva segmenta izohipse u posmatranoj tački. Ako postoji takav kandidat, onda je on definitivni čvor TIN-a u kome se strukturna linija povezuje sa izohipsom (Slika 4-21, b), čvor B). U softveru je implementirana i provera dužine dobijenog segmenta strukturne linije. Ako on prelazi specificirani prag, veza se ne kreira. Ovo povezivanje strukturnih linija preko izohipsi je ujedno i najslabije mesto kod algoritma koji se bazira na Voronoi skeletu. Eksperimentalna istraživanja su pokazala da se sa trenutno implementiranim algoritmom ne obezbeđuje potpuno povezivanje svih strukturnih linija, već da i dalje u rezultatima ostaje veliki procenat nepovezanih linija (Slika B-13, dodatak B.1). Pored toga, procena zakrivljenosti izohipse preko vrednosti ugla između dva segmenta izohipse u posmatranoj tački ne daje uvek najbolje rešenje (Slika B-13, b), detalji zaokruženi plavom bojom, dodatak B.1).

Uspešnost implementiranih algoritama za detekciju i ekstrakciju strukturnih linija terena može se oceniti i vizuelnom inspekcijom rezultata obrade ovim algoritmima datim u dodatku B.1 (Slika B-4 do Slika B-13). Može se zaključiti da svi algoritmi daju generalno prihvatljive rezultate, posebno ako se ima na umu da se time eliminišu horizontalni trouglovi TIN-a koji su veliki nedostatak kod TIN DMT-a. Kao što se može videti iz primera kod koga su izohipse date sa prevelikom gustom tačaka, obrada podataka korišćenjem jednostavnijih algoritama kao što je ME može rezultirati velikim brojem detektovanih segmenata (Slika B-13, slučaj c). Rezultati dobijeni primenom VS algoritma su u najvećem broju slučajeva dobri i pouzdani, mada ni oni nisu savršeni, pa se i tu ponekad mogu javiti krupnije greške. Neke od tih grešaka su posledica propusta u podacima (Slika B-6, detalj A – nedostaje deo izohipse), a neke su jednostavno rezultat nesavršenosti algoritama (Slika B-6, detalj B). Zbog svega toga, potreban je dalji rad na usavršavanju ovih algoritama posebno s obzirom na izdvajanje samo značajnih strukturnih linija terena i rešavanje problema njihovog međusobnog povezivanja. U međuvremenu, korisniku je ostavljena mogućnost korišćenja više različitih algoritama, što, uz jednostavno podešavanje parametara obrade, obezbeđuje prihvatljive rezultate.

#### 4.5.2.1.2 Visine tačaka detektovanih strukturnih linija terena

Računanje visina za tačke strukturnih linija terena koje su određene korišćenjem prethodno opisanih algoritama može se izvesti na nekoliko načina. Većina njih je opisana u poglavlju 3.4.2.1.1. U okviru ovog istraživanja analizirana su i implementirana dva postupka.



Prvi od njih polazi od činjenice da svi algoritmi za određivanje približne geometrije strukturnih linija terena koriste već formirani TIN DMT. Prema tome, sasvim je logično da se interpolacija visina za ove tačke izvrši korišćenjem tog DMT-a. Već je konstatovano da se korišćenjem kubnih Bézier-ovih trougaonih zakrpa, uz specijalan postupak proračuna normala na površ terena, postiže vrlo kvalitetna rekonstrukcija površi terena na osnovu ulaznih podataka u vidu izohipsi.

Drugi način je praktično identičan onom koji bi se koristio kod manuelne interpolacije visina u ovim tačkama. To je linearna interpolacija od tačaka u kojima se detektovane strukturne linije povezuju sa izohipsama. Ovaj način u velikoj meri zavisi od uspešnosti algoritma za povezivanje detektovanih strukturnih linija do izohipsi.

Oba načina su implementirana u okviru razvijenog softvera i na korisniku je da izabere metod koji najviše odgovara prirodi terena i nameni DMT-a koji se formira. Slika B-12, iz dodatka B.1 sadrži prikaz rezultata formiranja DMT-a korišćenjem oba razvijena postupka. Može se zaključiti da postupak koji koristi linearnu interpolaciju daje nešto logičnije rezultate. Pored toga, ovaj postupak je i generalno stabilniji s obzirom da ne zavisi od proračuna normala u tačkama izohipsi.

Veliki problem koji se javlja kod određivanja visina za tačke strukturnih linija je na mestima gde se javljaju široke doline oivičene strmim padinama brda ili planine. Ovaj problem je posebno izražen ako na tim mestima nema dovoljan broj tačaka sa poznatim visinama. Pored odgovarajuće gustine, neophodno je i da te tačke budu ravnomerno raspoređene po dolini, a posebno je važno da ih ima po obodu doline. Pošto je ove zahteve uglavnom teško ispuniti kada je reč o digitalizaciji postojećih podloga, javlja se pomenuti problem i potrebno ga je rešiti na odgovarajući način. Strukturne linije koje se automatski određuju u dolinama najčešće povezuju izohipse sa istim visinama, tako da linearna interpolacija od izohipsi uglavnom nema smisla. Sa druge strane, korišćenjem kubnih Bézier-ovih trougaonih zakrpa, zbog same prirode ovakvog načina modeliranja površi, dobija se površ koja u dolini ima velika odstupanja od realne površi terena. Na taj način postupak modeliranja kubnim zakrpama, koji je izuzetno koristan za korektnu rekonstrukciju površi terena na mestima gde se javljaju vododelnice i vodoslivnice, ovde postaje izuzetno opasan i nepouzdan (Slika B-17, poglavlje B.2.5, dodatak B).

Za rešavanje ovog problema moguće je više pristupa:

- zadavanje (digitalizacija ili merenje) dovoljnog broja tačaka gusto raspoređenih po dolini;
- zadavanje (digitalizacija ili merenje) prelomnih linija koje razdvajaju doline od strmih padina;
- označavanje izohipsi koje razdvajaju doline od strmih padina;
- razvoj i implementacija numeričkih postupaka i softvera koji će posebno respektovati ovakve slučajeve.

Svaki od ovih pristupa ima svoje prednosti i nedostatke. Dodatno merenje ili 2D digitalizacija tačaka i prelomnih linija terena je svakako najpouzdaniji način. Međutim, ovo zahteva značajno angažovanje operatera. Digitalizacija pojedinačnih tačaka ne predstavlja veći problem, pošto se ona može jednostavno izvesti zadavanjem visine terena u dolini i digitalizacijom tačaka po ekranu. Visine za ove tačke se mogu jednostavno dobiti i linearnom interpolacijom iz DMT-a formiranog na osnovu samih izohipsi. Oba načina su podržana u okviru *MapSoft-a* i *Surflng-a*. Sličan pristup se može primeniti i za digitalizaciju prelomnih linija koje razdvajaju doline od strmih padina, s tom razlikom što se tu mora voditi daleko više računa kod digitalizacije, tj. kod definisanja položaja ovih linija u horizontalnoj ravni. Ukoliko se ove linije digitalizuju i proglaše prelomnim linijama terena, onda digitalizacija rasutih tačaka po dolini nije potrebna. Eksperimenti sprovedeni u okviru ovog istraživanja sugerišu da 2D digitalizacija tačaka i strukturnih linija nije optimalno rešenje problema rekonstrukcije površi terena u dolinama.

Druga mogućnost je da se izohipsama koje razdvajaju doline od strmih padina dodele atributi koji će obezbediti tretiranje ovih izohipsi tokom formiranja DMT-a na sličan način kao i prelomnih linija. Ovo rešenje je takođe podržano u okviru *MapSoft-a* i *Surflng-a*. U *Surflng-u* su modifikovani postojeći postupci za formiranje TIN-a i proračun normala na površ terena u tačkama ovakvih izohipsi. Veliki problem kod ovog pristupa je to što izohipsa može da se proteže preko velikog područja, pa se sa ovakvim dodeljivanjem posebnog atributa i tretiranjem izohipse kao prelomne linije mogu javiti neželjeni efekti na drugim mestima, tj. izvan doline.

Zbog navedenih nedostataka opisanih metoda razmatran je razvoj numeričkih postupaka koji bi ovakve slučajeve uspešno rešavali i koji bi obezbeđivali korektnu rekonstrukciju površi terena u dolinama. Prvo je učinjen pokušaj da se to uradi prilikom proračuna normala u tačkama TIN-a (najčešće su to tačke izohipsi). Na prvi pogled, izgledalo je da se to može uraditi na osnovu razlike u normalama sračunatim za delove profila ka gornjoj i donjoj izohipsi (profili  $P-P_a$  i  $P-P_b$ , Slika 4-7) i vodeći računa o veličini trouglova.

Međutim, ovakav pokušaj se pokazao neuspešan. Nije pronađeno rešenje koje obezbeđuje korektnu rekonstrukciju površi terena za sve slučajeve koji se mogu pojaviti. Zato je razvijen i testiran drugačiji postupak. Pošlo se od pretpostavke da na mestima gde se javljaju horizontalni trouglovi površ terena može da odstupa od ovih trouglova samo za iznos koji je manji od ekvidistancije izohipsi. Zato je predviđeno da se kod određivanja visina za tačke detektovanih strukturnih linija koristi kubna interpolacija u svim slučajevima gde kubne trougaone zakrpe odstupaju od trougaonih faceta (horizontalni trouglovi u ovom slučaju) manje od zadatog praga (parametar *MaxSDV*). Ovaj prag zadaje korisnik i on obično ima vrednost ekvidistancije ili nešto slično (od 0.5 do 1.5 vrednosti ekvidistancije). Na mestima gde su ove razlike veće koristi se linearna interpolacija. Na ovaj način otklanja se rizik pojave grešaka rekonstrukcije površi koje su veće od iznosa ekvidistancije.

#### 4.5.2.2 Popravljenje geometrije detektovanih strukturnih linija

Kao što je to već rečeno, prethodno opisanim postupcima dobija se samo približna geometrija strukturnih linija terena, jer se pretpostavlja da se te linije poklapaju sa srednjim osama izohipsi. Da bi se korektno odredio položaj strukturne linije u horizontalnoj ravni potrebno je uzeti u obzir i nagibe površi terena sa leve i desne strane strukturne linije.

Ovakav postupak je već implementiran kod algoritma EM. Tu se za inicijalne pozicije tačaka strukturnih linija uzimaju sredine linija koje povezuju naspramne tačke jedne izohipse ili tačke dveju izohipsi sa istim visinama (Slika 4-18). Odmah nakon određivanja položaja neke tačke strukturne linije, ovaj položaj se koriguje koristeći profil terena definisan vertikalnom ravni postavljenom kroz liniju na kojoj ta tačka leži (Slika 4-19, formule 4-5). Ovaj profil je definisan krajnjim tačkama posmatrane linije i ocenjenim normalama na površ terena u tim tačkama. Definitivni položaj tačke u horizontalnoj ravni i njena visina dobijaju se iz uslova da ta tačka predstavlja lokalni ekstremum profila.

Sličan postupak može se primeniti i naknadno, tj. nakon određivanja približne geometrije strukturnih linija. Ovaj postupak nije trenutno implementiran u okviru *Surflng*-a, pa će se on ovde samo ukratko opisati. Sekvencijalnim prolazom kroz sve tačke detektovanih strukturnih linija potrebno je prekorigovati njihove pozicije pre njihovog ubacivanja u konačni TIN DMT. Za svaku tačku treba sračunati profil terena po pravcu koji je približno upravan na strukturnu liniju. Interpolacija visina za ovaj profil može se uraditi korišćenjem preseka linije profila sa susednim izohipsama, ili korišćenjem već formiranog DMT-a (normale na površ terena i kubne trougaone zakrpe). U oba slučaja definitivni položaj i visina tačke strukturne linije dobija se iz uslova da je ta tačka lokalni ekstremum dobijenog profila (Slika 4-19, formule 4-5).

Tokom ekstrakcije detektovanih strukturnih linija terena, a neposredno pre zapisivanja ovih linija u datoteku, može se izvršiti još jedna korekcija visina za tačke strukturnih linija. Reč je prekorigovanju visina svih tačaka strukturne linije između dve izohipse sa različitim visinama. Koristi se već pomenuta linearna interpolacija od tačaka u kojima se strukturna linija povezuje sa izohipsama.

U cilju popravljanja geometrije detektovanih strukturnih linija obezbeđena je i funkcija za glačanje ovih linija. Ovo se može izvesti korišćenjem algoritama i numeričkih postupaka za interpolaciju ili aproksimaciju krivih linija na osnovu datih tačaka. Pod datim tačkama ovde se podrazumevaju tačke detektovanih strukturnih linija terena. U *Surflng-u* se za ove potrebe koriste isti algoritmi kao i za glačanje konstruisanih izohipsi, s tom razlikom što se ovde glačanje vrši i za visine tačaka, a ne samo za X i Y koordinate (Slika 4-5). U okviru trenutne implementacije ovih postupaka vrši se nezavisno korigovanje vrednosti za sve tri koordinate tačaka strukturne linije. Opcija glačanja je naročito korisna kod korišćenja algoritma VS (algoritam sa Voronoi dijagramom i principom skeleta i kore). Naime, za potrebe procesiranja ovim algoritmom, neophodno je da se tačke na izohipsama dodatno proguste da bi skelet i kora bili dobro definisani preko Voronoi/Delaunay stranica (poglavlje 3.4.2.1.1). Ovo istovremeno rezultira velikim brojem tačaka i kratkim segmentima na strukturnim linijama (Slika 4-20). Broj ovih tačaka može se značajno redukovati korišćenjem pomenutih algoritama za glačanje strukturnih linija, jer su nakon glačanja strukturne linije date preko tačaka na jednakom međusobnom rastojanju. Vrednost rastojanja zadaje korisnik softvera (parametar *Spline segment*, Slika 4-5).

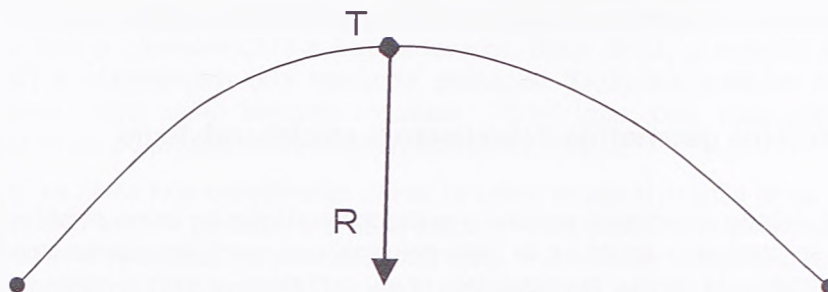
Kada je reč o popravljanju geometrije strukturnih linija ovde treba spomenuti i postupke za redukciju detektovanog sadržaja na prihvatljivu meru. Opisanim algoritmima za detekciju i ekstrakciju strukturnih linija terena praktično se dobijaju sve srednje ose izohipsi koje razdvajaju segmente izohipsi na istim visinama. Mnoge od ovih linija nisu značajne za digitalno modeliranje terena. Zato bi imalo smisla



da se kroz analizu geometrije ovih linija, ali i kroz analizu površi terena gde se one pružaju, odredi značaj koje ove linije imaju za rekonstrukciju površi terena. Neke od ovih linija treba tretirati kao strukturne linije, a neke kao prelomne linije terena. Neki od načina da se ovo uradi su:

- proračun zakrivljenosti površi terena u svim tačkama strukturne linije;
- ocena odstupanja trougaonih zakrpa od trougaonih faceta u svim tačkama strukturne linije.

Proračun zakrivljenosti površi terena treba uraditi po profilu približno upravnom na strukturnu liniju (Slika 4-22).



Slika 4-22 : Krivina krive u tački

$$K = \frac{h''}{(1 + h'^2)^{3/2}}, \quad K = \frac{1}{R} \quad (4-6)$$

Opcija koja koristi odstupanja trougaonih zakrpa od trougaonih faceta u svim tačkama strukturne linije je mnogo jednostavnija za implementaciju, jer su praktično sve funkcije već na raspolaganju u okviru *Surflng-a*. Na ovaj način bi se mogao značajno popraviti rezultat detekcije i ekstrakcije strukturnih linija terena za neke ulazne podatke i korišćene metode detekcije (Slika B-13, c).

#### 4.5.2.3 Ugradnja detektovanih i ekstraktovanih strukturnih linija u DMT

Ugradnja detektovanih strukturnih linija u TIN DMT izvodi se na potpuno isti način kao i ubacivanje svih drugih obaveznih linija u TIN. Pošto su za krajeve strukturnih linija birane tačke izohipsi, izbegnut je problem presecanja strukturnih linija i izohipsi. Postupak se izvodi tako što se ponovo formira DMT, ali sa dodatkom ovih linija.

#### 4.5.3 Profinjavanje DMT-a

Nakon formiranja TIN DMT-a na osnovu ulaznih podataka može se izvršiti njegovo dodatno profinjavanje. Ovo profinjavanje ima dva cilja:

- eliminaciju trouglova TIN-a sa lošim oblikom (izduženi i tanki trouglovi i trouglovi sa površinom većom od zadate);
- eliminaciju odstupanja između trougaonih faceta i kubnih Bézier-ovih zakrpa.

Eliminacija loših trouglova vrši se prethodno opisanim postupcima profinjavanja TIN-a (3.3.1.3). Visine za nove tačke određuju se primenom kubne interpolacije iz prethodno formiranog DMT-a. Eliminacija odstupanja između trougaonih faceta i kubnih Bézier-ovih zakrpa vrši se ubacivanjem novih tačaka u težišta onih trouglova koji ne zadovoljavaju zadati prag (Slika 4-5, parametar *RTSDV*). Ova funkcija je posebno korisna za rešenje problema korektno rekonstrukcije površi terena u širokim dolinama sa naglim prelaskom u strme strane, tj. padine brda ili planine. Visine za ove tačke se određuju korišćenjem linearne interpolacije, tj. iz uslova pripadnosti ovih tačaka trougaonim facetama TIN-a.

Sledeća interesantna opcija za profinjavanje DMT-a je filtriranje šumova iz podataka merenja. Naime, visine i normale u tačkama TIN-a mogu se korigovati za male iznose na osnovu analize lokalne površi terena. Za ove potrebe mogu se koristiti geostatističke metode ili metode sa aproksimirajućim lokalnim površima (poglavlja 3.3.2.1 i 3.3.2.2). Ova funkcionalnost trenutno nije implementirana u *Surflng*-u. Međutim, razvoj ovih funkcija ne predstavlja poseban problem s obzirom da je najveći broj procedura već razvijen za druge potrebe (kolokacija, funkcije za lokalnu analizu TIN-a, i sl.). Procenjuje se da bi razvoj i korišćenje ovih funkcija značajno popravilo kvalitet DMT-a. Tu se pre svega misli na kartografski kvalitet DMT-a, dok je apsolutna tačnost visina DNT-a ipak u drugom planu.

#### 4.5.4 Redukcija podataka DMT-a

Problem velike količine podataka i njihovo svođenje na optimalnu meru je skoro uvek prisutan kod digitalnog modeliranja terena, a posebno kada je reč o formiranju nacionalnog DMT-a. Ovaj problem je naročito izražen kod korišćenja podataka dobijenih novim tehnikama prikupljanja (LiDAR i inSAR), automatskom ekstrakcijom DMT-a kod digitalne fotogrametrije, ali i podataka dobijenih digitalizacijom postojećih podloga. Zato su u istraživanju analizirani i postupci za redukciju ovih podataka na prihvatljivu i optimalnu meru.

U poglavlju 3.5.1 su pomenuti postupci koji se koriste za pojednostavljenje modela terena u cilju njegove efikasne 3D vizuelizacije. Praktično svi ovi postupci mogu se koristiti i za redukciju DMT podataka. S obzirom na to da se u okviru ovog istraživanja intenzivno koristi TIN struktura podataka, logično je da se za ove potrebe razvije i implementira postupak koji se zasniva na metodama profinjenja u više prolaza (*Garland 1995*) ili na metodama decimacije u više prolaza (*Kobbelt 1998*). Metode decimacije u više prolaza podrazumevaju da se, polazeći od kompletnog TIN-a, sukcesivno izbacuju one tačke čiji je značaj za modeliranje površi terena manji. S obzirom na to da su u *Surflng*-u već razvijene funkcije za brisanje tačaka TIN-a, ostaje samo da se izabere odgovarajući kriterijum za izbor tačaka koje treba izbaciti.

Međutim, imajući u vidu vremensko ograničenje i obim samog istraživanja, kao i kompleksnost ovih postupaka, u ovom trenutku izabran je drugačiji pristup. On se sastoji u tome da se na osnovu TIN DMT-a korišćenjem već razvijenih funkcija formira grid DMT sa dovoljnom gustinom tačaka mreže, tj. dovoljno malom ćelijom grida. Zatim se ovaj grid DMT analizira i na osnovu toga formira grid sa promenljivom veličinom grida. Postupak u velikoj meri odgovara pristupu koji se koristi kod prikupljanja DMT podataka po metodi progresivnog samplinga. Ovakav pristup ima opravdanja kada je reč o podacima digitalizacije postojećih podloga. Naime, tačnost visina tačaka na izohipsama je takva da ne iziskuje bezuslovno njihovo zadržavanje u finalnom DMT-u. Istovremeno, podaci koji su u vidu izohipsi nisu pogodni za efikasno rukovanje, zbog topologije i geometrije izohipsi. Zato prelazak na DMT sa podacima u vidu visinskih tačaka datih u formi pravilnog grida (uniformnog ili promenljivog) ima smisla.

Efikasna redukcija podataka podrazumeva da su iz tih podataka prethodno otklonjeni šumovi. Ovo se može izvesti jednostavnim procedurama korišćenjem odgovarajućih filtera ili geostatističkih metoda. Cilj redukcije je da se na osnovu tačaka uređenih u pravilnu mrežu, tj. uniformni grid dobije promenljivi grid. Ovaj promenljivi grid može biti:

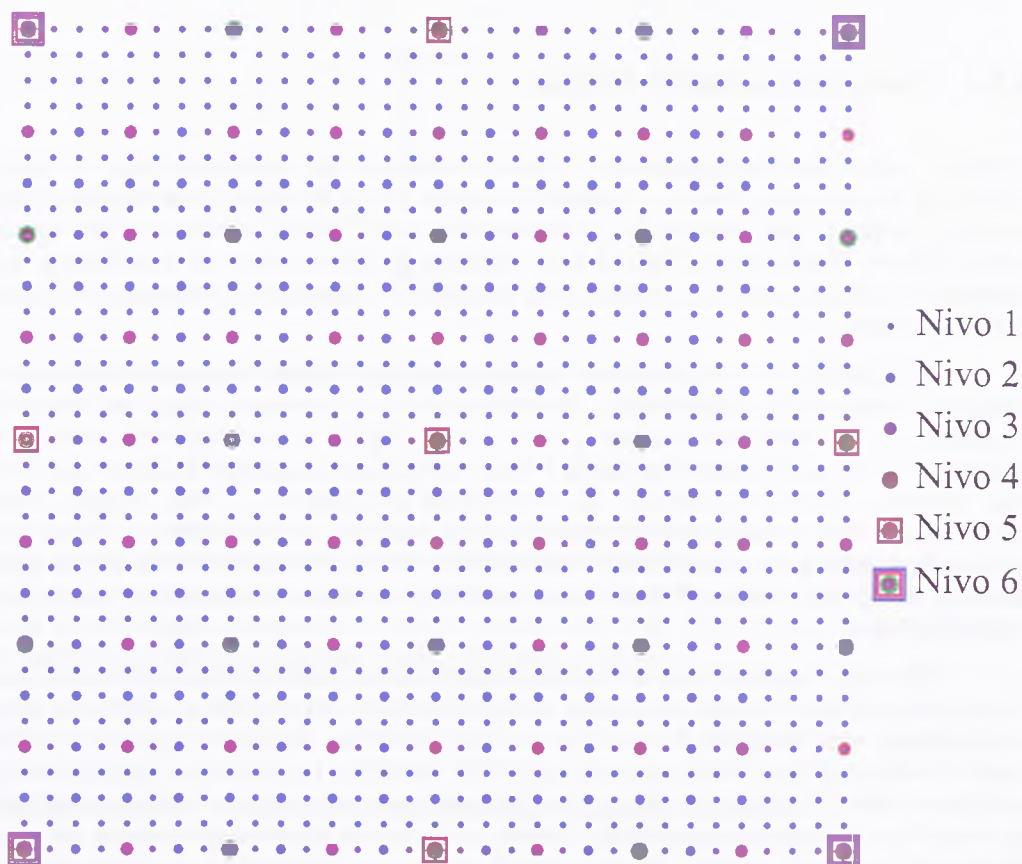
- nepravilne strukture;
- sa strukturom koja odgovara strukturi neograničenog kvadratnog stabla (engl. *Unrestricted Quadtree*) (Slika 3-54, levo);
- sa strukturom koja odgovara strukturi ograničenog kvadratnog stabla (engl. *Restricted Quadtree*) (Slika 3-54, desno).

Da bi se mogla izvršiti redukcija kojom se formira promenljivi grid sa strukturom u vidu kvadratnog stabla neophodno je da je broj elemenata grida po vrstama i kolonama deljiv sa  $2^n$ , pri čemu je  $n > 0$ .

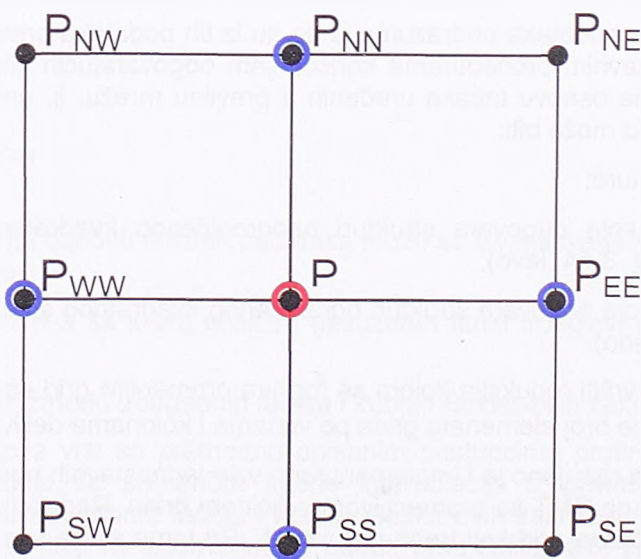
U okviru *Surflng*-a razvijeno je i implementirano više jednostavnih postupaka za prelazak sa DMT-a u vidu uniformnog grida na DMT sa promenljivom veličinom grida. Redukcija podataka vrši se tako što se u memoriju računara učitava grid koji treba redukovati. Pri tome se za svaku tačku grida vodi i indikator da li visina te tačke treba da se koristi za model terena. Već kod učitavanja tačaka u memoriju ovaj indikator se stavlja na 0 za sve tačke grida koje nemaju valjane visine iz bilo kog razloga. Zatim se vrši testiranje značajnosti onih tačaka nivoa 1 (Slika 4-23) koje predstavljaju centralne tačke jednog elementa grida nivoa 2 (Slika 4-24). Za te tačke, temena  $P_{NE}$ ,  $P_{NW}$ ,  $P_{SE}$  i  $P_{SW}$  su tačke koje pripadaju nivoima 2 ili



više. Indikator značajnosti za tačku koja ne ispunjava kriterijum značajnosti postavlja se na vrednost 0. Postupak se na analogan način nastavlja za tačke nivoa 2, zatim za tačke nivoa 3, i tako dalje, sve do maksimalnog nivoa. Ovaj poslednji nivo definiše korisnik zadavanjem maksimalnog rastojanja između tačaka promenljivog grida (Slika 4-26, parametar *Maximum number of grid cells between sampled data*). Ova vrednost je izražena brojem ćelija osnovnog, tj. polaznog grida. Time se u stvari zadaje rastojanje između obaveznih tačaka promenljivog grida (osnovne tačke kod progresivnog samplinga). Za dati primer (Slika 4-23) ova vrednost može biti 2, 4, 8, 16 ili 32. Ako je ta vrednost, na primer 8, onda tačke nivoa 4, 5 i 6 neće biti testirane na značajnost, tj. sve tačke iz ovih nivoa biće zastupljene u konačnom promenljivom gridu.



Slika 4-23 : Redukcija grida – nivoi tačaka kod promenljivog grida sa čvorovima kvadratnog stabla



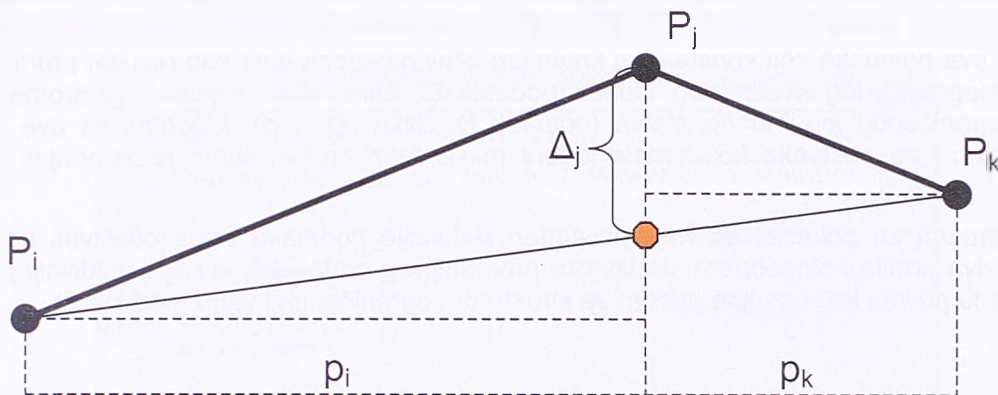
Slika 4-24 : Redukcija podataka - testiranje značaja tačke grida za modeliranje površi terena

Implementirano je nekoliko postupaka sa korišćenjem nekog od sledećih kriterijumima za testiranje značajnosti neke tačke grida za modeliranje površi terena:

- proračun odstupanja tačke za 2 profila:  $P_{WW}P_{EE}$  i profila  $P_{NN}P_{SS}$ ;
- proračun odstupanja tačke za 4 profila:  $P_{WW}P_{EE}$ ,  $P_{NN}P_{SS}$ ,  $P_{NW}P_{SE}$  i  $P_{SW}P_{NE}$ ;
- proračun odstupanja tačke od bilinearne površi koja interpolira tačke  $P_{NW}$ ,  $P_{SW}$ ,  $P_{NE}$  i  $P_{SE}$ .

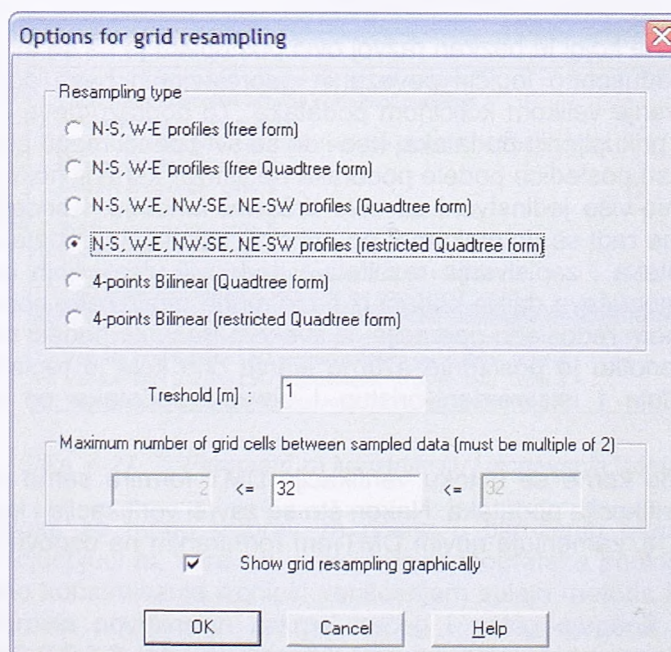
Implementirana su po dva postupka za svaki od ovih kriterijuma. Proračun odstupanja po profilima izvodi se korišćenjem sledećih formula (Slika 4-25):

$$\begin{aligned} \Delta_{ik} &= Z_k - Z_i & \Delta_j &= Z_j - Z_j' \\ Z_j' &= Z_i + \frac{\Delta_{ik}}{p_i + p_k} p_i \\ \Delta_j &= 2 \cdot \left( Z_j - Z_i + \frac{Z_k - Z_i}{p_i + p_k} p_i \right) \end{aligned} \quad (4-7)$$



Slika 4-25 : Proračun odstupanja tačke grida od profila definisanog susednim tačkama

Ako je za bilo koji posmatrani profil apsolutni iznos vrednosti  $\Delta_j$  veći od zadatog kriterijuma (Slika 4-26, parametar *Threshold*), tačka se zadržava u rezultujućem gridu, tj. njen indikator značajnosti ostaje nepromenjen (vrednost 1).



Slika 4-26 : Dijalog sa parametrima za prelazak sa uniformnog na promenljivi grid



Kod proračuna odstupanja tačke za dva profila korišćenjem prvog postupka formira se promenljivi grid nepravilne strukture. Rezultat redukcije sa istim kriterijumom po drugom postupku je promenljivi grid sa strukturom neograničenog kvadratnog stabla. Kod ovog postupka, zbog nepravilne strukture rezultujućeg grida vrednosti  $p_i$  i  $p_k$  mogu biti različite i uzeti vrednosti 1, 2, 3, itd. u zavisnosti od udaljenosti tačke koja se testira od njenog prvog suseda sa indikatorom 1 u pravcu profila. Nakon testiranja svih tačaka jednog nivoa, kod drugog postupka vrši se forsiranje očuvanja strukture kvadratnog stabla. Drugim rečima, indikator značajnosti se postavlja na vrednost 1 za sve tačke čije bi izbacivanje narušilo strukturu kvadratnog stabla.

Kod postupka sa proračunom odstupanja za četiri profila takođe su razvijena dva postupka. Prvi postupak daje kao rezultat promenljivi grid sa strukturom neograničenog kvadratnog stabla (dodatak D, Slika D-1, a), a drugi promenljivi grid sa strukturom ograničenog kvadratnog stabla (dodatak D, Slika D-1, b). Kod drugog postupka koristi se sličan pristup kao i kod postupka sa dva profila i strukturom kvadratnog stabla. Naime, i ovde se nakon testiranja svih tačaka jednog nivoa vrši korekcija u smislu očuvanja strukture promenljivog grida, s tom razlikom što se to ovde radi da bi se isforsirala struktura ograničenog kvadratnog stabla.

Postupak sa kriterijumom zasnovanim na odstupanju testirane tačke od bilinearne površi formirane na osnovu četiri tačke elementa grida koristi formule (3-33) i (3-35), kao i dogovarajuće slike i objašnjenja iz poglavlja 3.2.3. Vrednost indikatora značajnosti postavlja se na nulu samo ako su odstupanja od bilinearne površi za tačke  $P$ ,  $P_{WW}$ ,  $P_{EE}$ ,  $P_{NN}$  i  $P_{SS}$  po apsolutnoj vrednosti manja od zadatog praga. Razvijena su dva postupka koji koriste ovaj kriterijum. Prvi postupak daje kao rezultat promenljivi grid sa strukturom neograničenog kvadratnog stabla (dodatak D, Slika D-1, c), a drugi promenljivi grid sa strukturom ograničenog kvadratnog stabla (dodatak D, Slika D-1, d). Algoritmi za ove postupke su potpuno isti kao i za postupke koji koriste kriterijum sa četiri profila, samo je zamenjen kriterijum za testiranje.

Eksperimenti su pokazali da najveći stepen redukcije podataka treba očekivati kod korišćenja algoritma sa dva profila i slobodnom strukturom promenljivog grida, dok je najrestriktivniji postupak koji koristi bilinearnu površ i koji rezultira gridom sa strukturom ograničenog kvadratnog stabla.

## 4.6 Razvoj i softverska implementacija postupaka za verifikaciju DMT podataka

U ovom poglavlju je opisan razvoj i softverska implementacija postupaka za verifikaciju i obradu prikupljenih DMT podataka. Cilj razvoja je bio da se dobiju alati koji će se moći uspešno koristiti za interaktivnu verifikaciju prikupljanja podataka ne samo kod digitalizacije postojećih podloga, već i za druge metode prikupljanja podataka za formiranje DMT-a.

Osnovna koncepcija na kojoj je baziran razvoj ovih postupaka je da se svi prikupljeni podaci čuvaju u okviru jedne ili više međusobno logički povezanih georelacionih baza podataka. Na taj način se omogućava obrada i rukovanje velikom količinom podataka. To podrazumeva i da nema redundantnosti (ponavljanja i preklapanja) prikupljenih podataka, kao i da se svi podaci mogu procesirati u kontinuitetu, tj. da nema ograničenja koja su posledica podele podataka na listove karte ili neke druge teritorijalne celine, već da su svi podaci manje-više jedinstveni za celu državnu teritoriju. Koncept baze podataka takođe podrazumeva da korisnik ne radi sa datotekama, po principu učitavanja podataka iz jedne ili više ulaznih datoteka, obrade tih podataka i zapisivanja rezultata u jednu ili više ciljnih datoteka. Nasuprot tome, koncept baze podataka omogućava da se podaci iz baze mogu analizirati i obrađivati više puta koristeći različite alate, po proizvoljnom redosledu operacija. U svakom trenutku podaci mogu biti dopunjeni novim merenjima, i u svakom trenutku je poslednje ažurno stanje ono koje je registrovano u bazi podataka. Ovakav pristup obezbeđuje i istovremen pristup i obradu podataka od strane više korisnika u računarskoj mreži.

Usvojen je pristup po kome se u toku verifikacije DMT formira samo po potrebi, dakle za ono područje za koje se vrši verifikacija podataka. Nakon što se završi verifikacija i korigovanje podataka za to područje taj DMT se briše, tj. zamenjuje novim DMT-om formiranim na osnovu izmenjenih ili dopunjenih podataka.

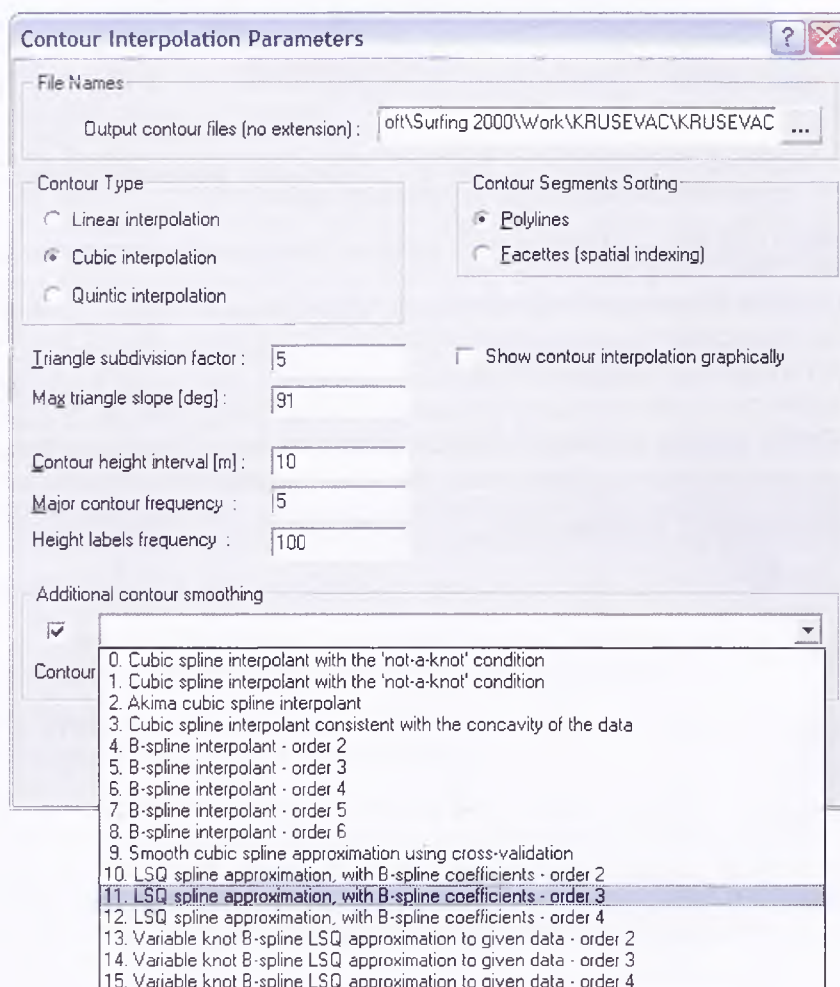
#### 4.6.1 Vizuelna verifikacija

Standardne metode za analizu DMT-a kao što su konstrukcija izohipsi kartografskog kvaliteta i iscrtavanje podužnih i poprečnih profila su podržane u okviru *Surflng*-a već u prvobitnim verzijama. Ove funkcije su konstantno unapređivane tako da u najnovijoj verziji softvera, pored standardnih parametara:

- ekvidistancija izohipsi;
- izbor glavnih izohipsi;
- frekvencija ispisa visina na izohipsama;
- tip interpolacije – linearna ili kubna;

korisnik može da zada i parameter za napredno kartografsko oblikovanje izohipsi:

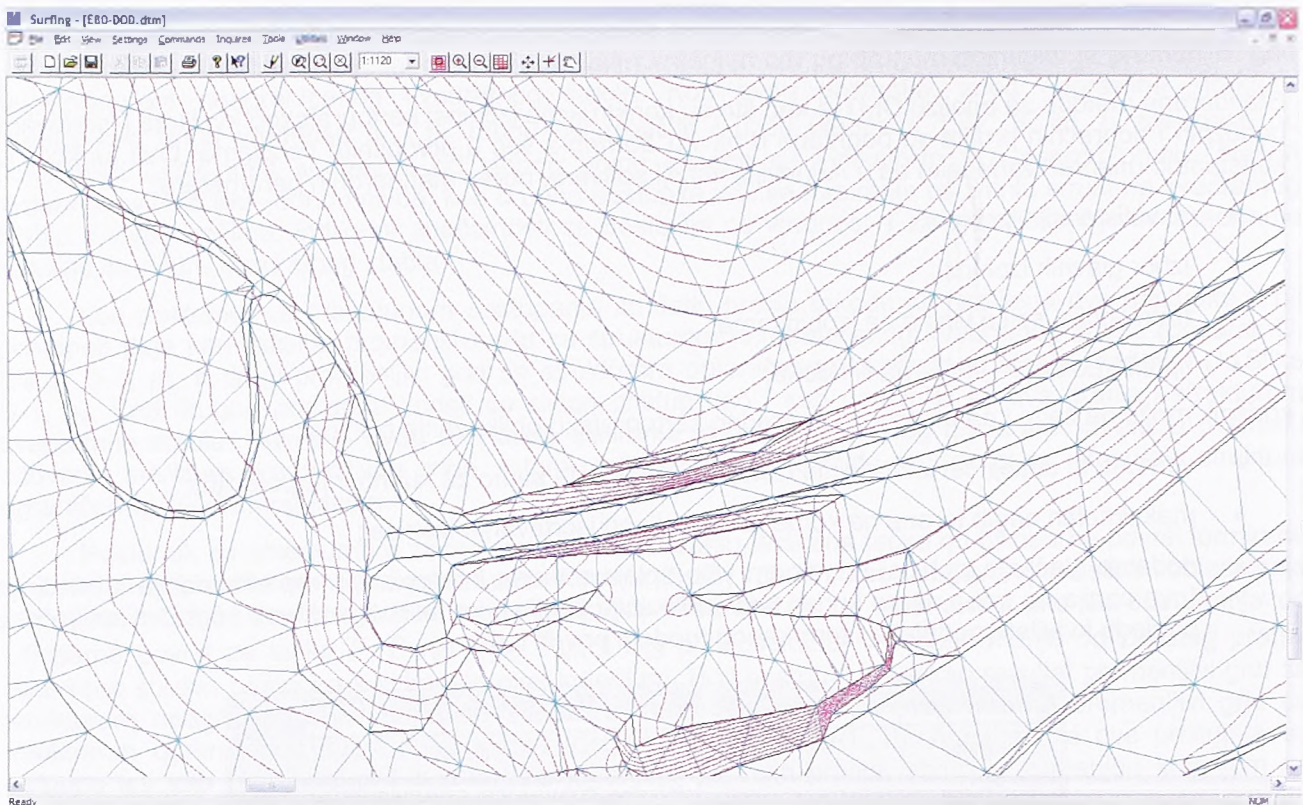
- vernost, tj. detaljnost iscrtavanja izohipsi (ima smisla samo za kubnu interpolaciju);
- maksimalan nagib terena na kome je dozvoljeno iscrtavanje izohipsi;
- dodatno glačanje izohipsi primenom više splajn metoda interpolacije i aproksimacije krivih linija (ova opcija ne treba da se koristi kod verifikacije DMT-a, jer se mogu doneti pogrešni zaključci u pogledu kvaliteta podataka i formiranog modela površi terena).



Slika 4-27 : Parametri za konstrukciju i iscrtavanje izohipsi

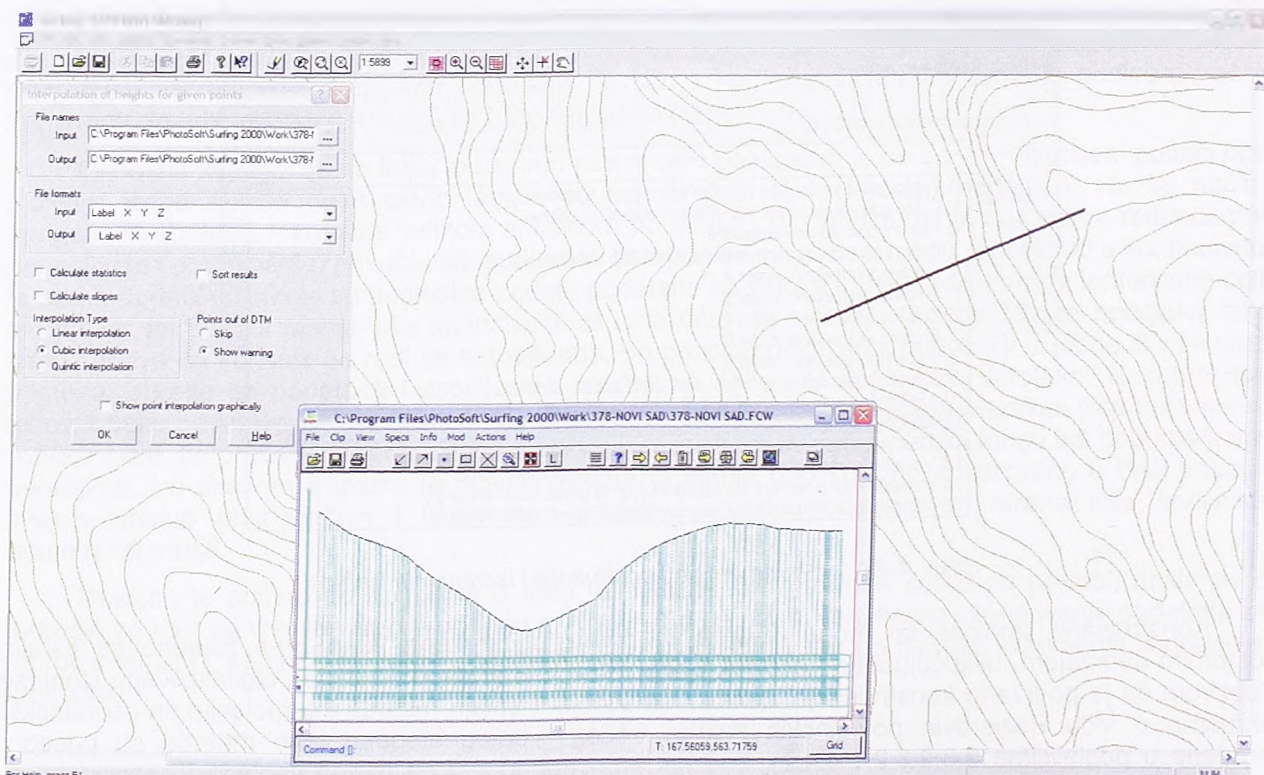
Konstruisane izohipse se mogu izabrati za prikaz u okruženju *MapSoft*-a zajedno sa ostalim prostornim sadržajem, uključujući tu, naravno, i skenirane topografske podloge i digitalizovane izohipse. S obzirom da je podržano konstruisanje izohipsi korišćenjem splajn metoda interpolacije sa površinskim zakrpama u vidu Bézierovih površinskih zakrpa trećeg i petog stepena (ove metode su posebno obrađene u poglavljima 3.3.2.3.2 i 4.4.2), korisnik ima mogućnost da realno sagleda i oceni dobijenu površ terena.





Slika 4-28 : Izohipse konstruisane u Surfing-u korišćenjem diskretizacije svake kubne trougaone zakrpa Bézier-ovog trougla sa 225 podtrouglova

Sa slike se jasno vidi kako prelomne linije terena (crveno) utiču na proračun kubnih trougaoinh zakrpa. Na stranicama svih trouglova TIN-a ostvarena je kontinualnost modelirane površi, ali glatkost interpolovane površi terena (kontinualnost prvih izvoda) nije ostvarena čak ni za stranice trouglova koje ne pripadaju prelomnim linijama. Za postizanje modela kontinualne površi terena sa  $C^1$  ( $G^1$ ) glatkošću treban koristiti opciju modeliranja trougaonim zakrpama petog stepena. Druga varijanta je implementacija algoritma podele trougla na tri manja trougla po Clough-Tocher šemi, kako je to objašnjeno u poglavlju 3.3.2.3.2. Razlike između rezultata dobijenih ovim postupcima nisu značajne za verifikaciju podataka.



Slika 4-29 : Verifikacija DMT-a korišćenjem funkcije za konstruisanje podužnog profila



Slične parametre rada koji se zadaju kod konstruisanja i iscrtavanja izohipsi moguće je zadati i kod iscrtavanja podužnih i poprečnih profila. Ovi profili su posebno interesantni za verifikaciju DMT-a na mestima gde se nalaze vododelnice, vodoslivnice, sedla ili doline, da bi se proverila vernost rekonstrukcije površi terena (Slika 4-29).

#### 4.6.1.1 Implementacija 3D vizuelizacije u okviru *Surflng*-a

Na osnovu prikaza trenutnog statusa istraživanja na polju napredne 3D vizuelizacije može se zaključiti da postoji značajan broj algoritama koje je moguće implementirati. Najveći broj ovih algoritama otpada na algoritme koji podrazumevaju podatke o terenu uređene u pravilnu mrežu tačaka – grid. Ovi algoritmi su pogodni za vizuelizaciju DMT-a, ali nisu pogodni za verifikaciju prikupljenih DMT podataka, jer nije obezbeđena direktna veza, tj. direktna vizuelizacija podatka koji je opterećen greškom. Pored toga, korišćenjem ovog pristupa vrlo je otežan prikaz karakterističnih detalja površi terena, a jedan od ciljeva verifikacije i jeste da se proveri da li su ovi zemljišni oblici pravilno modelirani. Zato ovi algoritmi za ove potrebe nisu posebno razmatrani. Sa aspekta verifikacije DMT podataka mnogo je važniji kvalitet 3D prikaza nego što je to slučaj sa brzinom iscrtavanja prikaza. Performanse u pogledu brzine se uvek mogu popraviti tako što se formira manji model. Ovo je sasvim prihvatljivo, jer je i lokalizacija i korekcija grešaka jednostavnija ako se obavlja po manjim celinama na jedan sistematičan način.

Procenjeno je da su algoritmi koji se baziraju na nepravilnoj mreži trouglova – TIN-u, daleko podesniji za ove namene. Kod ovih metoda se sasvim jednostavno i direktno uspostavlja veza između prikupljenog podatka i prikazanog 3D modela.

S obzirom da je *Surflng* i koncipiran tako da koristi TIN kao osnovnu strukturu podataka, jasno je da je ovaj softver bio logično okruženje za implementaciju 3D vizuelizacije DMT podataka. Softver je razvijen korišćenjem standardnih Windows razvojnih alata, tako da nije bio veći problem da se u okviru njega implementira funkcija 3D vizuelizacije korišćenjem *OpenGL* grafičke biblioteke.

Postojeća struktura podataka i već razvijene funkcije *Surflng*-a omogućile su relativno brz razvoj osnovne funkcionalnosti za 3D vizuelizaciju. Najjednostavniji način vizualizacije podrazumeva direktno iscrtavanje prostornih trouglova TIN-a. Podešavanjem pozicije posmatrača i pozicije izvora svetlosti može se dobiti solidan prikaz formiranog modela terena.

Da bi *Surflng* mogao da se koristi za potrebe vizuelizacije većih modela terena, što je standardna pojava kad je reč o podacima digitalizacije postojećih podloga bilo je neophodno sprovesti modifikacije u cilju optimizacije iscrtavanja prikaza. Naravno, te modifikacije su generalno unapredile upotrebljivost softvera za vizualizaciju DMT-a sa većom količinom podataka, bez obzira na izvor podataka.

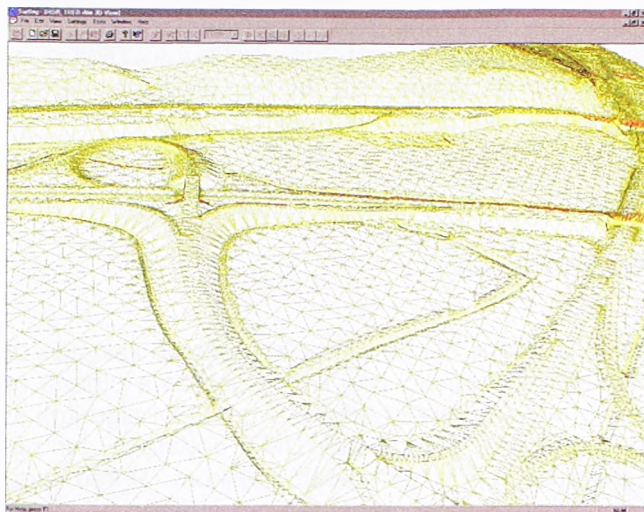
Izvršene su sledeće modifikacije i poboljšanja softvera:

- svi trouglovi TIN-a su indeksirani primenom tehnike oktalnog stabla (engl. *octtree*) čime je omogućeno efikasno pretraživanje i selekcija trouglova za prikaz;
- kod selekcije trouglova za iscrtavanje u 3D prikazu, koristi se tehnika odabira trouglova s obzirom na vidno polje posmatrača (engl. *frustum culling*);
- omogućeno je iscrtavanje grubog 3D modela DMT-a dok korisnik pomera model – trenutno se koristi TIN koji aproksimira teren na osnovu malog broja visina interpolovanih regularno po površi modela; kada se pomeranje završi model se iscrtava korišćenjem originalnog TIN-a; U slučaju kada se koristi opcija prikaza preko trougaonih zakrpa trećeg ili petog stepena (Slika 4-30, prikazi b, e i f), onda se u toku pomeranja iscrtava prikaz sa trougaonim facetama (Slika 4-30, prikazi a, c i d);

Za *frustum* selekciju trouglova koje treba iscrtati koristi se algoritam kod koga se prvo proverava da li lopta opisana oko nekog elementa oktalnog stabla (prvo se naravno proverava element na gornjem nivou - sa većim dimenzijama) seče ili je sadržana u konusu opisanom oko *frustum*a (poglavlje 3.5.1).

Pomenute modifikacije omogućile su komfornu 3D vizuelizaciju DMT-ova sa velikom količinom podataka. Na standardnim računarskim konfiguracijama (Pentium 4 na 2GHz, 128Mb RAM, grafička kartica NVIDIA GeForce4 MX 440, 64Mb RAM), omogućena je 3D vizuelizacija u realnom vremenu za modele do 250000 tačaka i 500000 trouglova, čak i u situacijama kada je potrebno iscrtati sve trouglove DMT-a na ekranu. Kada je prikaz ograničen na manji broj trouglova, onda je moguća vizuelizacija u realnom vremenu i za daleko veće modele.

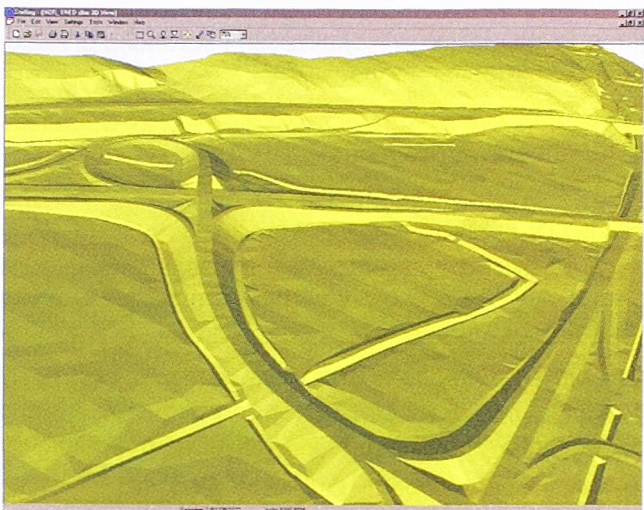




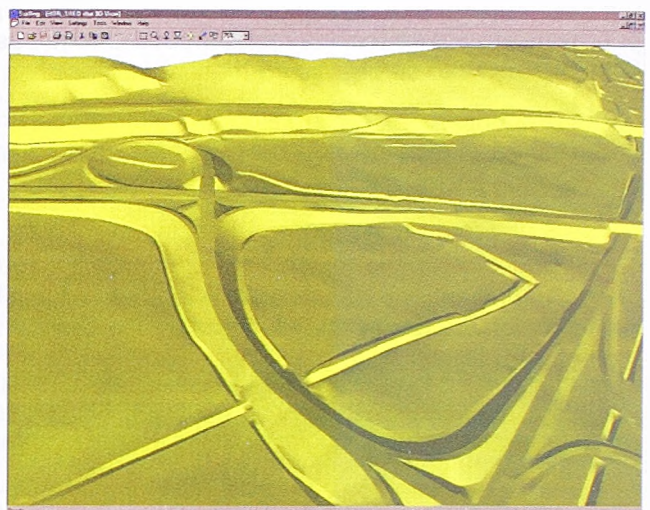
a) *Žičani model*



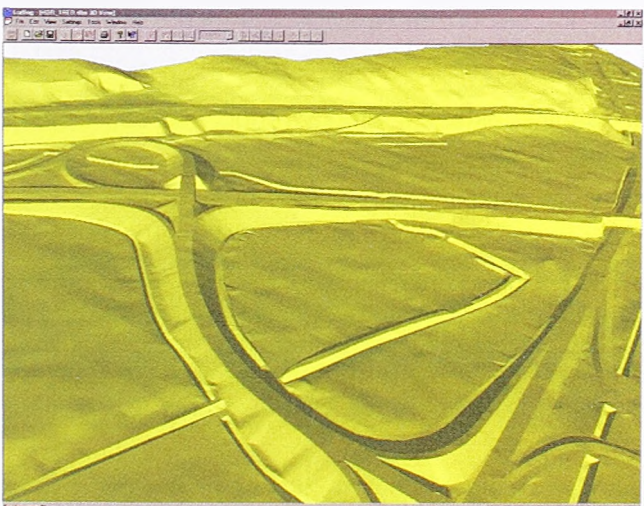
b) *Žičani model sa podelom svakog trougla na 25 podtrouglova*



c) *Senčeni model – trougaone facete (flat senke)*



d) *Senčeni model – trougaone facete, senke sa glatkim prelazom (Gouraud mod senčenja)*



e) *Senčeni model – kubne Bézier-ove zakrpe*



f) *Senčeni model – Bézier-ove zakrpe petog stepena (flat senke)*

Slika 4-30 : Prikaz 3D vizuelizacije u Surfing-u korišćenjem različitih opcija prikaza

Od drugih opcija treba spomenuti da je korisniku ostavljena mogućnost podešavanja pozicije svetla, a podržana je i mogućnost promene odnosa horizontalnih i vertikalnih dužina (karikirana visinska predstava) u cilju boljeg sagledavanja reljefa terena i uočavanja grešaka u podacima.



Za najveći broj primena, a posebno kada je reč o verifikaciji DMT-a, sasvim zadovoljavajući rezultati se postižu korišćenjem prikaza preko trougaonih faceta i senki sa glatkim prelazom (Slika 4-30, prikazi d). Ovde se normale na površ terena u tačkama trougla koji se iscrtava preuzimaju iz baze DMT-a. Kako se sa slike može zaključiti ostvareni prikaz modela vrlo plastično prikazuje površ terena. U nekim slučajevima pogodan je i prikaz preko trougaonih faceta i korišćenjem istih vrednosti normala za sva tri temena trougla, tj. koristi se normala na trougaonu facetu – ravan u kojoj leži trougao (Slika 4-30, prikaz c). Obe pomenute opcije obezbeđuju prikaz visokih performansi. Opcije prikaza kod kojih se koriste Bézier-ove zakrpe trećeg i petog stepena, sa deljenjem svakog trougla TIN-a na specificirani broj podtrouglova, omogućavaju verniju predstavu terena (Slika 4-30, prikazi e i f). Na ovaj način se mogu uočiti male nepravilnosti modela površi terena koje su posledica grešaka u merenjima, rasporeda izmerenih tačaka ili algoritama za modeliranje površi terena preko trougaonih zakrpa. Najčešći slučaj koji se javlja su sitni nabori površi terena prouzrokovani tankim, izduženim trouglovima. Ovi trouglovi se najčešće javljaju između izohipsi, koje su međusobno udaljene, dok su tačke na njima prikupljene sa velikom gustinom (Slika 4-4, a i b). Slični problemi javljaju se i kod prelomnih i strukturnih linija (nabori na kosini nasipa, Slika 4-30, e i f). Ovi problemi mogu se donekle popraviti kroz postupke profinjavanja TIN-a, filtriranje podataka (otklanjanje šumova, tj. slučajnih grešaka merenja) i kvalitetnije algoritme za proračun normala u tačkama TIN-a, ali je mnogo bolje da se to uradi korigovanjem prikupljenih podataka u fazi njihovog prikupljanja i verifikacije.

Posebno je važno za realizaciju verifikacije podataka to što je obezbeđena veza između *Surflng*-a i *MapSoft*-a, tj. veza između 3D modela i baze prikupljenih podataka. Prilikom selekcije trougla iz *Surflng*-ovog 3D prikaza u *MapSoft*-u se vrši automatsko pozicioniranje tog dela terena u radnom prostoru. Na ovaj način olakšana je lokalizacija greške u modelu i njeno korigovanje. Funkcija za direktno korigovanje visine u bazi podataka *MapSoft*-a iz *Surflng*-ovog okruženja može se takođe vrlo jednostavno implementirati. Ovo nije učinjeno iz prostog razloga, jer je procenjeno da korisnik treba u okruženju *MapSoft*-a da utvrdi koja je greška u pitanju i da ponovo izmeri ili koriguje pogrešno merenje.

#### 4.6.2 Analitičke metode verifikacije

Problem vizuelnih metoda verifikacije sastoji se pre svega u tome što su te metode u velikoj meri subjektivne i što u podacima i nakon njihove vizuelne verifikacije mogu ostati neuočene greške. Eksperimenti sprovedeni u okviru ovog istraživanja su pokazali da su analitičke, egzaktno metode verifikacije DMT-a superiorne u odnosu na vizuelne metode, posebno kada je reč o velikim količinama podataka. Zato je razvoju analitičkih metoda verifikacije posvećena posebna pažnja. Razvijene su i softverski podržane sledeće metode analitičke verifikacije:

- upoređenje visina kontrolnih tačaka sa visinama interpolovanim iz formiranog DMT-a;
- identifikacija svih trouglova u kojima su visinske razlike između temena trougla veće od zadatih;
- identifikacija svih trouglova u kojima odstupanje kubnih trougaonih zakrpa od trougaonih faceta prelazi vrednost zadatog praga.

Navedene metode verifikacije su u nastavku detaljnije opisane. Pored njih, moguće je osmisliti i implementirati i druge postupke. Na primer, tokom formiranja TIN-a vrši se kontrola topološke i geometrijske korektnosti ulaznih podataka (tačka na liniji, presek dveju linija, duple tačke, različite visine za dve tačke iste izohipse, i slično). Ovi slučajevi se za sada u *Surflng*-u prijavljuju kao upozorenja.

Sve potencijalno problematične slučajeve treba na odgovarajući način prijaviti korisniku. Ovo se može uraditi grafički, obeležavanjem kritičnih mesta kod 2D ili 3D prikaza TIN-a, ili preko odgovarajućih tekstualnih izveštaja. Oba načina imaju svoje prednosti i mane. Prvi način je pogodan, jer omogućava efikasno sagledavanje svih problematičnih i generalno slabih mesta u DMT-u. Međutim, korišćenjem takvih postupaka neke greške se mogu i prevideti. Kod korekcije grešaka korišćenjem izveštaja previdi se mogu u potpunosti izbeći. Najefikasnija implementacija takvog postupka podrazumeva interaktivni rad. Naime, potrebno je napraviti listu potencijalnih grešaka i omogućiti korisniku da izborom bilo koje greške iz liste, dobije tačnu lokaciju greške u modelu. Nakon ispravljanja podataka koji su prouzrokovali tu grešku, grešku treba izbaciti iz liste. Ovo još nije implementirano u *Surflng*-u, ali svi neophodni elementi i procedure su na raspolaganju samo ih treba sklopiti u jednu celinu. Problem kod rada sa tekstualnim izveštajem može biti to što se često veliki broj prijavljenih grešaka odnosi na samo jednu grešku u prikupljenim podacima (pogrešna visina izohipse, izostavljena izohipsa i slično), pa o tome treba posebno voditi računa i kod implementacije postupka i kod njegovog korišćenja.



#### 4.6.2.1 Kontrolne tačke

Standardan postupak za ocenu kvaliteta DMT-a i otkrivanje grešaka u podacima je upoređenje visina interpolovanih iz tog DMT-a sa visinama datim za određeni broj kontrolnih tačaka. Podrazumeva se da je za ocenu kvaliteta DMT-a neophodno da su visine kontrolnih tačaka određene sa tačnošću koja je viša od očekivane tačnosti DMT-a.

Na osnovu formiranih razlika:

$$\Delta_i = Z_i^T - Z_i^I, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4-8)$$

gde je:

$Z_i^T$  - data visina kontrolne tačke,

$Z_i^I$  - visina na kontrolnoj tački dobijena interpolacijom iz DMT-a,

$n$  - broj kontrolnih tačaka,

mogu se dobiti sledeći statistički pokazatelji:

$$\text{srednje odstupanje} \quad \bar{\Delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i \quad (4-9)$$

$$\text{prosečno odstupanje} \quad \Delta_P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta_i| \quad (4-10)$$

$$\text{srednja kvadratna greška} \quad \text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}{n-1}} \quad (4-11)$$

$$\text{standardna devijacija} \quad \hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_i - \bar{\Delta})^2}{n-1}} \quad (4-12)$$

Pored računanja gornjih pokazatelja veoma korisno je i poznavanje maksimalne i minimalne vrednosti odstupanja.

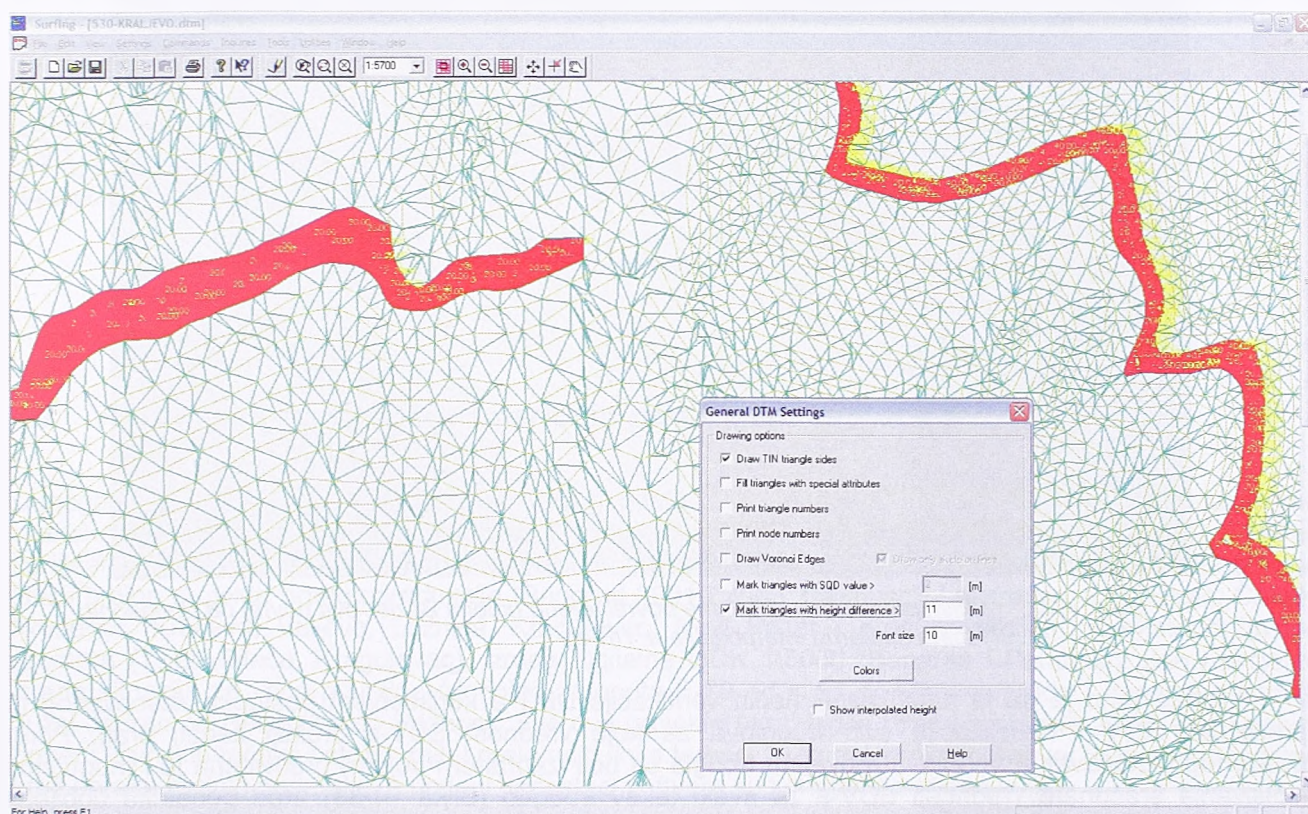
U *Surflng*-u je predviđena funkcija koja omogućava da se svi ovi pokazatelji sračunaju za kontrolne tačke date u ulaznoj datoteci. Podržano je više ulaznih formata. Korisnik može izabrati tip izlaznog izveštaja s obzirom na format izlazne datoteke, kao i to da li izveštaj treba da sadrži i sračunate statističke pokazatelje. Podaci u izlaznoj datoteci mogu biti sortirani prema vrednostima odstupanja. Ovo je posebno važno kod otkrivanja i eliminacije grešaka u podacima. Sve tačke koje padaju van područja kreiranog DMT-a se izostavljaju iz obrade, ili se to posebno signalizira, već po želji korisnika. Prva opcija je korisna u situacijama kada se koristi jedna datoteka sa kontrolnim tačkama za verifikaciju čitavog DMT-a, ali se ta verifikacija pri tome obavlja po delovima. Korisnik može izabrati tip interpolacije (linearna, kubna ili interpolacija polinomom petog stepena), pri čemu je predviđena i mogućnost istovremenog proračuna visina i statističkih pokazatelja korišćenjem i linearmne i kubne interpolacije. Sastavni deo izveštaja je i frekvencija raspodele grešaka po apsolutnim iznosima, kao i statistička analiza grešaka s obzirom na nagib terena. Primeri ovih izveštaja dati su u poglavljima C.5 i E.2.1. Podržan je i grafički prikaz odstupanja.

Ovde treba istaći da je kompletna verifikacija i ocena kvaliteta DMT-ova formiranih u okviru ovog istraživanja urađena korišćenjem gore opisane funkcije *Surflng*-a, tako da je i to svojevrsna verifikacija razvijene funkcionalnosti softvera.



#### 4.6.2.2 Visinske razlike u trouglovima

Za potrebe verifikacije podataka prikupljenih digitalizacijom postojećih podloga može biti interesantna i korisna funkcija pronalaženja svih trouglova TIN-a kod kojih su visinske razlike između temena veće od zadatog limita. Za digitalizovane izohipse vrednost ovog limita obično iznosi nešto više od osnovne ekvidistancije plana ili karte. Jedan od načina pronalaženja ovih trouglova je da se prolaskom kroz spisak trouglova TIN-a izdvoje u poseban izveštaj svi trouglovi sa visinskim razlikama preko zadatog limita. Na osnovu indeksa (identifikatora) trougla iz ovog izveštaja može se naći trougao u bazi podataka i utvrditi i ispraviti greška u podacima. Drugi način je da se obezbedi vizuelizacija TIN-a sa posebnim prikazom ovakvih trouglova (Slika 4-31). Samo je ovaj drugi metod implementiran u *Surfling*-u. Na ovaj način mogu se vrlo efikasno otkriti mesta gde su izostavljene jedna ili više izohipse (Slika 4-31, levo) ili mesta gde su izohipsama dodeljene pogrešne visine (Slika 4-31, desno). U oba slučaja greške koje su identifikovane za više trouglova koji se međusobno nastavljaju u kontinuitetu ispravljaju se ubacivanjem jedne ili više izohipse, ili izmenama njihovih atributa. U najvećem broju slučajeva potrebno je samo promeniti visinu jedne izohipse. Za efikasno i jednostavno ispravljanje identifikovanih grešaka obezbeđena je komunikacija između *Surfling*-a i *MapSoft*-a. Ona se ogleda u tome što se nakon selekcije problematičnog trougla u *Surfling*-u automatski vrši pozicioniranje tog dela terena u centralni deo radnog prozora *MapSoft*-a.



Slika 4-31 : Funkcija za vizuelizaciju trouglova kod kojih je visinska razlika između temena veća od zadatog praga

#### 4.6.2.3 Odstupanja između linearne i kubne interpolacije

Jedan od načina da se lociraju mesta u DMT-u gde podaci nisu prikupljeni sa odgovarajućom tačnošću ili mesta gde nema dovoljno podataka da se površ terena pouzdano rekonstruiše je upoređenje dva modela površi dobijenih različitim metodama rekonstrukcije. Ideja se zasniva na pretpostavci da vernost rekonstruisane površi terena treba da bude u najvećoj meri uslovljena samo prikupljenim podacima. Korišćenje različitih metoda interpolacije ne bi smelo značajnije da utiče na dobijene rezultate.

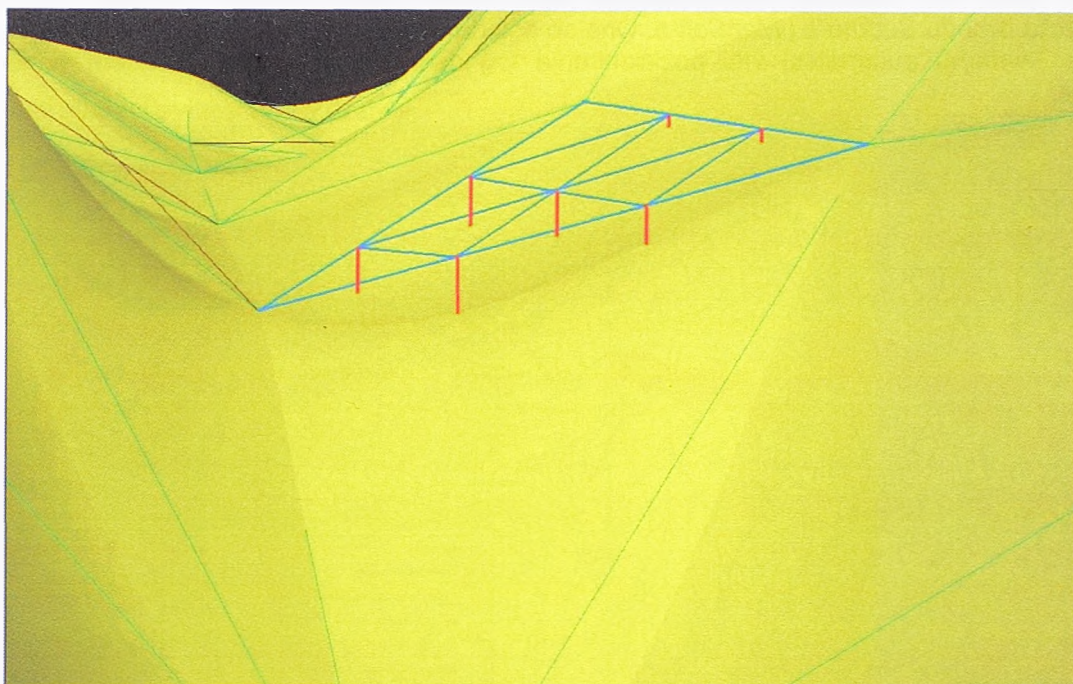
U okviru ovog istraživanja ta ideja je iskorišćena tako što je razvijena funkcija za proračun odstupanja između površi terena predstavljene poliedarski, trougaonim facetama (prostornim trouglovima) TIN-a i površi predstavljene kubnim Bézier-ovim trougaonim zakrpama ili Bézier-ovim



trougaoim zakrpama petog stepena. Veličina ovog odstupanja, koja se naziva vrednost devijacije površi – SDV (engl. *Surface Deviation Value*) može da se iskoristi da bi se ocenio kvalitet predstavljanja površi terena na osnovu prikupljenih podataka.

Sličan postupak može se naći u literaturi (Aumann 1992). U pomenutom radu je predložen znatno jednostavniji postupak. Srednja vrednost SDV-a za neko posmatrano područje zove se vrednost za ocenu kvaliteta – QEV (engl. *Quality Estimation Value*). Kod proračuna ove srednje vrednosti površine trouglova se koriste kao težine. Vrednost količnika maksimalnog SDV-a za sve trouglove oko jedne tačke i QEV vrednosti može biti jedan od indikatora da na tom mestu podaci nisu korektni. On predstavlja jedan od pouzdanijih načina za otkrivanje grubih grešaka u podacima. Sve tačke za koje ova vrednost prelazi zadati prag na odgovarajući način se označavaju.

S obzirom da je u *Surflng*-u implementirano više metoda za rekonstrukciju površi terena, uključujući tu i predstavljanje terena Bézier-ovim trougaoim zakrpama, nema potrebe za gore opisanim pojednostavljenjima. U *Surflng*-u se vrednost SDV-a za neki trougao dobija proračunom odstupanja Bézier-ove trougaone zakrpe od trougaone facete u svim Bézier-ovim kontrolnim tačkama (Slika 4-32).

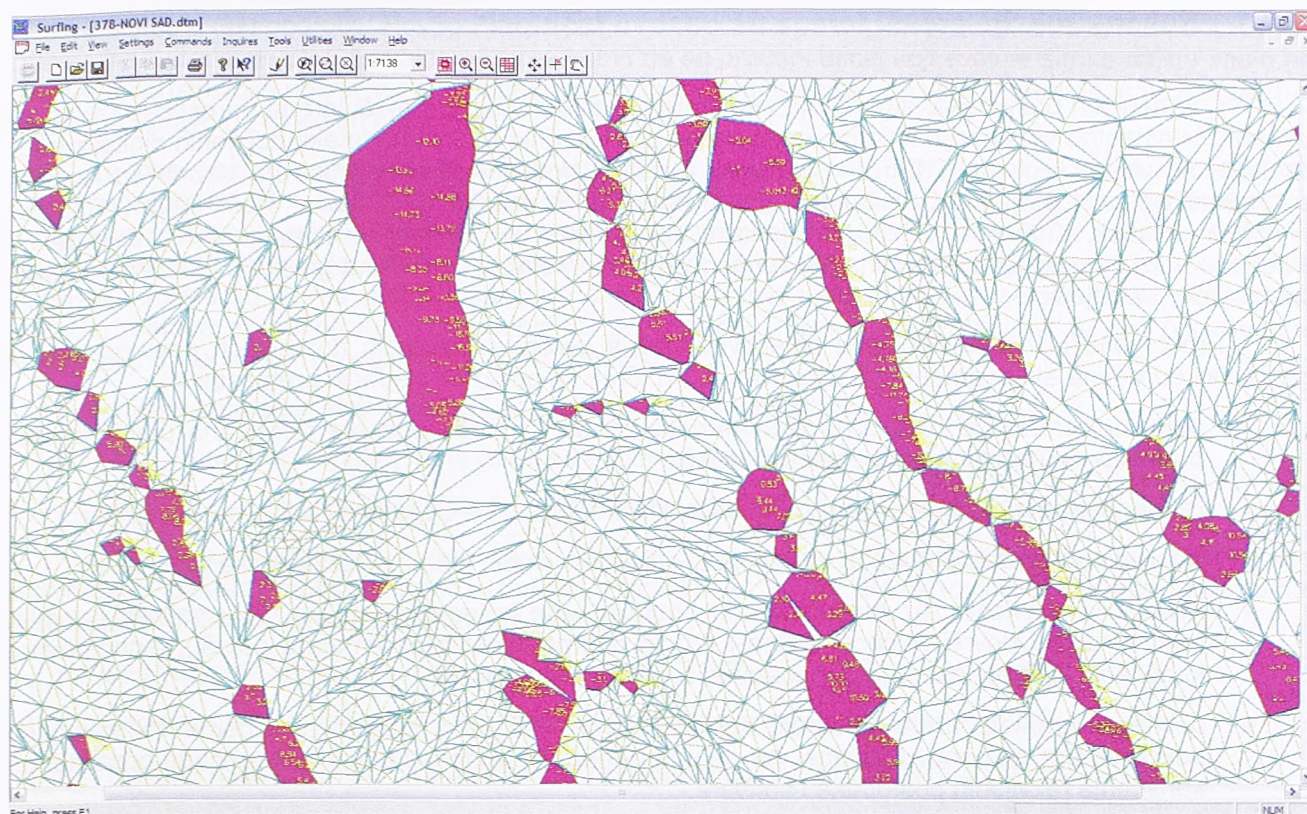


Slika 4-32: Odstupanje rekonstruisane površi terena (kubna Bézier-ova površ) od trougaonih faceta (linearna interpolacija iz TIN-a)

Procenjeno je da je najefikasniji način verifikacije DMT-a korišćenjem postupka zasnovanog na proračunu SDV-a vizuelizacija svih trouglova za koje vrednost SDV-a prelazi zadati prag. Pored posebnog označavanja trouglova (površina trougla se boji izabranom bojom) predviđena je i mogućnost ispisivanja sračunate vrednosti SDV-a za svaki takav trougao (Slika 4-33). Kod podataka dobijenih digitalizacijom postojećih podloga ovakvi trouglovi se vrlo često podudaraju sa horizontalnim trouglovima. Ovo je sasvim razumljivo, jer na tim mestima površ terena koja je predstavljena Bézier-ovim trougaoim zakrpama dosta bolje aproksimira realnu površ terena, dok je predstava terena trougaonim facetama na tim mestima potpuno pogrešna. Ovo je ujedno i potvrda da na tim delovima terena nedostaju prikupljeni podaci u formi strukturnih linija terena (vododelnice i vodoslivnice). Slična situacija se dešava i sa podacima prikupljenim po selektivnom samplingu. U svim tim slučajevima softver može pomoći operateru da uoči mesta na kojima nedostaju strukturne i prelomne linije terena.

Ova funkcija je posebno korisna za otkrivanje mesta u modelu gde korišćenje splajn površi (kubne Bézier-ove trougaone zakrpe ili Bézier-ove trougaone zakrpe petog stepena) može rezultirati modelom terena sa izuzetno velikim oscilacijama. U ovom radu je na više mesta napomenuto da je ta pojava naročito izražena kod prelaska iz strmih padina u široke zaravnjene doline. Kod rekonstrukcije površi terena na osnovu izohipsi dobijenih digitalizacijom vojnotopografske karte 1:25000 te oscilacije, tj. odstupanja rekonstruisane od realne površi terena, mogu iznositi i više desetina metara. Svakako da je ovo vrlo opasno i nedopustivo, posebno ako se ima u vidu da se tu radi o ravničarskom terenu gde korisnik s pravom očekuje i najveću tačnost modela u visinskom smislu.





Slika 4-33 : Funkcija za vizuelizaciju trouglova kod kojih kubna površ i površ trougaone facete odstupaju više od zadanog praga

## 4.7 Verifikacija razvijenih numeričkih postupaka i softvera

Dugogodišnje korišćenje razvijenih numeričkih postupaka i softvera u realnim, proizvodnim uslovima svakako predstavlja njihovu najobjektivniju i najopširniju verifikaciju. Brojni projekti na kojima su uspešno korišćeni i *MapSoft* i *Surfling* svedoče o kvalitetu tih softverskih alata (poglavlje 4.2.2). Tu posebno treba istaći brojne projekte ortofotoprodukcije (Beograd 2001 i 2003, Lajkovac i Lazarevac, Požarevac, Čačak, Kruševac, Kraljevo, Valjevo, Loznica, Kragujevac, Novi Pazar i drugi), nekoliko projekata državnog premera (Tivat, Bileća, Kragujevac), izrada digitalne ODK 1:5000 (Beograd i Pančevo), kao i projekte izrade situacija za veće površine (deonica autoputa E-80 od Niša do Dimitrovgrada i deonica autoputa Južni Jadran od Beograda do Požege). Sve ove projekte karakteriše izrada preciznog DMT-a sa velikim brojem visinskih tačaka i strukturnih i prelomnih linija terena. Kroz ove projekte softver je temeljno testiran kroz obradu realnih podataka, a uočeni nedostaci softvera su konstantno otklanjani.

S obzirom na ovako temeljnu verifikaciju numeričkih postupaka i razvijenog softvera, u okviru ovog istraživanja verifikacija je ograničena na one postupke koji se odnose na formiranje DMT-a na osnovu podataka digitalizacije postojećih podloga, tj. na osnovu izohipsi. Posebna pažnja je posvećena problemu detekcije i ekstrakcije strukturnih linija terena i vernosti rekonstruisane površi terena. Pored toga, analizirane su i mogućnosti softvera za formiranje DMT-ova na osnovu velike količine podataka (nekoliko miliona visinskih tačaka) i osetljivost, odnosno robustnost softvera s obzirom na različite konfiguracije ulaznih podataka.

Verifikacija je sprovedena kroz primenu softvera nad realnim podacima i kroz pažljivo osmišljene i realizovane eksperimente. Da bi se što bolje procenile mogućnosti razvijenih postupaka i softvera za formiranje nacionalnog DMT-a, eksperimenti su realizovani sa korišćenjem realnih podataka koji će praktično i biti predmet buduće obrade. Korišćeni su podaci prikupljeni u okviru gore pomenutih projekata ortofotoprodukcije i podaci dobijeni digitalizacijom vojnotopografske karte 1:25000 (TK25).



#### 4.7.1 Rekonstrukcija površi terena na osnovu izohipsi

Razvoj numeričkih postupaka, algoritama i softvera za rekonstrukciju površi terena na osnovu izohipsi je vršen uz konstantnu verifikaciju koja se sastojala od procesiranja realnih podataka dobijenih digitalizacijom izohipsi sa visinske oleate TK25. Pri tome su korišteni podaci koji se odnose na terene sa različitim karakteristikama i stepenom složenosti (Fruška Gora, Strezimirovci, Valjevo, Novi Pazar, Beograd, Pančevo, Čačak, Kruševac, ...). Na ovaj način obezbeđena je primenljivost razvijenih rešenja za sve tipove terena. Istovremeno, razvijana je i verifikovana otpornost tih rešenja na greške u ulaznim podacima i specijalne slučajeve.

Procenjeno je da za dobijanje objektivne ocene kvaliteta razvijenih numeričkih postupaka treba sprovesti određena eksperimentalna istraživanja. Pri tome se pošlo od sledećih pretpostavki:

- polazna osnova za realizaciju eksperimenta treba da bude poznata referentna površ terena i podaci u vidu izohipsi koji se odnose na nju;
- referentna površ terena po svojim karakteristikama treba da odgovara realnoj površi terena;
- referentna površ terena treba da omogući otkrivanje slabih mesta u razvijenim algoritmima;
- evaluacija dobijenih rezultata treba da obuhvati više kriterijuma, od kojih su najvažniji kvalitet rekonstrukcije površi (tačnost visina i drugih geomorfoloških parametara površi), jednostavnost korišćenja i efikasnost obrade podataka, tj. brzina procesiranja;
- dobijene rezultate treba uporediti sa rezultatima dobijenim drugim metodama rekonstrukcije površi terena na osnovu izohipsi, jer se samo tako može doneti pouzdana procena opravdanosti korišćenja razvijenih postupaka i softvera.

Polazeći od ovih pretpostavki osmišljen je eksperiment koji se sastoji od sledećih faza:

- koristeći podatke koji dobro reprezentuju realnu površ terena i koji su prikupljeni po principu selektivnog samplinga treba formirati DMT koji će predstavljati referentnu površ terena;
- na osnovu formiranog DMT-a treba konstruisati izohipse na ekvidistanciji koja odgovara ekvidistanciji izohipsi na postojećim podlogama (ekvidistanciji od 10m za TK25); tačke ovih izohipsi moraju biti apsolutno tačne, tj. moraju ležati na referentnoj površi;
- konstruisane izohipse korigovati tako da u smislu gustine tačaka odgovaraju podacima koji se dobijaju kod digitalizacije postojećih podloga (poluautomatskim i automatskim metodama), vodeći računa da se pri tome bitnije ne promeni geometrija izohipsi;
- korigovane izohipse koristiti kao ulazne podatke za rekonstrukciju površi terena primenom različitih postupaka interpolacije i formiranja DMT-a;
- za određeni broj pogodno izabranih tačaka treba interpolovati visine iz referentnog DMT-a (referentne visine) i uporediti ih sa rekonstruisanim visinama, tj. visinama interpolovanim iz DMT-ova formiranih različitim metodama interpolacije, uključujući tu i postupke razvijene u okviru ovog istraživanja;
- statističkom analizom odstupanja između referentnih i rekonstruisanih visina doneti ocenu kvaliteta rekonstrukcije površi terena korišćenjem pojedinih postupaka.

Za realizaciju prve dve faze korišćeni su podaci dobijeni digitalnom stereorestitucijom i prikupljanjem podataka po metodi selektivnog samplinga. Na taj način obezbeđeno je da referentna površ po svome karakteru, tj. geomorfološkim svojstvima odgovara površi terena kakvu treba očekivati kod formiranja nacionalnog DMT-a. Za formiranje referentnog DMT-a korišćen je *Surflng* i modeliranje površi kubnim Bézierovim trougaonim zakrpama. Naravno, moglo bi se opravdano postaviti pitanje da li metode koje za modeliranje površi terena koriste kubne splajn površi mogu biti u blagoj prednosti zbog ovakvog načina modeliranja referentne površi. Međutim, procenjeno je da ovo ne bi trebalo značajno da utiče na konačan sud o kvalitetu pojedinih metoda. Osnova za ovu pretpostavku je činjenica da su ulazni podaci prikupljeni sa dovoljnom gustinom tako da izbor metode za interpolaciju (modeliranje) referentne površi ne bi trebao da ima veći uticaj na dobijeni model površ.

Izabrana su dva test područja: Novi Pazar (B.2.1, dodatak B) i Valjevo (B.3.1, dodatak B). Oba terena karakteriše umerena složenost geomorfoloških formi terena. Takav tip terena je i dominantan kada se posmatra celokupna državna teritorija. Naravno, u Vojvodini treba očekivati mnogo jednostavniji, a u Crnoj Gori mnogo složeniji teren. Osnovna i praktično jedina bitna razlika između ova dva test područja je

u tome što se u test području Novog Pazara javlja velika dolina sa naglim prelaskom u strme padine brda (Slika B-14, dodatak B). Cilj ovakvog izbora je bio da se proceni uticaj koji ovakve široke doline imaju na kvalitet rekonstrukcije površi, jer su preliminarni eksperimenti pokazali da većina metoda interpolacije ima problema upravo na ovakvim mestima.

Za oba područja formiran je referentni DMT a zatim su u Surflng-u konstruisane izohipse sa ekvidistancijom od 10m. Dobijene izohipse su naknadno korigovane u CAD okruženju koristeći manuelne procedure. Nakon korekcije izohipsi formirane su datoteke sa ulaznim podacima za rekonstrukciju referentnih površi terena. Izohipse su predstavljene polinijama. Za one postupke koji nisu bili u stanju da iskoriste informaciju da se radi o podacima u formi izohipsi (geostatističke metode, IDW, varijacione metode, metoda prirodnog suseda) podaci su pripremljeni u formi rasutih tačaka, tj. nije obezbeđena informacija o topološkom povezivanju tačaka izohipsi.

Osnovni softverski alati korišćeni za realizaciju eksperimenta su:

- *ArcGIS* softverski paket firme *ESRI* sa ekstenzijama *3D Analyst* i *Geostatistical Analyst*;
- *Surflng* sa numeričkim postupcima i algoritmima razvijenim u okviru ovog istraživanja.

*ArcGIS* je izabran pre svega zbog velikog broja metoda interpolacije koje su u okviru tog softverskog paketa implementirane. Izuzevši modeliranje terena Bézier-ovim trougaonim zakrpama, podržane su praktično sve važnije metode interpolacije,:

- sve varijante kriginga, tj. kolokacije (poglavlje, 3.2.2);
- varijacione metode (splajn sa tenzijom i regularizovani splajn, poglavlje 3.2.4);
- metoda težina obrnuto proporcionalnih rastojanjima – IDW (poglavlje 3.2.1);
- metoda prirodnog suseda (3.4.2.1.1);
- linearna interpolacija trougaonim facetama TIN-a;
- metod konačnih razlika sa uslovom odvodnjavanja (ANUDEM algoritam, poglavlje 3.4.1.3);
- interpolacija primenom globalnih i lokalnih polinoma (metode pokretnih površi, poglavlje 3.2.1);
- interpolacija korišćenjem radijalnih baznih funkcija, tj. RBF metode (poglavlje 3.2.4, kompletno regularizovani splajn, splajn tankim pločama, splajn sa tenzijom, multikvadratna i inverzna multikvadratna funkcija - poglavlje 3.2.5).

Poseban kvalitet implementacije ovih metoda u *ArcGIS*-u je što je za najveći deo metoda predviđeno podešavanje velikog broja parametara obrade, a obezbeđena je i pomoć korisniku kod izbora optimalnih vrednosti za ove parametre (Slika 5-4). Podržane su i metode krosvalidacije i validacije.

Podaci za oba test područja obrađeni su korišćenjem praktično svih raspoloživih metoda interpolacije *ArcGIS* softvera. Izuzetak su metode interpolacije sa korišćenjem globalnih i lokalnih polinoma. Korišćenje globalnih polinoma za interpolaciju kod modeliranja površi terena je praktično neprihvatljivo, pa one i nisu razmatrane u okviru ovog istraživanja. Lokalni polinomi nisu uključeni u eksperiment, jer se oni po svojim karakteristikama i kvalitetu nalaze negde između IDW metode i kriginga. Imajući u vidu da su preliminarni rezultati pokazali neprikladnost obe ove metode za rekonstrukciju površi terena na osnovu izohipsi, dalja eksperimentalna istraživanja nisu usmerena u ovom pravcu.

Obrada se sastojala iz formiranja modela površi primenom izabranih metoda interpolacije, odnosno u proračunu visina za zadate (kontrolne) tačke. Za neke od ovih metoda vršeno je variranje pojedinih parametara interpolacije. Posebno detaljno su analizirane varijacione metode (splajn sa tenzijom i regularizovani splajn). Direktna interpolacija visina u zadatim tačkama je bila moguća samo za metode sa radijalnim baznim funkcijama (kompletno regularizovani splajn, splajn sa tenzijom, multikvadratna funkcija) i kriging. Za ostale metode postupak je podrazumevao formiranje (interpolaciju) grid DEM-a, pa zatim interpolaciju visina u kontrolnim tačkama iz ovog DEM-a. Da bi se izbegao neželjeni uticaj nedovoljne gustine tačaka pravilne mreže, tj. prevelikog koraka grida, formiran je DEM sa rastojanjem između tačaka od 10m. Da bi se proverilo da li je ovo dovoljno mali korak grida metodom prirodnog suseda je za test područje Valjevo formiran i grid sa korakom 5m. Nisu uočene značajne razlike u odnosu na grid od 10m, tako da je definitivno izabran grid od 10m.

Visine dobijene interpolacijom iz formiranih modela (ili direktnom predikcijom za kriging i RBF metode) upoređivane su sa referentnim visinama (visinama u kontrolnim tačkama) i to:

- originalnim visinama koje su korišćene za formiranje referentne površi (izmerene visine tačaka i strukturnih linija terena);



- visinama u pravilnoj mreži tačaka koje su interpolovane na osnovu referentne površi (25m grid za Novi Pazar i 50m grid za Valjevo).

S obzirom da se polazne visine mogu smatrati apsolutno tačnim, razlika između referentnih i rekonstruisanih visina predstavlja stvarnu grešku rekonstrukcije površi terena. Za svaku od metoda dati su statistički pokazatelji dobijeni iz upoređenja visina i to:

- minimalna greška;
- maksimalna greška;
- srednja greška (iako se u tabelama koristi termin prosečna) - formula (4-9);
- standardna devijacija - formula (4-12);
- srednja kvadratna greška - formula (4-11).

Dobijeni rezultati prikazani su u odgovarajućim tabelama:

- Novi Pazar (Tabela B-2, dodatak B);
- Valjevo (Tabela B-13, dodatak B).

U tabelama su posebno obeležene sledeće vrednosti srednjih kvadratnih grešaka i devijacija:

- minimalne tj. prihvatljive vrednosti (zeleno i plavo)
- srednje vrednosti (žuto);
- neprihvatljive vrednosti (narandžasto i crveno).

Da bi se obezbedila objektivna i pouzdana ocena rezultata dobijenih pojedinim metodama interpolacije u radu je, pored tabelarnog, dat i grafički prikaz rasporeda i iznosa odstupanja (poglavlje B.4, dodatak B). Greške su prikazane korišćenjem različitih boja (Tabela B-11) i promene veličine simbola u zavisnosti od apsolutnog iznosa greške. Na osnovu svih dobijenih rezultata mogu se izvesti sledeći zaključci o rezultatima korišćenja pojedinih metoda interpolacije:

- za oba test područja najbolji rezultati, za svaku kategoriju kontrolnih visina (rasute tačke, tačke strukturnih linija i tačke pravilne mreže), postignuti su korišćenjem RBF metode interpolacije sa multikvadratnom funkcijom – MQ metod (Slika B-38 i Slika B-44); ova metoda se pokazala kao vrlo pouzdana; njen jedini nedostatak se ogleda u nešto slabijem modeliranju površi terena u području gde nema dovoljno raspoloživih podataka (široke doline bez izohipsi), ali tamo ni ostale metode nisu dale bolje rezultate; malo neočekivan je bio kvalitet rekonstrukcije površi terena ovom metodom čak i na mestima gde se javljaju strukturne linije terena; na tim mestima rezultati skoro da uopšte ne zaostaju za rezultatima dobijenim metodom konačnih razlika sa uslovom odvodnjavanja (Topo To Raster funkcija, ANUDEM algoritam) koja je razvijena specijalno za formiranje DMT-a na osnovu izohipsi; metod je vrlo brz i ne zahteva podešavanje većeg broja parametara i iskustvo korisnika;
- optimizacija parametara kod modula *Geostatistical Analyst* (IDW, globalni i lokalni polinomi, RBF metode, kriging) traje često duže nego sama interpolacija visina; u najvećem broju slučajeva dobijaju se optimalne vrednosti, mada ima i izuzetaka (empirijski izabrani parametri za splajn sa tenzijom – rekonstrukcija T01N50, Valjevo, Slika B-46, dali su bolje rezultate nego parametri dobijeni optimizacijom); u svakom slučaju, ova funkcionalnost je više nego korisna;
- iznenađenje predstavljaju rezultati dobijeni korišćenjem Topo To Raster algoritma po metodi konačnih razlika sa uslovom odvodnjavanja, koji je jedini interpolator ArcGIS-a specijalno razvijen za rekonstrukciju površi terena na osnovu ulaznih podataka u formi izohipsi; za oba test područja primetne su grube greške (Slika B-37 i Slika B-43); za područje Novog pazara ove greške su iznosile i preko 240m (Tabela B-2), tako da je kod grafičkog prikaza odstupanja veličina simbola morala biti ograničena (Slika B-37); samo za test područje Novog Pazara rekonstrukcija površi terena na mestima gde se javljaju vododelnice i vodoslivnice superiornija je u odnosu na ostale metode; metod je inače vrlo brz i efikasan i ne zahteva podešavanje većeg broja parametara i iskustvo korisnika;
- korišćenjem kriginga, i pored značajnog vremena potrebnog za procesiranje i uz komplikovano zadavanje velikog broja parametara obrade, nisu dobijeni zadovoljavajući rezultati (Slika B-36 i Slika B-42); korišćenjem običnog kriginga za test područje Valjeva dobijeni su rezultati koji su mnogo lošiji od svih ostalih metoda; interesantno je da su korišćenjem univerzalnog kriginga za

test područje Valjevo dobijeni vrlo dobri rezultati za veći deo područja, čak i na mestima gde se javljaju vododelnice i vodoslivnice, ali su oni neprihvatljivi za deo gde se javlja nešto šira rečna dolina (Slika B-42); ovo ukazuje na to da postoji mogućnost dobijanja znatno boljih rezultata ovim metodama uz bolje podešavanje parametara procesiranja; međutim, očigledno je da bi ovo zahtevalo dosta veliko iskustvo korisnika i da bi se parametri morali posebno podešavati za različite tipove terena, što značajno usložnjava primenu ove metode;

- vreme procesiranja kod varijacionih metoda interpolacije (splajn sa tenzijom, regularizovani i kompletno regularizovani splajn) veoma zavisi od broja tačaka unutar jednog prozora i može biti dosta duže od ostalih metoda; veliki problem kod ovih metoda je što su one izuzetno osetljive na vrednosti parametara procesiranja, što može dovesti do vrlo velikih ondulacija i odstupanja rekonstruisane od stvarne površi terena; iako se sa dobrim podešavanjem ulaznih parametara mogu dobiti vrlo dobri rezultati (T01N50, test područje Valjeva, Slika B-46), ova metoda se pokazala kao veoma rizična, posebno ako korisnik softvera nema odgovarajuće iskustvo;
- interpolacija po metodi prirodnog suseda je vrlo efikasna i ne zahteva zadavanje dodatnih parametara obrade; međutim, dobri rezultati dobijeni su samo za test područje Novi Pazar (Slika B-34); generalno, rekonstrukcija površi terena na mestima gde se javljaju vododelnice i vodoslivnice je loša;
- IDW metoda je praktično neupotrebljiva za ove namene; eventualno bi se dodatno moglo ispitati da li se sa finijim podešavanjem izbora referentnih tačaka (izbor broja i rasporeda tačaka za interpolaciju po sektorima, poglavlje 3.2.1) mogu postići nešto prihvatljiviji rezultati;
- korišćenje linearne interpolacije sa trouganim facetama TIN-a je, kao što se i očekivalo, neprihvatljivo za ovu vrstu ulaznih podataka, jer se na mestima gde se javljaju strukturne linije javljaju relativno velika odstupanja rekonstruisane od stvarne površi terena;
- kod procesiranja nekim metodama pojavljuju se greške rekonstrukcije koje nisu posledica očiglednih grešaka u ulaznim podacima, već neravnomernog rasporeda visina; primer su dve bliske izohipse u ravnom terenu; ovakve greške se javljaju kod interpolatora kao što su Topo To Raster (ANUDEM) algoritam i varijacione metode sa splajn funkcijama.

Treba istaći da autor nema značajnije iskustvo u korištenju pomenutih softverskih alata, tako da to ostavlja mesta eventualnim rezervama u pogledu mogućnosti i dometa pojedinih metoda interpolacije. Međutim, dobijeni rezultati su dosta indikativni i neki od zaključaka teško da mogu biti dovedeni u pitanje, čak i kada bi softver koristio neko sa mnogo većim iskustvom. Korišćenje metode konačnih elemenata sa uslovima za odvodnjavanje (ANUDEM, Topo To Raster algoritam) je rezultiralo većim greškama rekonstruisane površi terena i to definitivno nije posledica poznavanja korišćenja softvera, jer nema parametara procesiranja kojima bi se to moglo popraviti. Istovremeno, RBF metoda sa korišćenjem multikvadratne funkcije se pokazala kao najefikasnija, relativno jednostavna za korišćenje i, što je posebno značajno, vrlo pouzdana.

Isti podaci su obrađeni korišćenjem numeričkih postupaka i softvera razvijenih u okviru ovog istraživanja. Korišćen je isti princip obrade kao i kod korišćenja ArcGIS interpolatora. Da bi se proverila mogućnost podizanja kvaliteta rekonstrukcije površi terena tako što bi se osnovni skup ulaznih podataka proširio dodatnim informacijama, za test područje Novi Pazar obrađeni su i sledeći slučajevi:

- podacima su dodate izabrane izohipse na polovini osnovne ekvidistancije, tj. na 5m;
- izohipse koje razdavaju strme padine od doline eksplicitno su definisane kao specijalne prelomne linije terena;
- podaci su dati u vidu izohipsi na ekvidistanciji od 5m;
- podacima su dodate manuelno digitalizovane prelomne terena koje razdavaju strme padine od doline – korišćena je 2D digitalizacija sa linearnom interpolacijom visina tačaka linija iz prethodno formiranog TIN DMT-a;
- podacima su dodate originalne strukturne i prelomne linije terena prikupljene digitalnom 3D fotogrametrijskom stereorestitucijom (isti podaci iz originalnog skupa podataka koji su korišćeni za formiranje referentne površi).

Obrađeni su slučajevi kada su ulazni podaci sastavljeni od osnovnog skupa podataka i različitih kombinacija gore navedenih informacija. Rezultati obrade prikazani su tabelarno i grafički, slično kao i za ArcGIS interpolatore. Tabelarni prikaz rezultata obrade test područja Novi Pazar dat je u poglavlju B.2.3,



a grafički u poglavljima B.2.4 i B.2.5 (dodatak B). Tabelarni prikaz rezultata obrade test područja Valjevo dat je u poglavlju B.3.3, a grafički u poglavljima B.3.4 i B.3.5 (dodatak B).

Tabelarni prikaz rezultata obrade sadrži iste statističke podatke kao i tabele sa rezultatima obrade korišćenjem *ArcGIS* interpolatora. Dodatno su još date i vrednosti parametara korišćenih za svaku od primenjenih metoda interpolacije, kao i podaci o prosečnom nagibu terena i broju kontrolnih tačaka. Objašnjenja vezana za korišćene oznake parametara procesiranja data su na početku poglavlja B.1. U tabelama su posebno obeležene:

- minimalne vrednosti srednjih kvadratnih grešaka dobijenih iz odstupanja (zeleno);
- ekstremno velike vrednosti srednjih kvadratnih grešaka dobijenih iz odstupanja (crveno);
- preporučeni parametri procesiranja za dati skup ulaznih podataka (svetlo zeleno).

Kod grafičkog prikaza odstupanja rekonstruisane površi terena, greške su prikazane korišćenjem različitih boja (Tabela B-11) i promene veličine simbola u zavisnosti od apsolutnog iznosa greške. Ovde se neće detaljno ulaziti u analizu dobijenih rezultata, jer su podaci iz priloženih tabela i grafički prikazi odstupanja rekonstruisane površi dovoljno informativni i bez posebnog objašnjavanja. Daju se samo generalni zaključci u pogledu karakteristika razvijenih numeričkih postupaka i efekata korišćenja različitih podataka digitalizacije postojećih podloga za formiranje DMT-a:

- kao što se moglo i očekivati, a što je potvrđeno i kod *ArcGIS*-a, korišćenje TIN DMT-a i linearne interpolacije preko trougaonih faceta ne daje dobre rezultate, jer se na mestima gde se javljaju uzvišenja, duž vododelnica i vodoslavnica dobija veliki broj horizontalnih trouglova, čime se značajno kvari kvalitet rekonstrukcije površi na tim lokacijama (Slika B-18 i Slika B-30); u ostalim delovima rekonstrukcija površi terena je generalno zadovoljavajuća;
- automatska detekcija i ugradnja strukturalnih linija u TIN DMT nije neophodna u većini slučajeva, jer se korišćenjem razvijenih numeričkih postupaka za proračun normala u tačkama TIN-a, sa posebnim respektovanjem izohipsi, u najvećem broju slučajeva uspešno rekonstruiše površ terena i na onim mestima gde se javljaju lokalni ekstremumi i strukturalne linije; podrazumeva se da je pri tome obavezno korišćenje kubne interpolacije; štaviše, korišćenje ovakvog postupka, uz forsiranje zaravnjenosti u delovima gde se javljaju široke doline koje prelaze u strme padine (RTSDV opcija), daje i nešto bolje rezultate od postupaka sa detekcijom i ugradnjom strukturalnih linija terena; objašnjenje je u tome što se trenutno kod algoritama za detekciju i ugradnju strukturalnih linija koriste srednje ose izohipsi bez korekcije za nejednake nagibe terena sa leve i desne strane strukturalne linije (izuzetak je algoritam EM kod koga je ovo uzeto u obzir); ako se pogledaju grafički rezultati sa odstupanjima (Slika B-19, Slika B-23 i Slika B-31), kao i tabelarni rezultati (Tabela B-3 i Tabela B-15) dobijenim bez korišćenja funkcija za detekciju i ugradnju strukturalnih linija, samo vodeći računa o modeliranju terena u širokim dolinama bez visina, i uz standardno modeliranje kubnim Bézierovim trougaonim zakrpama, može se zaključiti da se dobija ubedljivo najbolja rekonstrukcija površi terena; najveći značaj za ovakve rezultate ima kvalitet numeričkih postupaka za ocenu normala u tačkama izohipsi (poglavlje 4.4.1.4);
- praktično svi postupci za automatsku detekciju i ekstrakciju strukturalnih linija na osnovu izohipsi (ME, EM, GC, CC, VS) daju približno slične i podjednako dobre rezultate u pogledu geometrije detektovanih strukturalnih linija terena i generalne visinske tačnosti DMT-a; ipak preporučuje se korišćenje algoritma VS, jer on rezultira nešto boljom geometrijom linija, a ima i neke druge pogodnosti;
- posebna pažnja je neophodna kod formiranja DMT-a u područjima gde se javlja nagli prelazak iz strme padine u zaravnjenu dolinu; kao i kod splajn metoda, samo sa znatno manjim iznosima, i kod razvijenih postupaka mogu se javiti izuzetno velike greške rekonstrukcije površi (Slika B-17); na ovim mestima je neophodno ili dodavanje novih informacija (rasute tačke, izohipse na pola i četvrtini ekvidistancije), ili korišćenje opcije za forsiranje zaravnjenosti, tj. za korigovanje odstupanja Bézierovih zakrpa od trougaonih faceta (RTSDV parametar, Slika B-19);
- rezultati ukazuju na to da eksplicitno zadavanje linija koje razdvajaju široku dolinu od strmih padina brda nije racionalno, jer ne doprinosi bitno kvalitetu rekonstrukcije površi terena, a slični efekti se postižu korišćenjem opcije za forsiranje zaravnjenosti, tj. za korigovanje odstupanja Bézierovih zakrpa od trougaonih faceta ubacivanjem novih tačaka u TIN na ovim mestima (*MaxSDV* parametar, uporediti rezultate: Slika B-19 i Slika B-22, Tabela B-3 i Tabela B-8); slična konstatacija važi i za 2D digitalizaciju linija koje razdvajaju dolinu od brda (Tabela B-7); za eliminaciju pomenutih problema najkorisnija se pokazala opcija dodavanja izohipsi na polovini ekvidistancije (Slika B-20, Tabela B-4) čime su greške smanjene za oko 30%; čak i u tom slučaju

neophodno je korišćenje algoritma za forsiranje zaravnjenosti, jer su u suprotnom rezultati i dalje opterećeni velikim odstupanjima (Tabela B-5, crveno obeležene vrednosti);

- očekivana greška rekonstrukcije površi terena na osnovu izohipsi sa osnovnom ekvidistancijom od 10m i dodatnih izohipsi na polovini ekvidistancije u ravnim područjima, iznosi od 0.7 do 1.0m (Tabela B-4 i Tabela B-16); navedene vrednosti mogu se postići za umereno složen teren sa nagibima do 45%; podrazumeva se korišćenje razvijenih numeričkih postupaka i softvera, sa naprednim funkcijama za redukciju grešaka rekonstrukcije na kritičnim područjima;
- dodavanje originalnih, izmerenih strukturnih linija terena izohipsama na 10m smanjuje greške za oko 30% i umanjuje potrebu za forsiranjem zaravnjenosti terena (Tabela B-6);
- formiranje DMT-a sa otkrivanjem strukturnih linija terena po metodi Voronoi skeleta (VS) i forsiranjem zaravnjenosti terena u područjima bez izohipsi (široke doline, *RTSDV* parametar) dobija se DMT čija je tačnost neznatno niža od najviše tačnosti postignute korišćenjem drugih parametara; zato je očigledno korišćenje ove metode i najbolja opcija, jer se njome dobija kvalitetan DMT, dobijaju se strukturne linije terena za dalju obradu DMT-a (eventualna generalizacija) i otklanjanju se opasnosti pojave neželjenih velikih ondulacija terena; ovde se podrazumeva i korišćenje opcije za linearnu interpolaciju visina tačaka strukturnih linija na mestima gde je SDV vrednost veća od zadatog praga (parametar *MaxSDV*);
- efikasnost razvijenih numeričkih postupaka, tj. brzina procesiranja podataka je uglavnom slična ili bolja u odnosu na standardne metode interpolacije;
- izbor optimalnih parametara interpolacije je prilično jednostavan i može se svesti na poštovanje nekoliko jednostavnih pravila;
  - koristiti algoritam za detekciju strukturnih linija po metodi Voronoi skeleta (VS), sem ako strukturne linije nisu potrebne za dalji rad;
  - dodatno deljenje segmenata izohipsi je neophodno samo kod obrade algoritmima VS i CC; vrednost parametra *MCS* za maksimalnu dužinu segmenta izohipse izabrati tako da približno odgovara ekvidistanciji;
  - opciju za forsiranje zaravnjenosti koristiti obavezno na svim mestima gde se javljaju veća rastojanja između izohipsi; najsigurnije je da se ova opcija uvek koristi; vrednost parametara *RTSDV* izabrati tako da odgovara polovini vrednosti ekvidistancije ili manje, a u zavisnosti od toga na kolikom intervalu su date izohipse u ravnici;
  - opciju za određivanje visina tačaka strukturnih linija korišćenjem linearne umesto kubne interpolacije na mestima gde je SDV vrednost veća od zadatog praga koristiti u kombinaciji sa opcijom za forsiranje zaravnjenosti; vrednost parametra *MaxSDV* izabrati tako da bude približno jednaka ekvidistanciji;
  - preporučuje se korišćenje opcije za korigovanje visina tačaka detektovanih strukturnih linija primenom linearne interpolacije od preseka sa izohipsama (parametar *LIH*);
  - opciju tretiranja detektovanih strukturnih linija kao prelomnih linija terena (parameter *LB*) koristiti u zavisnosti od terena; ovo u najvećem broju slučajeva nije neophodno, jer je površ terena na tim mestima sasvim dobro definisana izohipsama;
  - opciju za glačanje detektovanih strukturnih linija koristiti da bi se redukovao broj tačaka ovih linija (parametar *SPLINE*); ovo je naročito važno kod korišćenja algoritama VS i CC; koristiti opciju za glačanje broj 11 (B-splajn aproksimacija trećeg stepena sa određivanjem koeficijenata po metodi najmanjih kvadrata).

U sledećoj tabeli dati su najbolji rezultati ostvareni metodama interpolacije implementiranim u *ArcGIS* softveru i rezultati ostvareni postupcima razvijenim u okviru ovog istraživanja. Prikazane su vrednosti koje se odnose na test područja Novi Pazar (prvih 6 vrsta) i Valjevo (poslednje 4 vrste). Očigledno je da su razvijeni postupci (uz obavezno forsiranje zaravnjenosti u dolinama) superiorniji u odnosu na standardne interpolatore, uključujući tu i Topo To Raster (ANUDEM) algoritam. Ovo je posebno interesantno ako se ima u vidu da se razvijeni postupci mogu dodatno poboljšati lokalnom analizom podataka.



Metod interpolacije	Visinske tačke					Strukturne linije					Grid				
	Max	Min	Prosečna	STDEV	RMSE	Max	Min	Prosečna	STDEV	RMSE	Max	Min	Prosečna	STDEV	RMSE
NN	8.62	-8.46	-0.47	2.02	2.08	10.52	-12.99	-0.87	2.90	3.03	9.23	-8.35	-0.54	1.90	1.97
TopoToRaster*	14.47	-15.94	0.40	2.01	2.05	11.54	-12.01	-0.16	2.97	2.97	11.91	-11.63	0.37	1.92	1.96
RBF-MQ	8.62	-8.53	-0.47	1.94	2.00	9.12	-12.99	-0.80	2.80	2.91	8.74	-8.82	-0.52	1.85	1.92
RBF-ST	8.62	-7.92	-0.48	2.12	2.17	12.99	-31.02	-0.89	3.05	3.17	9.48	-8.11	-0.54	1.97	2.05
Surfling DL-NO, RTSDV	7.97	-8.95	-0.21	1.66	1.62	8.58	-11.20	-0.46	2.47	2.40	7.57	-8.86	-0.24	1.59	1.54
Surfling DL-VS, RTSDV	9.16	-8.83	-0.36	1.72	1.59	9.05	-12.38	-0.55	2.60	2.48	7.43	-8.81	-0.04	1.65	1.50
RBF-MQ2						7.71	-9.71	-0.60	2.17	2.25	6.66	-8.19	-0.04	0.69	0.69
Surfling DL-NO, RTSDV						7.00	-8.80	-0.56	2.08	1.98	9.12	-7.78	0.00	0.67	0.67
Surfling DL-VS, RTSDV						6.77	-8.93	-0.70	2.19	2.06	9.12	-7.78	0.00	0.67	0.67
Surfling DL-ME						6.79	-8.84	-0.48	1.99	1.92	6.04	-5.07	0.01	0.66	0.66

Tabela 4-1 : Upoređenje rezultata rekonstrukcije površi terena primenom ArcGIS i Surfling interpolatora

U gore opisanim eksperimentima nije vršena analiza tačnosti rekonstrukcije ostalih geomorfoloških parametara površi terena (normale, nagibi, krivine). Procenjeno je da bi to u ovom trenutku dodatno proširilo ionako obimne eksperimente sprovedene u okviru ovog istraživanja. Za temeljnu i objektivnu ocenu metoda formiranja DMT-a ovo bi svakako trebalo razmotriti u naknadnim istraživanjima.

Rezultati ukazuju na neophodnost filtriranja podataka (ocena normala, korekcija visina) kod modeliranja terena Bézier-ovim trougaonim zakrpama i potrebu daljeg usavršavanja algoritama za povezivanje detektovanih strukturnih linija terena (Slika B-7 do Slika B-13, Slika B-49 do Slika B-53).

#### 4.7.2 Robustnost i efikasnost softvera za rad sa velikim količinama podataka

Korišćenje razvijenih numeričkih postupaka i softvera za obradu velike količine podataka prikupljenih digitalizacijom postojećih podloga (ODK i TK25 karte) i fotogrametrijskom stereorestitucijom omogućilo je donošenje sledećih zaključaka:

- razvijeni postupci za formiranje TIN DMT-a su efikasni i mogu se koristiti za formiranje modela od desetak miliona tačaka; generalno uzevši, razvijeni postupci su efikasni samo ukoliko se kompletno procesiranje može izvesti sa smeštanjem DMT-a u RAM memoriju računara; da bi se to obezbedilo za ovako velike modele neophodno je imati 1-1.5Gb RAM memorije; vreme procesiranja za ovako velike setove podataka na Pentium 4 računarima (2-3GHz) iznosi 5-10 minuta u zavisnosti od izabranih parametara obrade i procesorske snage; na ovaj način može se bez većih problema formirati DMT za područje koje pokriva jedna vojnotopografska karta razmere 1:100000 (16 TK25 karata) čak i za najsloženije tipove terena (Slika B-54, Tabela C-2);
- neke procedure za formiranje TIN DMT-a opterećuju procesiranje značajno; posebno se to odnosi na procedure za korekciju oscilacija rekonstruisane površi, tj. eliminaciju neslaganja između Bézierovih zakrpa višeg reda i trougaonih faceta (RTSDV opcija); približan odnos vremena potrebnih za standardno formiranje TIN DMT-a na osnovu izohipsi, za formiranje DMT-a sa detekcijom i ugradnjom strukturnih linija (algoritam VS ili CC) i za formiranje DMT-a sa detekcijom i ugradnjom strukturnih linija (algoritam VS ili CC) uz korigovanje oscilacija površi je 1:5:10; ovaj odnos treba uzeti sa velikom rezervom, jer on dosta zavisi od vrste terena (strukture podataka), količine ulaznih podataka i drugih parametara obrade; algoritam za detekciju i ekstrakciju strukturnih linija korišćenjem Voronoi skeleta i kore (VS algoritam) je značajno sporiji u odnosu na sve ostale algoritme (ME, EM, GC), jer podrazumeva deljenje segmeneta izohipsi na manje segmente (povećava se broj tačaka TIN-a); za ostale algoritme gornji odnos vremena iznosi 1:3:8; objašnjenje za ovako velike razlike je što se mnoge operacije nepotrebno ponavljaju u celosti, a efikasnost obrade kod nekih implementiranih funkcija drastično opada sa povećanjem količine ulaznih podataka; algoritmi za profinjenje TIN-a, uključujući i korigovanje oscilacija površi posebno su neefikasni; većina ovih funkcija se može dodatno optimizirati i značajno ubrzati;
- uočeni su problemi za neke konfiguracije ulaznih podataka, kada algoritam ne može uspešno da formira TIN; ovi problemi se javljaju vrlo retko i uglavnom su vezani za greške u podacima (linije koje se skoro poklapaju su tipičan primer) i posledica su grešaka u zaokruživanju kod proračuna;

ovi problemi mogu se jednostavno otkloniti implementacijom algoritama za adaptivnu preciznu aritmetiku (poglavlje 3.3.1.1, *Shewchuk 1996, Shewchuk 1997*).

## 4.8 Zaključna razmatranja

Razvijeni su numerički postupci i algoritmi koji obezbeđuju vrlo kvalitetno modeliranje površi terena korišćenjem DMT podataka prikupljenim različitim tehnikama. Postupci se zasnivaju na korišćenju TIN strukture podataka i Bézierovih trougaonih zakrpa. Posebna pažnja je posvećena postupcima za rekonstrukciju površi terena na osnovu izohipsi. Da bi se obezbedila morfološki korektna rekonstrukcija površi terena, razvoj je fokusiran na postupke za ocenu normala u tačkama izohipsi i postupke za automatsku ekstrakciju strukturnih linija terena na osnovu izohipsi i njihovu ugradnju u TIN DMT. Kombinacijom ovih postupaka obezbeđeno je korektno modeliranje terena ne mestima gde se javljaju horizontalni trouglovi TIN-a. Na ovaj način eliminisani su osnovni nedostaci TIN DMT-a za modeliranje površi terena na osnovu izohipsi. Utvrđeno je da detekcija i ugradnja strukturnih linija u TIN DMT u većini slučajeva nije neophodna, jer se korišćenjem posebnih postupaka za proračun normala u tačkama izohipsi površ terena uspešno rekonstruiše i na onim mestima gde se javljaju strukturne linije terena i lokalni ekstremumi. Podrazumeva se da je pri tome obavezno modeliranje površi terena korišćenjem Bézierovih trougaonih zakrpa višeg reda. Upotreba kubnih zakrpa se pokazala kao vrlo dobro rešenje.

Sprovedeni eksperimenti su pokazali da su ostvareni vrlo zadovoljavajući rezultati. Kvalitet geometrije detektovanih strukturnih linija terena je visok, a rekonstruisana površ u skladu sa očekivanjima i zahtevima. Postoji još prostora za dalje usavršavanje razvijenih algoritama. To se posebno odnosi na problem boljeg povezivanja strukturnih linija i dodatno filtriranje podataka da bi se dobila glatka površ terena bez neželjenih oscilacija.

Izvršeni su obimni eksperimenti sa ciljem upoređenja rezultata rekonstrukcije površi terena na osnovu izohipsi korišćenjem metoda interpolacije implementiranih u standardnim GIS softverima (*ArcGIS*) i postupcima razvijenim u okviru ovog istraživanja. Analiza rezultata je pokazala da su razvijeni postupci bolji, ili bar konkurentni drugim testiranim metodama interpolacije. Uočen je problem rekonstrukcije površi terena na mestima gde se javljaju široke doline oivičene strmim padinama. Ukoliko se na ovim mestima ne obezbedi dovoljno visina ili drugih informacija o površi terena, javljaju se značajna odstupanja rekonstruisane od stvarne površi terena. Ovaj problem je izražen kod svih testiranih metoda interpolacije. Za prevazilaženje ovog problema korišćenjem razvijenih postupaka primenjen je poseban pristup. On se u osnovi sastoji u tome da se na svim mestima gde Bézierove trougaone zakrpe odstupaju od trougaonih faceta TIN-a više od specificiranog iznosa za modeliranje površi terena koriste trougaone facete. Time se modeliranje površi terena korišćenjem TIN-a pokazalo kao vrlo efikasna metoda, jer omogućava lokalnu analizu i rešavanje potencijalnih problema.

Korišćenje opisanih postupaka baziranih na TIN-u omogućilo je jednostavnu realizaciju funkcija za podršku verifikaciji i otklanjanju grešaka u prikupljenim podacima. Ove funkcije su implementirane tako što se za posmatrano područje formira TIN DMT, a zatim se vrši odgovarajuća analiza tog DMT-a. Ove analize uključuju standardne funkcije za isctavanje izohipsi i profila, naprednu 3D vizuelizaciju i interpolaciju visina u zadatim tačkama. Razvijene su i dve posebne funkcije za otkrivanje grešaka i nedostataka u podacima koji se uglavnom sastoje od izohipsi. Prva omogućava vizualizaciju svih trouglova kod kojih su visinske razlike između temena veće od specificiranog praga. Na ovaj način efikasno se otkrivaju greške u dodeljivanju visina izohipsama, kao i mesta gde nedostaju izohipse. Druga funkcija omogućava vizuelizaciju svih trouglova gde Bézier-ove trougaone zakrpe odstupaju od trougaonih faceta za iznos veći od zadatog praga. Na ovaj način efikasno se otkrivaju mesta gde nema dovoljno visinskih informacija i gde se mogu javiti velike oscilacije modelirane površi terena, tj. velike greške rekonstrukcije površi.

Svi razvijeni numerički postupci implementirani su u okviru zaokruženog softverskog rešenja *Surfling*. Softver je primenljiv u realnim, proizvodnim uslovima i omogućava efikasnu obradu velike količine prikupljenih podataka. Bez ikakvih problema mogu se formirati modeli terena sastavljeni od više stotina hiljada, pa i nekoliko miliona visinskih tačaka. Povezivanjem razvijenih softverskih alata i softvera *MapSoft* omogućena je obrada praktično neograničene količine prostornih podataka.





## 5 RAZVOJ METODOLOGIJE FORMIRANJA NACIONALNOG DMT-A

Izrada nacionalnog DMT-a podrazumeva angažovanje značajnih resursa. Da bi se to angažovanje svelo na optimalnu meru i da bi se dobili rezultati koji će zadovoljiti zahteve potencijalnih korisnika, neophodno je pre započinjanja ovog kapitalnog posla dati odgovore na pitanja koja se tiču sledećih momenata:

- izbor osnovne metode za prikupljanje podataka, kao i dopunskih metoda, ako se proceni da je to celishodno;
- nivo detaljnosti i struktura DMT-a koji će odgovarati postavljenim zahtevima;
- detaljna razrada svih faza u tehnološkom lancu prikupljanja i obrade podataka, formiranja DMT-a, kao i izbor odgovarajućih algoritama, softverskih alata, hardvera i sl. ;
- vreme i resursi potrebni za realizaciju.

Da bi se odgovorilo na prethodna pitanja i samim tim došlo do optimalne metodologije izrade nacionalnog DMT-a, potrebno je detaljno poznavanje okvirnih uslova koji se odnose na:

- zahteve u pogledu kvaliteta ciljnog DMT-a;
- raspoloživost i kvalitet postojećih izvora podataka;
- primenljivost savremenih metoda prikupljanja podataka, tj. postojeći tehničko-tehnološki potencijali (instrumenti, kadrovi, institucije, ...);
- prednosti i nedostatke metoda, tehnika i algoritama za prikupljanje podataka i formiranje DMT-a u konkretnim uslovima;
- finansijske mogućnosti tj. nivo planiranih investicija za realizaciju projekta;
- vreme koje je na raspolaganju za realizaciju projekta, i dr.

Samo uz realnu procenu konkretnih uslova i mogućnosti koji se odnose na sve pobrojane faktore može se doneti ispravna odluka u pogledu formiranja optimalne metodologije.

Kada je reč o zahtevima u pogledu kvaliteta ciljnog DMT-a oni svakako moraju početi od korisničkih zahteva, ali se moraju respektovati i svi okvirni uslovi koji su gore navedeni, a posebno: raspoloživost i kvalitet postojećih podataka, primenljivost i ograničenja savremenih metoda prikupljanja podataka, finansijske mogućnosti i vreme. Ovde svakako, kao jedan od važnijih korisničkih zahteva kada su u pitanju podaci koji odgovaraju topografskim podlogama srednjih razmera, treba pomenuti urgentan problem izrade i održavanja vojnotopografskih karata razmera 1:25000 do 1:100000. Rešavanje ovog problema na jedan racionalan način, bilo da je reč o digitalnom ortofotou, topografskim bazama podataka u digitalnom obliku ili naprosto digitalnoj kartografiji, podrazumeva DMT odgovarajućeg kvaliteta. Formiranjem takvog DMT-a, i zahtevi svih drugih korisnika spomenutog topografskog materijala biće takođe zadovoljeni. Slično važi i za podloge krupnijih razmera od 1:5000 do 1:10000. Naravno, podrazumeva se da su tu znatno viši zahtevi, kako u pogledu tačnosti, tako i u pogledu potrebnih finansijskih ulaganja i angažovanja drugih resursa.

Da bi se odgovorilo na pitanje: "Koji je to optimalni kvalitet koji treba zahtevati od nacionalnog DMT-a i metodologija da se takav DMT formira?", u ovom poglavlju se, uz korišćenje materije o savremenim metodama prikupljanja DMT podataka koja je izložena u poglavlju 2, analiziraju:

- iskustva na sličnim projektima u svetu;



- uslovi za primenu savremenih metoda za prikupljanje DMT podataka u našoj zemlji;
- kvalitet postojećih podataka.

## 5.1 Iskustva na izradi nacionalnih DMT-ova u svetu

Veliki broj razvijenih zemalja je još pre nekoliko decenija pokrenuo projekte izrade nacionalnih DMT-ova. Iskustva koja su pri tome stečena su svakako dragocena i moraju se respektovati. U najvećem broju zemalja, osnov za izradu nacionalnog DMT-a su bili podaci sa postojećih kartografskih podloga. Najčešće je rađena digitalizacija kartografskog materijala srednjih razmera, 1:10000 do 1:100000. Ti podaci su najčešće dopunjavani i održavani primenom aerofotogrametrijske metode, a rađeni su i potpuno novi nacionalni DEM proizvodi (Gruen 2000). Za neke projekte su korišćeni i podaci dobijeni optičkim senzorima u okviru satelitskih misija. Tu je posebno interesantna SPOT5 misija sa HRS senzorom (Poli 2004). Poslednjih godina, aktuelno je i korišćenje podataka dobijenih na osnovu radarskih snimanja, bilo da se radi o aerosnimanju (Li 2004, Dowman 2004) ili podacima iz satelitskih misija (Poidomani 2000). Laserska metoda se za ove potrebe sve više koristi, posebno u zemljama koje imaju završene programe izrade DMT-a srednjih razmera (oko 1:25000), i koje su pokrenule programe izrade kvalitetnijih DMT-a (Schleyer 2001, Petzold 1999, Huising 1998).

U okviru ovog poglavlja dat je prikaz stanja i iskustava na izradi nacionalnih DMT-a za nekoliko zemalja koje su karakteristične u pogledu primenjene tehnologije.

### 5.1.1 Nemačka

Nemačka ima vrlo dugu tradiciju prikupljanja podataka geodetskim i fotogrametrijskim metodama, kao i dugu tradiciju izrade kvalitetnih i ažurnih geodetskih podloga i baza podataka. Posao na ovim poslovima u Nemačkoj je poveren državama članicama federacije, koje imaju svoje agencije zadužene za premer i izradu kartografskih proizvoda. Ukupno ima 16 ovakvih agencija, a njihov rad koordinira Radni komitet za državni premer SRN - AdV (nem. *Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Laender der Bundesrepublik Deutschland*). AdV je, dakle, komitet na federalnom nivou koji se stara o standardima, daje smernice i koordinira rad agencija. Pored AdV-a i agencija za premer i izradu karata, u Nemačkoj je na sličnim poslovima angažovana i Savezna agencija za kartografiju i geodeziju - BKG (nem. *Bundesamt für Kartographie und Geodaesie*) kao podrška federalnoj administraciji, za izradu i distribuciju karata razmera sitnijih od 1:100000, distribuciju proizvoda koji pokrivaju celu teritoriju Nemačke i geodetske poslove vezane za globalnu geodetsku mrežu. Tu je i AMilGeo (nem. *Amt fuer Militaerisches Geowesen*) koji servisira vojne potrebe.

Agencije većine nemačkih država su pokrenule veliki broj projekata izrade DMT-a krupne i srednje razmere za područja pod svojom odgovornošću. Svim ovim projektima prethodila su vrlo obimna i značajna naučna istraživanja. U novije vreme, veliki broj ovih aktivnosti se odvija pod okriljem standarda pod nazivom ATKIS (nem. *Amtliches Topographisch – Kartographisches Informationssystem*), Službeni topografsko – kartografski informacioni sistem. Ovaj standard pokriva prikupljanje podataka za izrade karata od razmere 1:5000 do 1:1000000. Sastoji se iz četiri tipa proizvoda: DLM – digitalni model prostora, DTK – digitalna topografska karta, DGM – digitalni model terena i DOP – digitalni ortofoto. ATKIS konceptom su propisani standardi koji se odnose na: model podataka, sadržaj, format za razmenu podataka, metapodatke, kvalitet podataka i uslove za korišćenje ATKIS proizvoda. ATKIS ne propisuje standarde za interne formate podataka i procedure, tako da svaka agencija može da koristi bilo koji softver koji zadovoljava zahteve propisane ATKIS-om. Na primeru dveju nemačkih država biće predstavljeni poslovi na prikupljanju podataka i formiranju nacionalnog DMT-a.

Agencija nemačke države **Baden-Württemberg** je još 1983. godine pokrenula program izrade DMT-a za celokupnu svoju teritoriju (Sigle 1984). Površina ove države iznosi oko 36000 km<sup>2</sup> i pokrivena je sa 75 listova karte razmere 1:50000. Listovi su dimenzija oko 24.5x22km<sup>2</sup>. Predviđeno je da se za formiranje DMT-a iskoriste podaci koji su još od 1972. godine prikupljeni u okviru projekata izrade ortofotoa razmere 1:10000, a na osnovu aerofotogrametrijskih snimanja razmere 1:30000. Projekti izrade ortofotoa u ovoj državi su u to vreme inače rađeni svakih 5 godina. Prikupljanje visinskih informacija sa fotomaterijala je rađeno na analognim instrumentima. Za potrebe izrade ortofotoa razmere 1:10000

mereni su paralelni profili na rastojanju od 80m i ti profili su gravirani na staklene ploče. Ovi profili su zatim korišćeni na ortoprojektoru *Zeiss GZ 1* za izradu ortofotoa. Da bi se ti podaci mogli koristiti na novijem instrumentu *Zeiss Orthocomp Z2* koji je nabavljen 1980. godine, ovi profili su digitalizovani. Memorisane su visine duž profila na svakih 10m, što je iznosilo oko 34000 tačaka za svaku staklenu ploču. Testovi koji su sprovedeni da bi se utvrdila tačnost dobijenih podataka pokazali su da srednja visinska razlika između ovih podataka i podataka dobijenih novim merenjima na instrumentu *Zeiss Planicomp C100* iznosi od 1.5 m za ravan teren, do 5m za brdovit teren. Za pojedina test područja otkrivene su i značajne sistematske greške od 2m i više. Za šumska područja ove razlike su bile i veće s obzirom da su profili mereni po vrhovima krošnji drveća. Iz digitalizovanih profila su odabrane tačke na svakih 40m, što je iznosilo oko 8500 tačaka po profilu i oko 280000 tačaka po jednoj karti razmere 1:50000. Nakon otklanjanja sistematskih grešaka koje su utvrđene u ovim podacima izvršena je interpolacija, odnosno formiranje DMT-a korišćenjem programskog sistema *SCOP* (*SCOP 1991, w14, w43*). Korišćena je interpolacija po metodi linearne predikcije kombinovana sa filtriranjem tj. otklanjanjem sistematskih grešaka skeniranja. Dobijen je DMT u vidu pravilne mreže tačaka sa rastojanjem od 50m između susednih tačaka i sa ukupnim brojem tačaka od 16 miliona.

Da bi se dobio kvalitetniji DMT 2000. godine pokrenut je novi projekat koji je predvideo primenu *LiDAR* metode (*Schleyer 2001*). Korišćen je *LiDAR* sistem *Optech ALTM 1225* sa sledećim parametrima: frekvencija merenja 25000 Hz, frekvencija skeniranja 25Hz, ugao skeniranja  $\pm 20^\circ$ , visina leta 900m, brzina leta 290km/h i širina trake od 300-450m. U okviru ovog projekta podaci se prikupljaju sa gustinom tačaka od 1-2m, a tačnost prikupljenih podataka je takva da su greške za 97% izmerenih visina manje od 0.5m.

Slična iskustva na izradi državnog DMT-a postoje i u nemačkoj državi **Northrhine-Westfalia**. I tu je krajem sedamdesetih i godina započet projekat izrade DMT-a nazvanog **DGM25**. Kao i za Baden-Württemberg i ovde su za izradu DMT-a korišćeni podaci visinskih profila dobijeni iz ortofotoprodukcije. Tako je do 1984. godine formiran DMT sa pravilnom mrežom tačaka sa rastojanjem od 50m i visinske tačnosti od 5m. Međutim, kako su zahtevi za kvalitetnijim DMT-om rasli, koncipiran je novi standard **DGM 5** koji je trebao da odgovara tačnosti koja se postavlja za planove i karte razmera od 1:2 500 do 1:5 000. Ovaj standard predviđa rastojanje tačaka u pravilnoj mreži od 10m i tačnost visina u tačkama mreže od 3 do 5dm (*Petzold 1999*). Podaci su prikupljeni primenom fotogrametrijske metode na osnovu aerofotogrametrijskih snimaka razmere 1:8000. Vršeno je merenje tačaka u pravilnoj mreži, kao i merenje prelomnih linija i visina za karakteristične tačke terena kad god je to potrebno. Paralelno sa ovim vršena je i digitalizacija izhopsi sa postojećih karata razmere 1:5000. Do 1999. godine na ovaj način su prikupljeni podaci za 85% državne teritorije. Ove podatke karakteriše nehomogen DMT sa malom tačnošću ili nedostatkom merenja na terenu sa malom teksturom, u šumskim pojasevima i u gusto uzdanim naseljima. Uočene su i razlike u tačnosti za podatke DMT-a dobijene fotogrametrijskim merenjima i digitalizacijom postojećih podloga. Zbog svega navedenog, ali i zato što je procenjeno da bi na ovaj način posao bio završen do 2010. godine, kao i zbog napredaka u *LiDAR* tehnologiji, prešlo se na novi metod. Ovaj novi metod je zasnovan na *LiDAR* snimanju sa sledećim parametrima: frekvencija lasera 2000Hz, frekvencija skeniranja 10Hz, visina leta aviona oko 850m, ugao skeniranja od  $\pm 12^\circ$ , gustina tačaka na terenu od 3-4m. Tada je procenjeno da bi primenom ove tehnologije posao bio završen do 2002. godine, a veliki deo drugih problema koji je uočen kod fotogrametrijske metode i kod digitalizacije postojećih podloga je eliminisan. U cilju procene tačnosti novog metoda izvedeno je više testova i dobijeni su vrlo zadovoljavajući rezultati. Visinske razlike za test područja su bile do 0.3m, sem u izuzetnim slučajevima. Isto tako, dobijeni su i vrlo zadovoljavajući rezultati u terenima pod šumom. Najveći posao kod nove metode predstavlja faza editovanja *LiDAR* DMT-a. Ovo editovanje se odnosi na korigovanje podataka duž nasipa, brana, puteva u industrijskim pojasevima i oko vodenih površina, gde automatske procedure za filtriranje podataka nisu u stanju da razlikuju pojave na površi terena koje treba, a koje ne treba uključiti u DMT.

Ono što je karakteristično za većinu ovih primena je da je za obradu podataka, formiranje DMT-a i manipulaciju podacima DMT-a uglavnom korišćen i još uvek se koristi već pomenuti softverski paket *SCOP* (*SCOP 1991, w14, w43*).

Treba reći da još uvek nije formiran jedinstven i homogen DMT za celokupnu teritoriju Nemačke, čija bi tačnost bila na nivou pomenutih projekata. Jedan takav projekat *AdV* je već inicirao (*w17*). Naime, katastrofalna poplava reke *Elbe* u avgustu 2002. i potrebe za preciznim proračunima za predviđanje budućih poplava, ali i naraslo tržište mobilne telefonije sa svojim zahtevima za DMT-om potrebnim za planiranje rasporeda antena uticali su na to da se u maju 2003. donese odluka da se formira jedan jedinstven DEM za teritoriju cele Savezne Republike Nemačke sa homogenom tačnošću od 1m RMSE za ravničarski i 3m RMSE za planinski teren (*Hovenbitzer 2004*). Odlučeno je da rastojanje tačaka u gridu bude 50m. Posao je poveren Saveznoj agenciji za kartografiju i geodeziju (*BKG*). Izvori podataka za formiranje ovog DEM-a su DEM-ovi kojima su već raspolagale neke federalne jedinice. U zapadnom delu

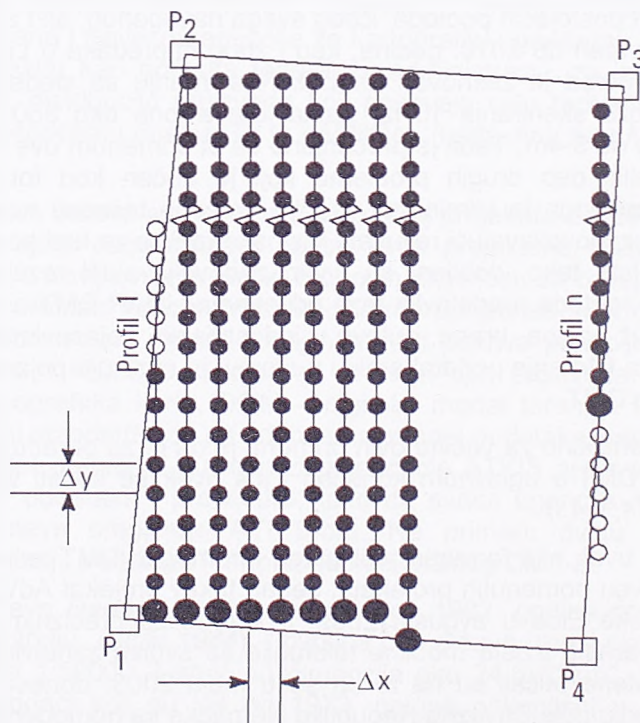


Nemačke to je uglavnom bio DEM5 sa tačnošću od oko 0.5m (grid rastojanja oko 5-10m, 24% državne teritorije), dok je za istočni deo Nemačke to uglavnom DEM25 sa tačnošću od oko 2m (grid rastojanja oko 20-50m, 54% državne teritorije). Pored ovih skupova podataka u Nemačkoj postoje i podaci za DEM10 sa tačnošću od oko 1m (grid rastojanja oko 10-20m, 6% državne teritorije) i DEM50 tačnosti od 4m (grid rastojanja 50m, 16% državne teritorije) Ovi podaci su prikupljeni različitim tehnikama od kojih su neke objašnjene gore. To su uglavnom lasersko skeniranje, fotogrametrija i digitalizacija izohipsi sa postojećih karata. DEM setovi podataka se često preklapaju na granicama federalnih država. BKG je u 2002. i 2003. godini prikupio sve raspoložive podatke od agencija članica federacije. Podaci su pregledani s obzirom na kompletost, a zatim su transformisani u jedinstveni koordinatni sistem projekcije (UTM Gauß-Krüger, meridijan sa  $9^\circ$ ) i sistem visina. Nakon toga je usledila kontrola kvaliteta koristeći mobilni DGPS. U narednim godinama uslediće ažuriranje ovog DEM-a podacima koji će odgovarati specificiranoj tačnosti od 1-3m generalno, i tačnijim od 0.5m za regione ugrožene potencijalnim poplavama. Ove podatke će prikupiti agencije članica federacije, najverovatnije na sličan način na koji su to uradile i agencije država Baden-Württemberg i Northrhine-Westfalia.

### 5.1.2 SAD

Vodeća federalna agencija za prikupljanje i distribuciju digitalnih kartografskih podataka u SAD je USGS (*United States Geological Survey*) (w18, w19). USGS je definisao 5 primarnih tipova DEM podataka. DEM sa najvišom tačnošću je 7.5-minutni DEM sa rastojanjem između tačaka od 10 do 30m. Celokupna kopnena teritorija SAD je pokrivena blokovima ovih podataka veličine 7.5x7.5 minuta. Ovo odgovara podeli na listove TK25. Referentni koordinatni sistem je UTM, NAD 27 (*North American Datum of 1927*) ili NAD 83 (*North American Datum of 1983*). Sve visine su date u celim metrima ili stopama relativno u odnosu na NGVD 29 (*National Geodetic Vertical datum of 1929*). Izuzetak su jedino podaci za Havaje i Portoriko.

Izvor podataka za formiranje ovog DEM-a su bili aero snimci dobijeni u okviru Nacionalnog programa aero snimanja (*National Aerial Photography Program*) i Nacionalnog programa snimanja sa velikih visina (*National High Altitude Photography Program*). Podaci su prikupljeni postupcima autokorelacije na instrumentima tipa *Gestalt Photo Mapper II*, manuelnim profilisanjem na fotogrametrijskim instrumentima i interpolacijom visina na osnovu izohipsi direktno izvlačenih u stereo modelu. Ove metode se danas više ne koriste za ove svrhe. Danas se još samo koristi interpolacija na osnovu vektorskih podataka hipsografije i hidrografije.



Slika 5-1 : Primer jednog bloka za 7.5-minutni DEM (velikim tačkama su označene početne tačke profila, prazni krugovi se ne koriste u DEM-u)

Podaci za 7.5-minutni DEM arhivirani su u obliku profila sa 10 ili 30 metara rastojanja između profila i tačaka unutar profila. Približne veličine datoteka su 9.9Mb za 10-metarsku rezoluciju i 1.1Mb za 30-metarsku rezoluciju. Profili ne sadrže uvek jednak broj visina zbog promenljivog ugla između severa i pravca odgovarajuće ose UTM koordinatnog sistema.

Tačnost DEM-a je data u obliku srednje kvadratne greške (RMSE). Za DEM dobijen fotogrametrijskim metodama 90% podataka ima tačnost od 7m ili više, a 10% je u rasponu od 8-15m RMSE. Za podake dobijene na osnovu hipsografskih i hidrografskih podataka zahteva se RMSE od jedne polovine ekvidistancije ili bolje.

Ovaj DEM odgovara USGS topografskim kartama razmere 1:24000 i 1:25000. Svi podaci su na raspolaganju u digitalnom obliku u formi Native ili SDTS (Spatial Data Transfer standard) (w26). Podaci u Native formatu se isporučuju preko CD-ROM-a, DVD-a, 8-mm trake i FTP-a, dok se podaci u SDTS formatu mogu prevući korišćenjem FTP servisa (w27).

Pored 7.5-minutnog DEM-a, za teritoriju SAD je urađen i DEM na osnovu podataka SRTM misije, a predstoji i realizacija velikog projekta kartiranja celokupne kontinentalne teritorije SAD primenom InSAR sistema firme *InterMap Technologies* (Li 2004). Ovaj projekat pripada seriji *NEXTMap* projekata koje je ova firma već realizovala u nekim zemljama (*NEXTMap Britain*, *NEXTMap Indonesia* i druge). Očekuje se da će površina od 7.9 miliona kvadratnih kilometara biti iskartirana za 5 godina, uz visinsku i položajnu tačnost od 1m ili bolje.

### 5.1.3 Švajcarska

Za razliku od Austrije i Nemačke gde su za prvobitne programe izrade nacionalnih DMT-a korišćene isključivo fotogrametrijske metode, Švajcarska je svoj prvi program izrade nacionalnog DMT-a zasnovala na digitalizaciji postojećih topografskih karata razmere 1:25000. Nakon skeniranja podloga izvršena je vektorizacija izohipsi i digitalizacija tačaka sa kotama. Za teritoriju Švajcarske koja iznosi oko 42000km<sup>2</sup> dobijen je set podataka od oko 50 miliona tačaka. Korišćenjem *SCOP* softvera formiran je DMT sa pravilnom mrežom tačaka i intervalom od 25m pod nazivom DHM25.

U 1999. godini *Swissphoto* je formirao digitalni model površi (DMP) sa tačkama grida od 10m pod nazivom DSM10 (*Gruen 2000*). Osnova za merenje su bili panhromatski snimci dobijeni aerofotogrametrijskim snimanjem u razmeri 1:22000 – 1:50000. Inicijalni DMT je dobijen primenom automatskih procedura za automatsko merenje DMP-a. Najveći posao se odnosio na editovanje tako dobijenog DMP-a. Tačnost dobijenog DMP-a je u rasponu od 2-5m u brežuljkastim područjima i u proseku oko 10m u planinskim područjima. Glavna oblast primene ovako dobijenog DMT-a je za planiranje mreže mobilnih telekomunikacija.

Pre par godina urađen je i projekat izrade DMP-a za područje cele Švajcarske korišćenjem snimaka iz misija *ERS-1/2* (*Poidomani 2000*). Korišćeni su podaci iz 3 prelaza da bi se eliminisali uticaji preklopa i senke prouzrokovani strmim terenom, što je inače odlika velikog dela teritorije Švajcarske. Jedan prelaz je uzet i da bi se smanjio uticaj atmosferskih efekata. Na taj način je obezbeđeno da je svaka tačka na terenu registrovana između tri i šest puta na izabranim interferometrijskim parovima. Za obradu je izabrano ukupno 36 parova. Procesiranjem ovih podataka, uz korišćenje dodatnih izvora podataka (karte 1:50000, DEM manje rezolucije od 50m i drugi izvori) formiran je DMP sa gridom od 25m. 95% DEM-a je dobijeno iz SAR podataka, dok je ostatak interpolovan korišćenjem podataka sa postojećih topografskih karata. Ostvarena je tačnost od 7m za područja sa umerenom topografijom i do 15m za terene sa vrlo strmim nagibima.

### 5.1.4 Velika Britanija

U Velikoj Britaniji je pokrenuto nekoliko velikih projekata za kartiranje celokupne državne teritorije. Svakako najznačajniji od njih je projekat *NEXTMap Britain*. Ovaj projekat je imao za cilj izradu DEM-a za kompletnu teritoriju Velike Britanije primenom *STAR* InSAR sistema firme *InterMap Technologies* (poglavlje 2.3.3, Li 2004). Ostvarena je tačnost od oko 0.5m RMSE za otvoren teren bez objekata i



vegetacije i 0.8m za teren pod usevima (Dowman 2004). Navodi se i izuzetno niska jedinična cena od oko 5 USD/km<sup>2</sup>.

### 5.1.5 Austrija

Prikupljanje podataka koji su kasnije iskorišćeni za formiranje DMT-a za područje Austrije započelo je već 1976. godine merenjem fotogrametrijskih profila na analognim instrumentima. Korišćeni su aerofotogrametrijski snimci razmere 1:30000. Na taj način dobijen je set tačaka sa međusobnim rastojanjem od 30m do 160m. Ovi podaci su od sredine osamdesetih godina naknadno dopunjeni podacima dobijenim merenjem karakterističnih tačaka i prelomnih i strukturnih linija terena na analitičkim ploterima. Pri tome su korišćeni aerofotogrametrijski snimci razmere 1:15000. Ukupna količina prikupljenih podataka za područje od 84000km<sup>2</sup> iznosi oko 80 miliona merenih visina (Hochstätger 1996). Na osnovu ovih podataka korišćenjem softverskog paketa SCOP (SCOP 1991, w14, w43) formiran je DMT za celokupnu teritoriju države u obliku pravilne mreže tačaka sa osnovnim intervalom od 50m.

### 5.1.6 Francuska

Poslovi prikupljanja i rukovanja nacionalnim geografskim bazama podataka u Francuskoj su povereni vladinoj agenciji IGN France (Duperet 1999). Prikupljanje DMT podataka za potrebe formiranja nacionalnog DMT-a u okviru ove institucije izvodi se digitalnim fotogrametrijskim radnim stanicama. Koristi se Socet Set softver (LH Systems, Bae Systems) sa odgovarajućim modulima (ATE – Automatic Terrain Extraction, ITE – Interactive Terrain Extraction, FGIS - Feature GIS i DEVK - Developer kit). Izvor podataka su crno-beli snimci dobijeni aerofotogrametrijskim snimanjem razmere 1:30000, skenirani u rezoluciji od 14μm. Osnovni produkt za koji se radi kartiranje je topografska karta razmere 1:25000. Osnovni metod za prikupljanje DMT podataka je automatska korelacija slika u okviru modula Socket Set-ovog modula ATE. Kontrola kvaliteta rezultata dobijenih automatskom korelacijom izvodi se vizuelnim pregledom. Nakon toga se vrši eliminacija merenja koja padaju na krošnje drveća i krovove zgrada. Takođe se vrši i glačanje DMT površi. Rezultat obrade je DMT u formi grida sa korakom grida od 5m. Na ovaj način za jedan model se dobija DTM od 1000x600 tačaka. Često se DMT radi za blok od 4 niza sa po 12 snimaka. Ako su na raspolaganju dodatni podaci za dato područje, onda se vrši dalje korigovanje dobijenog DMT-a. Tipičan primer su podaci koji se odnose na površine pod jezerima i većim rekama i površine pod zgradama i visokom vegetacijom. Ove korekcije se izvode interaktivno ili automatski. Poslednja opcija se koristi ako se raspoloživo sa relevantnim podacima (poligoni pod jezerima, zgradama i slično) iz baze podataka. Vreme potrebno za manuelno editovanje DMT-a koji se odnosi na jedan stereopar iznosi od 5 do 15 časova u zavisnosti od snimljenog područja.

### 5.1.7 Holandija

Primer Holandije je interesantan zbog činjenice da se tamo od 1988. godine vrše istraživanja sa ciljem mogućnosti ekstrakcije topografskih informacija iz LiDAR merenja. Laserska merenja se tamo izvode svake godine sa ciljem praćenja morfologije terena uz morsku obalu. Od 1997. godine pokrenut je projekat izrade nacionalnog DMT-a na osnovu premera primenom LiDAR tehnologije (Brugelmann 2000, Crombaghs 2000, Huisling 1998). Kampanja na prikupljanju ovih podataka je trajala tri godine. Posao prikupljanja podataka je poverena nekolicini firmi koje su koristile različite LiDAR sisteme: Optech ALTM1020, TopoSys i Saab TopEye. Visina leta je iznosila od 480 do 900m, brzina leta od 216 do 360 km/h, širina trake 205 do 650m. Na osnovu originalnih visina tačaka koje su neravnomerno raspoređene po terenu, Odeljenje za premer koje radi u okviru Ministarstva za saobraćaj, javne radove i upravljanje vodama, formiralo je DEM u formi pravilnog grida. Gustina prikupljenih podataka je takva da jedna tačka reprezentuje površinu od 16m<sup>2</sup>.

### 5.1.8 Danska

U Danskoj su poslovi topografskog kartiranja u razmeri 1:10000 i sitnije povereni Nacionalnom premeru i katastru (*KMS*), instituciji u okviru Ministarstva za životnu okolinu. Nacionalna topografska baza podataka Danske pod nazivom *TOP10DK* je uspostavljena tokom poslednje decenije dvadesetog veka. Baza je definisana 1995. godine i sastoji se iz tri komponente: 3D vektorskih podataka sa punom topologijom, baze podataka sa zvanim mestima i tačkama od interesa – POI (engl. *Point of Interest*) (*Frederiksen 2004*). Model visina se zasniva na digitalizovanim izohipsama i visinama izabranih prostornih entiteta iz 3D vektorske baze podataka i visinama pojedinih tačaka. Podaci se čuvaju u formi grida i sračunatih izohipsi. Konceptija baze podataka je osmišljena sa ciljem da se uspostavi jedinstvena topografska baza podataka gde će podaci biti prikupljeni samo jednom, a zatim biti arhivirani, i po potrebi ažurirani. Predviđeno je da se redundantnost podataka izbegne po svaku cenu. Takođe je predviđeno da se na osnovu ovih podataka po potrebi formiraju druge baze podataka, na osnovu specifikacije izabranih prostornih entiteta, specifikacija za generalizaciju i intervala razmera pogodnih za prikaz tih podataka. Sva ažuriranja se sprovode samo na jednom mestu u *TOP10DK* bazi podataka.

Geometrijska tačnost prostornih entiteta je 1m za sve tri koordinate, s tim da je ona za dobro definisane tačke znatno veća. Za prikupljanje geometrije vektorskih podataka koristi se isključivo fotogrametrija. Izvor za prikupljanje podataka su aerofotogrametrijski snimci razmere 1:25000. Ciklus ažuriranja (revizije) baze podataka za celu državu traje 5 godina. Svake godine se snimi teritorija od oko 10000km<sup>2</sup>, pri čemu se dobije oko 1500 snimaka. Pri tome je predviđeno da se, u okviru svakog ciklusa koristi ista mreža orijentacionih i veznih tačaka. Da bi se to omogućilo koristi se GPS tehnologija da se obezbedilo dobijanje modela lociranih približno na istim mestima za svaki ciklus. Skeniranje snimaka se izvodi u rezoluciji od 21μm. Poslove planiranja, kontrole i finalnog ažuriranja baze podataka izvodi *KMS*, dok ostale poslove (aerofotogrametrijsko snimanje, skeniranje i kartiranje) izvode 3-4 kompanije koje te poslove dobijaju preko tendera.

Digitalni model visina (DEM) je formiran na osnovu podataka iz različitih izvora: izohipsi sa starih karata sa ekvidistancijom od 2.5 metara, izabranih prostornih entiteta iz vektorske baze podataka i karakterističnih tačaka terena. Izohipse su prvobitno kartirane grafičkim premerom u razmeri 1:20000, sa ekvidistancijom od 5 Danskih stopa (1.57m), a od 1889. godine sa ekvidistancijom od 2.5m. Od sredine šezdesetih godina dvadesetog veka fotogrametrija se koristi kao osnovna metoda za izradu karata 1:10000. I pored toga, najveći izvor podataka kod formiranja *TOP10DK* DEM-a su predstavljale ručno interpolovane izohipse sa ekvidistancijom od 5 stopa i 2.5m, uz dodatak karakterističnih tačaka terena (400-500 tačaka na 100km<sup>2</sup>) i visina tačaka izabranih prostornih entiteta iz vektorske baze podataka. Interpolacija DEM-a se vrši primenom kriginga, ali se takođe koristi i bilinearna interpolacija. Ažuriranje DEM-a se vrši nakon završenog ažuriranja vektorske baze podataka, da bi se mogli preuzeti ažurni izabrani objekti sa visinama.

## 5.2 Kvalitet ciljnog DMT-a

Zahtevani kvalitet ciljnog DMT-a je svakako faktor koji najznačajnije utiče na vreme i troškove koje zahteva realizacija projekta izrade DMT-a za teritoriju države. U ovom trenutku teško je precizno uočiti i sagledati zahteve svih potencijalnih korisnika po ovom pitanju. U takvoj situaciji najlogičnije je osloniti se na dosadašnju tradiciju prikupljanja podatka visinske predstave kod nas i na trenutne potrebe i mogućnosti naše prakse. Svakako, podrazumeva se i respektovanje iskustava drugih zemalja.

Analiza iskustava drugih zemalja na sličnim programima koja je izložena u poglavlju 5.1 ukazuju da je nepisano pravilo da se prvo radi DMT čiji kvalitet odgovara podacima na kartama srednjih razmera od 1:10000 do 1:50000. To se najčešće radi digitalizacijom postojećih karata. Druga varijanta, takođe dosta zastupljena, je korišćenje merenja koja su prvobitno urađena kod ortofotoprodukcije podloga ovih razmera. Tek kada se formira DMT ovakvog kvaliteta, pokreću se projekti za izradu kvalitetnijeg DMT-a čiji kvalitet okvirno odgovara kartama razmere 1:5000, kao što je to slučaj sa Nemačkom (*Schleyer 2001*, *Petzold 1999*).

U Srbiji su u toku pripreme za realizaciju projekta izrade ortofoto podloga u razmeri 1:5000 za kompletnu teritoriju države bez Kosova. Za veliki deo Vojvodine predviđena je i izrada ortofotoa razmere 1:2500, dok će se za sve katastarske opštine u urbanim sredinama uraditi ortofoto razmere 1:1000. Ako se ostvare ti planovi, kroz ovaj projekat će se u naredne tri godine praktično realizovati DMT za teritoriju



Srbije koji će po svome kvalitetu odgovarati DMT-u razmere 1:5000, a u pojedinim delovima će biti i kvalitetniji. Međutim, postavlja se opravdano pitanje da li nešto po pitanju izrade nacionalnog DMT-a može i treba da se radi i u međuvremenu. Stav autora je da u Srbiji već postoje kvalitetni podaci sa kojima se može uspešno i za kratko vreme doći do DMT-a koji bi bio interesantan većem broju korisnika.

Ako se pretpostavi da je najracionalniji način formiranja nacionalnog DMT-a upravo digitalizacija postojećih podloga, jer kod nas nema značajnije ortofotoprodukcije na nacionalnom nivou, i uz respektovanje svega što je dosad navedeno, proizilazi da je kvalitet ciljnog DMT-a određen kvalitetom podataka na postojećim topografskim podlogama.

Trenutno u našoj zemlji postoje dva značajna programa izrade karata na nacionalnom nivou, a koji su u ovom kontekstu interesantni. To su program izrade Osnovne državne karte u razmerama 1:5000 i 1:10000 (ODK), za koji je nadležan Republički geodetski zavod, i program izrade Vojnotopografske karte 1:25000 (TK25), za koji je nadležan Vojnogeografski institut. S obzirom na mogućnost korišćenja postojećih podataka koji se nalaze na ovim podlogama za formiranje nacionalnog DMT-a, kao i s obzirom na potrebe za dalju podršku ovim programima, logično se postavlja zahtev za DMT-om koji bi korespondirao ovim podlogama. Pored toga, u okviru ovih programa u budućnosti bi sve veći značaj trebao da ima ortofoto odgovarajuće razmere. Ako se zna da kod ortofotoprodukcije DMT ima vrlo značajnu ulogu, onda je sasvim jasno da je i to jedan od argumenata da se kvalitet nacionalnog DMT-a uskladi i donekle podredi potrebama realizacije ovih programa.

Imajući u vidu gore izloženo logičan zaključak je da je u ovom trenutku jedina racionalna opcija formiranje DMT-a koji bi odgovarao topografskim podlogama razmere 1:25000.

### 5.3 Postojeći izvori podataka za izradu nacionalnog DMT-a

Najveća količina podataka koji se mogu iskoristiti za formiranje nacionalnog DMT-a, a kojima raspolažu naše institucije, nalazi se u formi postojećih podloga sa visinskom predstavom.

Kada su u pitanju podaci visinske predstave koji odgovaraju kartama krupnih i srednjih razmera, a koji su prikupljeni za veća područja državne teritorije, onda se mogu uočiti samo dva glavna izvora ovih podataka. To su već pomenuta Vojnotopografska karta razmere 1:25000 i Osnovna državna karta razmere 1:5000 i 1:10000. Pored ovih karata postoji i izvesna količina kartografskih podloga krupne razmere, ali ove podloge pokrivaju područja manjeg obima i potpuno je neracionalno njihovo korišćenje za potrebe formiranja nacionalnog DMT-a. Korišćenje ovih podloga može biti interesantno za ažuriranje DMT-a za manja područja na kojima je došlo do većih promena na terenu, a koje su evidentirane na ovim podlogama.

Pored podataka sadržanih na geodetskim podlogama, sve veći značaj za formiranje nacionalnog DMT-a imaju podaci u digitalnom obliku koji su prikupljeni za više gradova u Srbiji, a po metodologiji digitalnog modeliranja terena. Ti podaci su prikupljeni u okviru nekoliko projekata izrade planova krupne razmere (1:1000) i više projekata izrade digitalnog ortofotoa razmere 1:5000. Ove podatke svakako treba uključiti kod formiranja nacionalnog DMT-a, ali s obzirom da se trenutno radi o manjim područjima u odnosu na ukupnu državnu teritoriju, ovi podaci ne mogu značajno uticati na tok izrade nacionalnog DMT-a, bar ne u prvoj fazi njegovog formiranja. Značaj ovih podataka se ogleda pre svega u mogućnosti njihovog korišćenja za kontrolu i ocenu kvaliteta DMT-a formiranog na osnovu drugih izvora podataka, a zatim i za njegovo ažuriranje. Zato će ovi podaci u budućnosti igrati vrlo značajnu ulogu kada započne faza ažuriranja i poboljšanja postojećeg DMT-a.

#### 5.3.1 Vojnotopografska karta 1:25000

Može se reći da je najznačajniji kvalitet TK25 kada je u pitanju izrada DMT-a za teritoriju države, u tome što je celokupna teritorija države sistematski i u potpunosti pokrivena ovim kartama. Ukupan broj ovih karata za područje Srbije i Crne Gore iznosi oko 850.

Prvo izdanje TK25 za potrebe oružanih snaga izrađeno je na osnovu novog premera celokupne teritorije bivše SFRJ u vremenu od 1947. do 1967. godine. Promene koje su nastale na zemljištu u vremenu od prvog premera, uslovile su potrebu za usaglašavanjem sadržaja karte prvog izdanja, pa se

zbog toga u kasnijim godina pristupalo njenom ažuriranju i osavremenjavanjem sadržaja karte sa dopunama i promenama nastalim na terenu od prvobitnog premera. Jedna od osnovnih karakteristika ove karte jeste izuzetno dug ciklus ažuriranja za celu državnu teritoriju. Pojedini listovi karte su poslednji put ažurirani pre 20 godina, što kada je u pitanju DMT25 nema veći uticaj. Naravno, postoje određene površine (npr. površinski kopovi), koje zahtevaju specijalno ažuriranje ovih karata.

Osnovne karakteristike karata 1:25000 su:

- približne dimenzije korisnog prostora (trapeza) na karti: 400 x 600 mm;
- približne dimenzije korisnog prostora u prirodi: 10000 x 15000 m;
- list karte obuhvata područje 7.5 ' x 7.5 ' geografske dužine i širine.

Na TK25 visinska predstava terena je prikazana pomoću:

- izohipsi;
- nivelmanskih tačaka;
- kota;
- trigonometara;
- zemljišnih oblika.

Svi ovi podaci su dati na samoj kolornoj karti, ali i na posebnim reprodukcijским originalima (RO) što je posebno značajno kada je reč o mogućnostima primene automatizovanih postupaka za vektorizaciju izohipsi.

Izohipse služe kao osnovni način prikazivanja visinske predstave. Osnovne izohipse su iscrtnane punom linijom debljine 0.1mm, na ekvidistanciji od 10 m. Za jasnije i detaljnije izražavanje reljefa na pojedinim delovima terena na kartama su iscrtnane i pomoćne izohipse, koje su date na polovini ili četvrtini ekvidistancije, tj. na 5 m (crkasta linija) i 2.5 m (tačkastom linija). Takođe su prikazane i glavne izohipse, i to svaka peta osnovna izohipsa. One su iscrtnane punom linijom debljine 0.2 mm i na njima su ispisane apsolutne visine. Brojke za visine ispisuju se tako što da se sredina brojke nalazi na osi glavne izohipse.

Nivelmanske tačke su prikazane na karti svojim znakom ako su reperi usađeni u posebnim stubovima. Visina se daje zaokružena na centimetar u ravnici, a na ostalim delovima na decimetar. Na kartama su prikazane sve trigonometrijske tačke, izuzetno se vrši redukcija ako je mreža trigonometrijskih tačaka izrazito gusta i u naseljenim mestima gde bi naziv i znak tačke prekrilo neki važan sadržaj. Kotama se prikazuju tačke na zemljištu koje su položajno i visinski definisane ili je reč o nekim karakterističnim objektima. Smisao ovih kota je da se omogući lakše sagledavanje visinske predstave. Visina kota i trigonometara zaokružena je na ceo metar, a na delovima površine 4m<sup>2</sup> i više na kojima se sistematski primenjuju pomoćne izohipse ove visine su zaokružene na decimetar. Brojke koje označavaju visinu se ispisuju istočno od znaka tako da budu simetrične prema sredini znaka.

Na TK25 prikazani su sledeći zemljišni oblici: vrtače, uočljivi pregibi, humke i udoline u ravnicama, udubljenja sa zasečenim stranama u ravničarskom zemljištu, usamljene stene, stenoviti odsek, šljunkoviti ili zemljani osip i točila, kamenito tlo, manje i veće jaruge, vododerine, mrežaste i rebraste škarpe i slojevi, stenoviti grebenski oblici, stene, plazine i lednici. Ove pojave se na karti prikazuju izohipsama ako to dozvoljava razmera karte, u suprotnom, šrafama-crticama, primenom manjih i većih tačkica, ili uslovnim znakom iz topografskog ključa, ako se radi o oblicima koji se dobro uočavaju na zemljištu, ali se zbog veličine ne mogu drugačije prikazati.

Pored ovih podataka, kojima se direktno prikazuje visinska predstava terena na kartama, na raspolaganju su i drugi podaci koji su tesno povezani sa visinskom predstavom terena. To su podaci koji se odnose na hidrografiju. Ovi podaci uključuju mrežu vodotoka koja je naneta na reprodukcijским originalima hidrografije i maske za veće vodene površine (veće reke i jezera) koje se nalaze na posebnim reprodukcijским originalima.

Za prikupljanje podataka kod izrade TK25 korišćene su sledeće metode:

- fotogrametrijska metoda premera kao osnova sa terenskom dopunom;
- klasični premer, tamo gde nije bilo moguće primeniti rentabilnije metode;
- izrada originala dobijenih na osnovu karata i planova krupnijih razmera.



Glavni metod prikupljanja visinskih podataka bila je aerofotogrametrija, čijom primenom je, u periodu od 1955. do 1965. godine, prikupljena većina podataka koja je trenutno na raspolaganju na ovim kartama.

Visinska predstava kod ovih karata u najvećoj meri je rađena direktnim izvlačenjem izohipsi na fotogrametrijskim instrumentima. Podaci su prikupljeni sa aerofotogrametrijskih snimaka razmere 1:30000, 1:33000 i 1:26000. Treba imati u vidu da visinsku predstavu dobijenu na ovaj način karakteriše vrlo visok kvalitet u morfološkom smislu. Ono na šta treba posebno obratiti pažnju kod evaluacije ovih podataka je njihova tačnost u područjima obraslim gustom vegetacijom, jer su to područja u kojima je tačnost visinskih podataka dobijenih fotogrametrijskom metodom znatno smanjena. Isto tako, kritična su i područja u gradovima, jer se tu izohipse uglavnom ne prikazuju. Jedan deo karata, posebno u ravničarskom predelima je urađen generalizacijom podloga krupnijih razmera.

### 5.3.2 Osnovna državna karta

Za razliku od vojno-topografskih karata, osnovnom državnom kartom je pokriveno oko 40% državne teritorije. Najveći broj ovih karata je urađen za područje Vojvodine, koja je skoro stoprocentno pokrivena. Za ostatak teritorije Srbije ove karte su izrađivane po potrebi, i to uglavnom za gradska područja (Slika C-1). ODK se radi uglavnom u razmeri 1:5000, s tim da su izvesna područja kartirana u razmeri 1:10000. Na poslovima izrade ODK korišćeno je više tehnika, od kojih su najznačajnije fotogrametrijska restitucija i generalisanje sa planova krupnijih razmera. Kao i kod TK25 na raspolaganju su posebne oleate koje sadrže samo visinsku predstavu. Ukupan broj karata koje su dosad urađene iznosi oko 6500. Osnovna ekvidistancija na ovim kartama po pravilu iznosi 5m, ali ima i slučajeva gde je ona 1m. Kao i kod TK25, na delovima sa ravnim terenom date su izohipse i na polovini i četvrtini osnovne ekvidistancije.

### 5.3.3 Kvalitet podataka raspoloživih na postojećim podlogama

Sasvim je logično da kvalitet konačnog DMT-a formiranog na osnovu podataka dobijenih digitalizacijom postojećih podloga zavisi u najvećoj meri upravo od kvaliteta ovih podataka. Osim kvaliteta tih podataka na kvalitet dobijenog DMT-a utiče i izbor numeričkih postupaka za rekonstrukciju površi terena (metod interpolacije) na osnovu ovih podataka. Pa ipak, ukoliko se koriste postupci koji imaju smisla s obzirom na tip ovih podataka, može se reći da izbor odgovarajućih postupaka interpolacije ne može značajnije da utiče na sveukupnu tačnost DMT-a. Izbor odgovarajuće metode interpolacije bitno utiče na tačnost visina DMT-a u kritičnim oblastima (vododelnice, vodoslivnice, sedla, vrhovi, dna) kao i na morfološki kvalitet DMT-a u ovim oblastima.

Kvalitet podataka raspoloživih na postojećim podlogama se može posmatrati i ocenjivati preko sledećih pokazatelja:

- položajna i visinska tačnost tačaka preko koji je površ terena predstavljena na kartama, pri čemu tu treba uzeti u obzir tačnost primarnog prikupljanja i kartiranja podataka, kao i tačnost prevođenja ovih podataka u digitalni oblik;
- nivo detaljnosti (stepen generalizacije) sa kojim su predstavljene pojave i objekti kojima se opisuje površ terena;
- načina na koji su neke pojave i objekti na površi terena predstavljene na karti (morfološki kvalitet prikaza, prikaz simbolima ili u razmeri, i sl.);
- vrste i količine informacija koje su na raspolaganju za modeliranje površi terena (da li su pored izohipsi na raspolaganju i kote karakterističnih tačaka terena, strukturne i prelomne linije, i sl.);
- ažurnosti podataka, tj. stepenom saglasnosti sadržaja karte sa stanjem na terenu, s obzirom na promene koje su se desile na terenu od momenta poslednjeg ažuriranja karte.

Ako se izuzme ažurnost podataka može se uopšteno konstatovati da je kvalitet podataka po svim ostalim pokazateljima određen i uslovljen razmerom karte. Pa ipak, poželjno je da se jasnije sagleda uticaj pojedinih faktora na DMT formiran na osnovu podataka dobijenih digitalizacijom postojećih podloga.

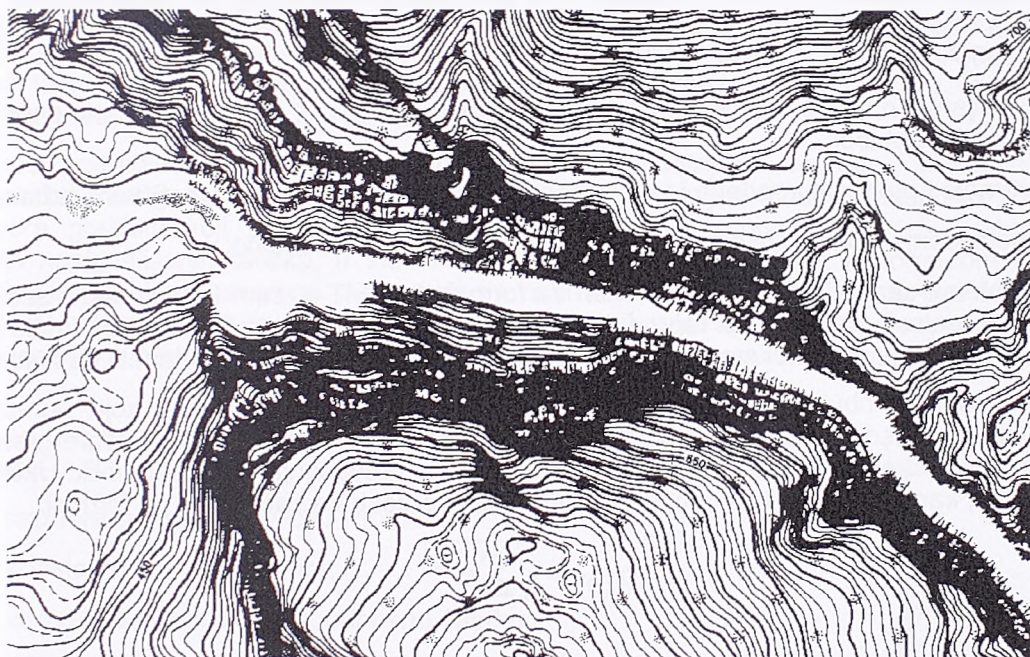


Ovo će svakako pomoći da se optimizuju pojedine operacije u okviru celokupne tehnologije formiranja nacionalnog DMT-a, ali i da se dođe do jedne objektivne procene kvaliteta tog DMT-a. Za postizanje tog cilja na raspolaganju su sledeći pristupi i tehnike:

- analiza primenjene tehnologije rada za prikupljanje podataka i izradu karata;
- utvrđivanje uticaja pojedinih izvora grešaka na osnovu postojećih standarda iz literature i prakse;
- eksperimentalno utvrđivanje uticaja pojedinih izvora grešaka korišćenjem posebno izabranih uzoraka podataka sa karata i podataka iz drugih izvora i njihova statistička i numerička obrada;
- analiza sadržaja na kartama.

Kvalitet podataka visinske predstave terena na TK25 je vrlo visok, posebno kada je u pitanju geomorfološki kvalitet prikaza visinske predstave terena. Ovo je rezultat primene direktnog izvlačenja izohipsi na fotogrametrijskim instrumentima, kao dominantne strategije za prikupljanje podataka visinske predstave terena. Sa druge strane, ovakav način rada je verovatno u znatnoj meri snizio visinsku i položajnu tačnost izohipsi u brdovitim i planinskim područjima obraslim gustom šumom sa visokim stablima.

Kada je reč o načinu prikaza pojedinih pojava (zemljišni oblici) i objekata na površi terena može se konstatovati da na kartama postoje određena područja za koja je vrlo teško preuzeti dovoljno kvalitetne podatke. To su uglavnom mesta na kojima je teren izuzetno strm, nepravilne i stenovite strukture. Tipičan primer takovog terena su rečne klisure. Na tim mestima visinska predstava terena i sam reljef su prikazani više sa ciljem da se slikovitije i vernije opiše sam reljef, nego da se matematički egzaktno predstavi ta površ. Tu ili nema visinskih informacija, ili je njihova digitalizacija izuzetno otežana. Primer takvog terena je predstavljen na sledećoj slici.



Slika 5-2 : Primer terena složene strukture sa kartografskom predstavom koja izuzetno komplikuje rekonstrukciju površi terena na osnovu digitalizovanih podataka

Ažurnost sadržaja koji se odnosi na visinsku predstavu terena kod TK25 je, sa jedne strane, uslovljena vrlo dugim ciklusom ažuriranja ovih karata, a sa druge, relativno malim nivoom promena na terenu, s obzirom na to da se radi o visinskoj predstavi terena i s obzirom na razmeru karte tj. nivo i detaljnost sadržaja karte. U tom smislu, svakako da je kvalitet podataka kod ODK osetljiviji na neažurnost podloga. Visinska predstava terena na TK25 je uglavnom prikupljena za čitavu teritoriju države do 1965. godine i nije naknadno ažurirana u većem obimu. Kada je u pitanju ODK, već je rečeno da je ovom kartom pokriveno oko 40% državne teritorije. Od postojećih karata, oko 65% se odnosi na karte urađene u periodu od 1948. do 1970. godine, oko 20% su karte rađene u periodu od 1970. do 1980. godine, oko 10% su karte rađene od 1980. do 1990., a samo 5% su karte rađene posle 1990. godine.

Najveće i najznačajnije promene na površi terena su svakako prisutne na područjima pod velikim površinskim kopovima. Ove promene ne predstavljaju veći problem s obzirom da su to poznate lokacije.



Pored ovih, značajne su i promene u pojedinim urbanim sredinama, industrijskim zonama, deponijama i sl. Od ostalih promena značajne su jedino promene kod izgradnje većih objekata kao što su brane, aerodromi, i sl.

U okviru ovog poglavlja sledi jedna objektivna ocena tačnosti podataka sadržanih na TK25. U obzir je uzet samo geometrijski kvalitet podataka (visine). Odgovarajuća analiza za ODK nije sprovedena pošto su ove podloge u prvoj fazi formiranja nacionalnog DMT-a manje atraktivne. Pored toga, ove podloge su znatno heterogenije po tehnologijama korišćenim za njihovu izradu. Uz to, njihova ocena tačnosti zahteva znatno kvalitetnije kontrolne podatke, pa je procenjeno da to sa aspekta ovog istraživanja nije racionalno u ovom trenutku.

Sledi proračun tačnosti visina baziran na analizi izvora grešaka koji prate predloženu metodologiju prikupljanja visinskih podataka sa TK25, a zatim i eksperimentalna provera sračunatih vrednosti i definitivna ocena tačnosti postojećih podataka visinske predstave TK25.

### 5.3.3.1 Proračun tačnosti visinske predstave TK25

Cilj ove analize je da se nakon eksperimentalnog utvrđivanja tačnosti dobijenog DMT-a proveriti da li su dobijeni očekivani rezultati, tj. da se proveriti da li je došlo do nekih propusta u samom postupku izrade DMT-a. Polazne pretpostavke za proračun tačnosti podataka koji su sadržani na postojećim vojnotopografskim kartama 1:25000 su:

- osnovna metoda koja je korišćena za prikupljanje podataka je restitucija na analognim fotogrametrijskim instrumentima, na osnovu fotomaterijala sa razmerama snimanja 1:30000, 1:33000 i 1:26000;
- prikupljanje najveće količine visinskih podataka (izohipse) urađeno je primenom direktnog izvlačenja izohipsi;
- kartiranje kota tačaka rađeno je merenjem položaja i visina tačaka u statičkom režimu rada;
- generalisanje izohipsi tokom kartografske obrade bilo je minimalno;
- kompletan sadržaj koji je interesantan za formiranje DMT-a, sem kota karakterističnih tačaka i trigonometara, nanet je na reprodukcijске originale koji za georeferenciranje imaju samo četiri markera u uglovima korisnog prostora (naravno, celokupan sadržaj je nanet i na kolorne karte).

Ovom analizom obuhvaćeni su i analizirani najznačajniji izvori grešaka koje određuju kvalitet DMT-a dobijenog na osnovu digitalizacije podataka sa TK25. To podrazumeva sve izvore grešaka kako u procesu izrade visinske predstave tako i u postupku njihovog prevođenja u digitalni oblik. Ukupna srednja visinska greška, kao pokazatelj tačnosti podataka visinske predstave, računa se po formuli:

$$\sigma_{HP} = \sqrt{\sum \sigma_i^2} \quad (5-1)$$

gde je:

$\sigma_{HP}$  - greška visine dobijene digitalizacijom sadržaja sa postojeće podloge,

$\sigma_i$  - greška koja je nastala obradom podataka u određenoj fazi radova.

Najznačajniji izvori grešaka koji mogu uticati na kvalitet DMT, i koje treba imati u vidu prilikom proračuna tačnosti su:

a) primarno prikupljanje podataka visinske predstave (fotogrametrijska restitucija):

- greške orijentacije fotogrametrijskog modela;
- greške kartiranja (spuštanje markice fotogrametrijskog instrumenta i izvlačenje izohipsi);
- greške kartografske obrade;

b) greške nastale nakon kartiranja i u toku sekundarnog prikupljanja podataka tj. prevođenja podataka u digitalni oblik:

- greške deformacija podloge;

- greške skeniranja;
- greške georeferenciranja skenirane podloge;
- greške digitalizacije (vektorizacija izohipsi i drugih linija i digitalizacija pojedinačnih tačaka).

#### 5.3.3.1.1 Primarno prikupljanje podataka visinske predstave TK25

Greške koje su nastale u procesu primarnog prikupljanja podataka je teško odstraniti iz podataka. Izuzetak su grube greške koje su jasno uočljive. Ove greške se mogu otkloniti na osnovu ostalih podataka. Tipičan primer ovih grešaka su pogrešne visine trigonometara, karakterističnih tačaka ili izohipsi.

Greške orijentacije fotogrametrijskog modela su najviše uslovljene tačnošću i rasporedom orijentacionih tačaka i tačnošću instrumenata na kojima se meri. U procesu prikupljanja podataka visinske predstave terena za TK25 uglavnom nije rađena aerotriangulacija. Koordinate orijentacionih tačaka su određivane direktno na terenu, a sami parovi su rešavani odvojeno, tako da sam postupak nije pouzdan. Postoji mogućnost da za neke modele nije ostvaren povoljan raspored i broj tačaka za orijentaciju modela. Za potrebe analize vršene u okviru ovog rada nisu bili na raspolaganju podaci koji bi omogućili utvrđivanje uticaja ovog izvora grešaka na tačnost prikupljenih podataka.

Kao i kod drugih metoda, tačnost fotogrametrijski dobijenih digitalnih podataka visinske predstave se može posmatrati dvojako. Pre svega, tu je aspekt tačnosti određivanja koordinata pojedinačnih tačaka. Drugi aspekt predstavlja tačnost (vernost) predstave terena koja je uslovljena, kako tačnošću koordinata pojedinačnih tačaka, tako i gustom i rasporedom tih tačaka po zahvaćenom području. Ovaj drugi aspekt ovde neće biti posebno razmatran, jer ga je teško egzaktno prikazati.

Tačnost određivanja visina primenom aerofotogrametrijske metode snimanja i obrade fotomaterijala na analognim fotogrametrijskim instrumentima, uzimajući u obzir standardne postupke i sve ključne izvore grešaka koji prate ovu metodu razmatrana je u poglavlju 2.1.5. Tačnost merenja pojedinačnih nesignalisanih tačaka, u stacionarnom režimu rada, izražena je formulom (2-8), dok je tačnost visina za izohipse izmerene u dinamičkom režimu rada data preko Koppe-ove formule (2-11) i formule (2-14). Razmatrana je tačnost samo kod merenja visina, jer je opšte poznato da je kod aerofotogrametrijske metode tačnost određivanja visina tačaka po pravilu niža od određivanja njihovog položaja.

Ako se ove formule primene na podatke prikupljene u okviru izrade TK25 i ako se usvoje sledeće pretpostavke:

- razmera snimanja 1:26000 i 1:33000;
- konstanta kamere 150mm;
- visina leta aviona 3900m, odnosno 4950m;
- razmera kartiranja 1:25000.

mogu se sračunati greške visinske predstave u zavisnosti od nagiba terena  $\alpha$  (Tabela 5-1)

Iz dobijenih vrednosti se vidi da tačnost visinske predstave najviše zavisi od nagiba terena. Kada je reč o fotogrametriji treba posebno voditi računa o greškama kod prikupljanja podataka za pošumljena područja. Ove greške kod DMT podataka su najčešće i najveće po svojoj vrednosti. Greške se javljaju zbog nemogućnosti merenja tačaka direktno na terenu obraslom gustom šumom i što su visine stabala u takvoj šumi po pravilu nepoznate. Kartiranje visinske predstave terena za ova područja vrši se zato uglavnom na osnovu iskustva restitutora. Kartiranje započinje od ivice šume, gde je inače moguće spustiti markicu. Nakon toga, pravi se paralaksa koja odgovara procenjenoj visini drveća na ivici šume. Markica se zatim vodi po šumi, tj. izvlači se izohipsa, vodeći pri tome računa da se paralaksa održava konstantnom. Sve ovo se radi pod pretpostavkom da je visina drveća u šumi konstantna. Zbog ove pretpostavke, postoje velike mogućnosti da se naprave značajne greške kod kartiranja izohipsi, koje su vrlo često i subjektivne prirode.



Nagib terena $\alpha$ [°]	Rs = 1:26000		Rs = 1:33000	
	Tačke $\sigma_{HF}$ [m]	Izohipse $\sigma_{HF}$ [m]	Tačke $\sigma_{HF}$ [m]	Izohipse $\sigma_{HF}$ [m]
0	0.67	1.17	0.74	1.49
5	0.67	1.61	0.83	1.92
10	0.76	2.05	0.92	2.37
15	0.85	2.51	1.01	2.82
20	0.95	2.99	1.11	3.30
25	1.05	3.50	1.21	3.82
30	1.16	4.06	1.32	4.37
35	1.29	4.67	1.44	4.99
40	1.42	5.37	1.58	5.68
45	1.59	6.17	1.74	6.48

Tabela 5-1 : Greške fotogrametrijskog merenja visina za pojedinačne tačke i izohipse kod izrade TK25

Postupak rada u toku iscrtavanja izohipsi u Vojnogeografskom institutu je takav da se ne sprovodi značajnije generalisanje izohipsi, što znači da su ove greške zanemarljive. Inače, čak i da ove greške postoje i da nisu zanemarljive, bilo bi vrlo teško odrediti njihovu veličinu i karakter.

### 5.3.3.1.2 Greške nastale nakon kartiranja i u postupku sekundarnog prikupljanja podataka

Greške nastale nakon kartiranja uglavnom se odnose na deformacije podloge tj. kartografskog materijala. Veličina i karakter deformacija podloge najviše zavisi od kvaliteta i načina čuvanja podloga. Oleate TK25 su rađene na podlogama visokog kvaliteta i moglo bi se očekivati da te deformacije nisu značajne. U okviru ovog istraživanja ove deformacije nisu posebno razmatrane i ocenjivane, već zajedno sa deformacijama koje nastaju u procesu skeniranja podloge. Ovo bi inače imalo smisla razdvojiti, jer ukoliko se utvrdi da su greške deformacija podloge znatno manje u odnosu na greške skeniranja, onda se opravdano postavlja pitanje izbora drugog skenera. S obzirom da je kompletan topografski materijal za TK25 već skeniran, ovo pitanje gubi na značaju.

Greške tokom sekundarnog prikupljanja podataka razumljivo nastaju prilikom prevođenja podataka u digitalni oblik. Imajući u vidu da se ovaj postupak obavlja u toku izrade projekta DMT25, odabirom odgovarajućeg instrumentarija i metode rada može se uticati na smanjenje veličine ovih grešaka.

Greške koje su posledica deformacija skenirane slike sadrže u sebi greške nastale usled deformacije same podloge i deformacija prouzrokovanih skeniranjem. Ove greške su posebno interesantne jer na većini reprodukcijских originala TK25 postoje samo 4 pasera u uglovima korisnog prostora karte tako da je jedino moguće izvršiti georeferenciranje afinom transformacijom sa 4 tačke. Na ovaj način nije moguće za ove listove utvrditi i otkloniti deformacije skenirane slike, što može značajno da utiče na položajnu tačnost digitalizovanog sadržaja. Greške skeniranja nastaju kao posledica dva uticaja. Prvi nastaje kao posledica lošeg aliniranja (podešavanja) CCD senzora, a drugi usled proklizavanja podloge prilikom prolaska kroz transportni mehanizam.

U cilju određivanja veličine i karaktera deformacija skeniranih listova TK25 izvršen je odgovarajući eksperiment i analiza rezultata (Stojanović 2004). Za realizaciju eksperimenta izabran je softver DigiScan, koji je namenjen za kalibraciju, rektifikaciju i georeferenciranje skeniranih geodetskih podloga. Detaljniji prikaz ovog softvera i njegovih mogućnosti dat je u poglavlju 5.7.2.1. U pomenutom eksperimentu analizirani su skenirani reprodukcijски originali situacije TK25. Obradeno je ukupno 48 listova koji

pokrivaju tri odvojena, reprezentativna područja. Svako od tih područja odgovara teritoriji koju pokriva jedna vojnotopografska karta razmere 1:100000 i to: Sjenica, Beograd i Novi Sad. Ova područja su izabrana tako da se topografski materijal razlikuje po tipu terena i epohi izrade karte, odnosno starosti podloga. Za sve listove u DigiScan-u izvršeno je georeferenciranje i utvrđivanje deformacija korišćenjem:

- afine transformacije na osnovu merenja na 4 tačke u uglovima korisnog prostora karte;
- afine transformacije na osnovu svih izmerenih referentnih tačaka koordinatne mreže karte, i
- kolokacije sa filtriranjem, takođe na osnovu svih izmerenih referentnih tačaka.

Tabela C-1 (u dodatku C) sadrži rezultate eksperimenta. Na osnovu odstupanja nakon izravnjanja sračunate su srednje kvadratne greške georeferenciranja  $m_x$  i  $m_y$  za sva tri načina georeferenciranja.

Iz dobijenih rezultata može se zaključiti da su srednje kvadratne greške georeferenciranja primenom afine transformacije na osnovu 4 tačke neobjektivne. Jasno je da razlog za to leži u maloj redundantnosti podataka, tj. malom statističkom uzorku ( $4 \times 2 = 8$  merenja) u odnosu na broj stepeni slobode (6 parametara afine transformacije). Sa druge strane, upoređenje srednjih kvadratnih grešaka georeferenciranja primenom afine transformacije i kolokacije sa filtriranjem na osnovu svih tačaka koordinatne mreže jasno pokazuje da su skenirane podloge pretrpele deformacije lokalnog karaktera. Ove deformacije mogu se otkloniti samo primenom kolokacije ili neke druge transformacije sa više stepeni slobode, kao što je na primer polinomska transformacija.

Na osnovu ovako izvršenih georeferenciranja za sve referentne tačke sa skenirane podloge (sve tačke koordinatne mreže karte) sračunate su pravougla Gaus-Kriggerove koordinate korišćenjem odgovarajućih parametara georeferenciranja, tj. transformacije. Razlike između koordinata dobijenih primenom različitih modela georeferenciranja poslužile su kao osnov za utvrđivanje grešaka koje su posledica deformacija lokalnog karaktera i koje inače nije moguće utvrditi afinom transformacijom na osnovu 4 referentne tačke.

Da bi se dobila objektivnija procena greške georeferenciranja primenom afine transformacije na osnovu 4 tačke primenjen je sledeći postupak. Na osnovu dobijenih vrednosti sračunata je srednja kvadratna greška razlike između kolokacije i afine transformacije sa 4 tačke, po sledećim formulama:

$$m_{(CF-A4)_Y} = \sqrt{\frac{v_y^T \cdot v_y}{n-1}} \quad (5-2)$$

$$m_{(CF-A4)_X} = \sqrt{\frac{v_x^T \cdot v_x}{n-1}} \quad (5-3)$$

gde je:

$$v_{yi} = Y_i^{CF} - Y_i^{A4} \quad (5-4)$$

$$v_{xi} = X_i^{CF} - X_i^{A4} \quad (5-5)$$

Na kraju je sračunata jedna "objektivna" greška georeferenciranja primenom afine transformacije na osnovu 4 tačke po formulama:

$$m_{A4_Y} = \sqrt{m_{(CF-A4)_Y}^2 - m_{CF_Y}^2} \quad (5-6)$$

$$m_{A4_X} = \sqrt{m_{(CF-A4)_X}^2 - m_{CF_X}^2} \quad (5-7)$$

Naravno, ova "objektivna" greška može se sračunati po prethodnim formulama samo uz uslov da su greške  $m_{A4}$  i  $m_{CF}$  nezavisne stohastičke veličine. Ovo svakako nije slučaj pošto kolokacija polazi od analize vektora grešaka na referentnim tačkama preostalim nakon afine transformacije. Međutim, uzimanje u obzir ove činjenice i njeno striktno poštovanje veoma bi iskomplikovalo izvođenje fomule za proračun nepoznate greške  $m_{A4}$ . Zato vrednosti sračunate po formulama (5-6) i (5-7) treba uzeti sa rezervom. Položajna greška kod digitalizacije koja je posledica grešaka u georeferenciranju (uključujući to i deformacije podloge), ako se zanemari greška same digitalizacije, tj. merenja na skeniranoj podlozi je onda:



$$m_G = \sqrt{m_x^2 + m_y^2} \quad (5-8)$$

Na osnovu rezultata eksperimenta mogu se doneti sledeći zaključci:

- kolokacija sa filtriranjem otklanja deformacije skenirane podloge na nivo manji od 2 m (znatno manje od  $0.1\text{mm} \times M$ , gde je  $M$  imenilac razmere) po obe ose, pri čemu su prosečne srednje kvadratne greške georeferenciranja:

$$m_y=1.40 \text{ m}, m_x=0.98 \text{ m}, m_G=1.71\text{m};$$

- afina transformacija ne može da otkloni deformacije čak i kada se koriste sve tačke, ali realno pokazuje grešku georeferenciranja:

$$m_y=3.21 \text{ m}, m_x=2.67 \text{ m}, m_G=4.17\text{m};$$

- upoređenjem koordinata transformisanih korišćenjem afine transformacije na osnovu merenja svih tačaka koordinatne mreže i odgovarajućih koordinata kod kojih su otklonjene deformacije primenom kolokacije sa filtriranjem može se zaključiti da su deformacije podloge značajne i lokalnog su karaktera; na osnovu ovog eksperimenta ne može se konstatovati da li su one posledica deformacija podloge ili grešaka skeniranja;

- georeferenciranje primenom afine transformacije na osnovu 4 tačke daje nerealno niske prosečne srednje kvadratne greške, posebno za  $m_y$ :

$$m_y=1.93 \text{ m}, m_x=2.33 \text{ m}, m_G=3.02\text{m};$$

- upoređenjem koordinata sračunatih afinom transformacijom na osnovu 4 tačke i onih sračunatih kolokacijom dobijene su dosta realnije prosečne srednje kvadratne greške:

$$m_y=4.24 \text{ m}, m_x=2.99 \text{ m}, m_G=5.19\text{m};$$

- maksimalne vrednosti objektivne greške georeferenciranja primenom afine transformacija na osnovu 4 tačke (iz upoređenja sa rezultatima kolokacije) dobijene su za list Novi Sad 378-1-4:

$$m_y=6.84 \text{ m}, m_x=4.47 \text{ m}, m_G=8.17\text{m};$$

- rezultati pokazuju da se za neke listove mogu očekivati veoma velike greške georeferenciranja ako se koriste samo četiri tačke.

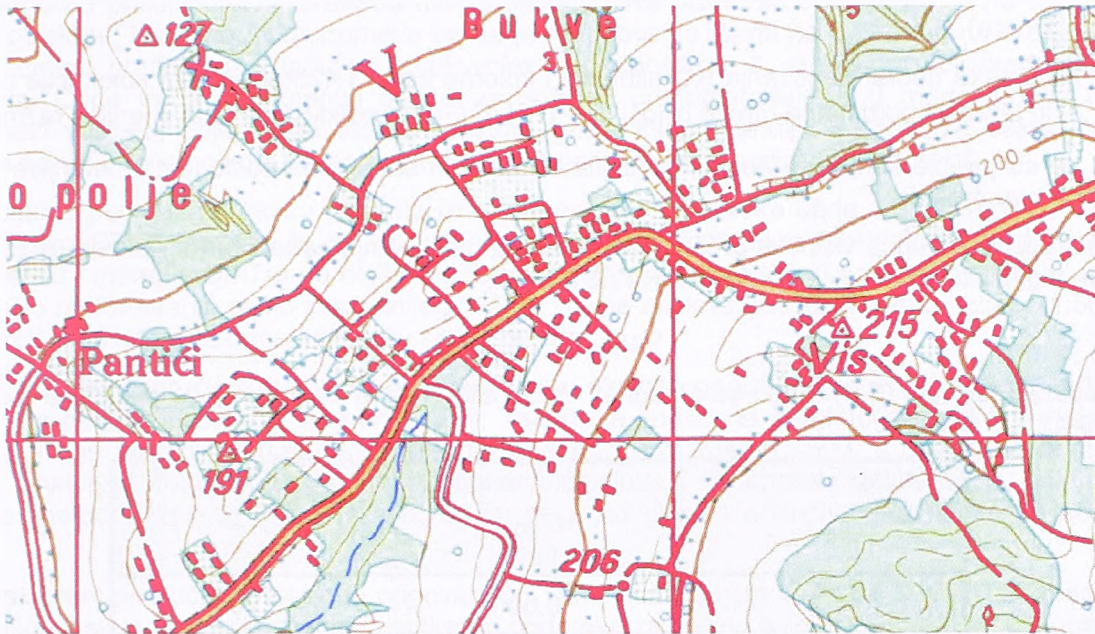
Posebno treba istaći to da afina transformacija sa 4 tačke ne samo da ne može da otkloni deformacije, nego je i nepouzdana, jer su srednje kvadratne greške u nekim slučajevima nerealno niske. Na ovo nedvosmisleno ukazuje upoređenje ovako transformisanih koordinata sa koordinatama kod kojih su otklonjene deformacije primenom kolokacije sa filtriranjem, pri čemu se dobijaju velika odstupanja. Isto tako, važno je još jednom napomenuti da su ovde za sve analize korišćeni reprodukcijски originali situacije, dakle sa kompletnom matematičkom osnovom, tj. koordinatnom mrežom Gaus-Krugerove projekcije i mrežom meridijana i paralela. Logično je očekivati da tu ne mogu proćaci grube greške, bilo da je reć o greškama nastalim kod kartiranja same osnove, kod skeniranja, ili prilikom merenja referentnih taćaka i georeferenciranja. Sa druge strane, kod georeferenciranja podloga samo na osnovu ćetiri taćke, sasvim je realno pretpostaviti da se takve greške mogu prevideti, jer samo georeferenciranje i transformacija nisu u stanju da signaliziraju postojanje tih grešaka. Ovo dodatno dovodi u pitanje pouzdanost georeferenciranja na osnovu ćetiri taćke.

U Vojnogeografskom institutu je već izvedeno skeniranje i georeferenciranje većine reprodukcijskih originala situacije, visinske predstave i kolorne karte TK25. Preklapanjem skeniranih i georeferenciranih podloga u radnom okruženju softverskog paketa *MapSoft* (a i nekih drugih softverskih paketa) potvrćeni su rezultati do kojih se došlo u ovom eksperimentu. Naime, za radne originale situacije i kolorne karte koji su potpuno nezavisno skenirani i georeferencirani uoćljivo je izuzetno dobro slaganje sadržaja (Slika 5-3). Ovo potvrćuje kvalitet otklanjanja grešaka primenom kolokacije na osnovu svih taćaka koordinatne mreže karte i slaže se sa vrednostima dobijenim u okviru ovog eksperimenta ( $m_{CG}=1.71\text{m}$ ). Obrada velikog broja listova RO situacije i kolornih karata TK25 su ovo i potvrćili (Tabela 5-2 i Tabela 5-3).



356 listova RO situacije TK25	Broj tačkaka	m <sub>AX</sub>	m <sub>AY</sub>	m <sub>AG</sub>	m <sub>CX</sub>	m <sub>CY</sub>	m <sub>CG</sub>
Prosečno	191	3.286	2.504	4.131	1.285	0.981	1.617
Max		6.815	7.316	10.000	2.600	1.978	3.267
Standardna devijacija	6.16	0.457	0.563	0.725	0.330	0.276	0.430

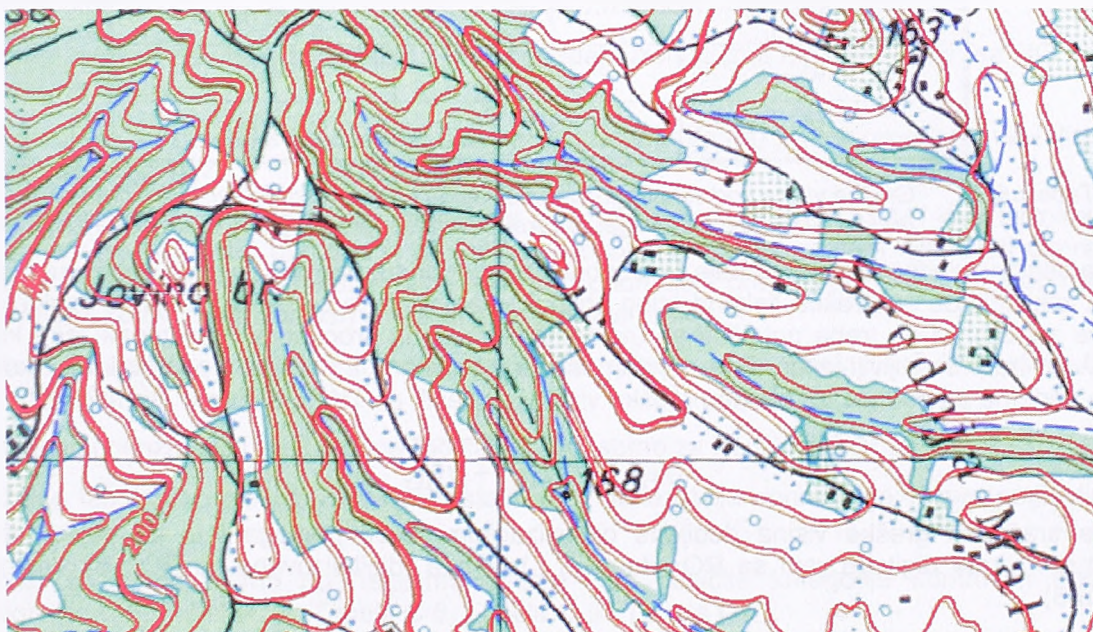
Tabela 5-2 : Greške georeferenciranja skeniranih RO situacije TK52 (na osnovu obrade 356 lista)



Slika 5-3 : Tipičan primer slaganja sadržaja nezavisno georeferenciranih RO situacije (crveno) i kolorne karte TK25

308 listova kolorne karte TK25	Broj tačkaka	m <sub>AX</sub>	m <sub>AY</sub>	m <sub>AG</sub>	m <sub>CX</sub>	m <sub>CY</sub>	m <sub>CG</sub>
Prosečno	187	2.955	2.469	3.851	1.390	0.980	1.701
Max		5.307	4.328	6.848	2.444	1.997	3.156
Standardna devijacija	9.59	0.587	0.626	0.858	0.340	0.225	0.902

Tabela 5-3 : Greške georeferenciranja kolorne karte TK52 (na osnovu obrade 308 listova)



Slika 5-4 : Tipičan primer slaganja sadržaja nezavisno skeniranih i georeferenciranih RO visinske predstave (crveno) i kolorne karte TK25



Preklapanjem sadržaja skeniranih i georeferenciranih podloga reprodukcijских originala visinske predstave (afina transformacija na osnovu 4 pasera) i kolorne karte pokazuje vrlo velika odstupanja na pojedinim delovima (Slika 5-4). Ova odstupanja idu i do 1mm (25m u prirodi) što potvrđuje velike vrednosti za greške georeferenciranja na osnovu 4 tačke dobijene u okviru ovog eksperimenta.

Ako se usvoje pretpostavke:

- da greška georeferenciranja RO visinske predstave primenom afine transformacije na osnovu 4 pasera u uglovima korisnog prostora iznosi  $\sigma_G=5.19m$  ( $\sim 0.21mm \times M$ , gde je M imenilac razmere),
- da greška georeferenciranja RO situacije i kolorne karte TK25 primenom kolokacije na osnovu svih tačaka koordinatne mreže iznosi  $\sigma_G=1.71m$  ( $\sim 0.07mm \times M$ , gde je M imenilac razmere), i
- da su greške samog merenja kod digitalizacije svih entiteta sa podloge zanemarljive u odnosu na ovu grešku,

može se sračunati ukupna visinska greška sekundarnog prikupljanja podataka (digitalizacije) za izohipse, primenom digitalizacije RO visinske predstave po formuli:

$$\sigma_{HD} = \sigma_G \cdot \operatorname{tg}\alpha \quad (5-9)$$

Koristeći formulu (5-9) mogu se sračunati vrednosti grešaka visina koje su posledica digitalizacije (Tabela 5-4).

Nagib terena $\alpha$ [°]	Pojedinačne tačke $\sigma_{HD}$ [m]	Izohipse $\sigma_{HD}$ [m]
0	0.00	0.00
5	0.15	0.45
10	0.30	0.92
15	0.46	1.39
20	0.62	1.89
25	0.80	2.42
30	0.99	3.00
35	1.20	3.63
40	1.43	4.35
45	1.71	5.19

Tabela 5-4 : Greške visina kod sekundarnog prikupljanja podataka sa RO visinske predstave (obuhvata greške deformacija podloge, greške skeniranja, greške georeferenciranja i digitalizacije)

Na osnovu vrednosti iz ove tabele i vrednosti grešaka primarnog prikupljanja podataka (Tabela 5-1) može se zaključiti da su greške sekundarnog prikupljanja podataka sa reprodukcijских originala visinske predstave značajne i da treba pokušati sa uvođenjem dodatnih procedura u postupak rada koje bi ove greške svele na prihvatljiviji iznos. Ove mogućnosti su analizirane u narednim poglavljima. Ukoliko se ne uvedu te dodatne procedure, za ukupnu grešku visina dobijenih sa TK25, a prema formuli:

$$\sigma_{HP} = \sqrt{\sigma_{HF}^2 + \sigma_{HG}^2} \quad (5-10)$$

moгу se sračunati greške visina dobijene digitalizacijom TK25 podloga i to za pojedinačne tačke (trigonometri i kote digitalizovani sa RO situacije) i izohipse (digitalizovane sa RO visinske predstave) (Tabela 5-5).

korišćenjem stereorestitucije (test područja: Vrčin, Barajevo, Sopot i Lazarevac) – za ove projekte u radu je ponegde korišćena oznaka ODK5+DOF5.

Svi DOF5 projekti realizovani su korišćenjem snimaka iz aerofotogrametrijskog snimanja razmere 1:14500. Izuzetak je test područje Kruševac za koje su korišćeni snimci iz aerofotogrametrijskog snimanja razmere 1:26000. Visinski podaci u okviru ovih projekata prikupljani su kombinacijom manuelnih procedura (selektivni i sistematski sampling) i automatskih procedura za ekstrakciju DMT podataka primenom digitalne korelacije snimaka. Strukturne i prelomne linije terena, kao i karakteristične visinske tačke obavezno su prikupljane za svaki od ovih projekata. Sve visine se odnose na površ terena bez vegetacije i objekata. Naravno, podrazumeva se da je redukovanje visina na površ terena u područjima sa gustom šumom urađeno u skladu sa objektivnim mogućnostima, tj. procenom operatera kolika je visina stabala. Ovde treba napomenuti da su za potrebe ortofotoprodukcije u model površi terena uključeni i neki veštački objekti kao što su mostovi, nadvožnjaci, kanali i sl. Reč je, dakle, o svim objektima na površi terena za koje je bilo potrebno obezbediti korektnu poziciju na ortofotou.

Prikupljanje podataka u okviru projekta izrade digitalne topografske karte 1:5000 (DTK5) za test područje Beograd DTK5 izvršeno je na isti način kao i za DOF5 projekte (aerofotogrametrijski snimci razmere 1:14500 i merenje DMT-a na digitalnim fotogrametrijskim sistemima). Izvesna razlika je u tome što se ovde išlo na formiranje nešto kvalitetnijeg DMT-a koji se zahteva kod kartiranja u razmeri 1:5000, a ne na DMT koji je dovoljan za ortorektifikaciju snimaka.

Podaci za test područje Kragujevac prikupljeni su u okviru topografskog snimanja razmere 1:1000 realizovanog za potrebe državnog premera (TP1). Takođe je korišćena aerofotogrametrijska metoda, s tom razlikom što je aerofotogrametrijsko snimanje izvedeno u razmeri 1:4500, a podaci su prikupljeni korišćenjem analognih fotogrametrijskih instrumenata. Za jedan deo područja vršeno je prikupljanje podataka po metodi selektivnog samplinga, a za drugi su podaci prikupljeni direktnim izvlačenjem izohipsi.

Za svako test područje formiran je odgovarajući DMT korišćenjem softvera *Surfling*. Ovaj softver i *MapSoft* korišćeni su i u fazi prikupljanja i verifikacije podataka za većinu ovih projekata. Svi eksperimenti su takođe realizovani korišćenjem ovih softverskih paketa. To je takođe trebalo da posluži i kao njihova svojevrsna verifikacija, jer se slični poslovi moraju očekivati i sprovoditi i tokom formiranja nacionalnog DMT-a.

TK25 podaci prikupljeni su u okviru projekta digitalizacije postojećih TK25 karata koji je pokrenut u Vojnogeografskom institutu. Georeferenciranje RO (oleata) visinske predstave vršeno je samo na osnovu četiri pasera u uglovima korisnog prostora karte. Kote i trigonometri su digitalizovani sa RO situacije koji su georeferencirani korišćenjem svih temena matematičke osnove (temena mreže meridijana i paralela i koordinatne mreže). Georeferenciranje, kao i utvrđivanje i otklanjanje deformacija za ove podloge vršeno je korišćenjem softvera *DigiScan*. Izohipse su digitalizovane korišćenjem postupaka poluautomatske vektorizacije, a zatim je vršeno njihovo korigovanje na spojevima listova karata. Za ovako dobijene podatke sa TK25 koji se odnose na izabrana test područja izvršeno je sledeće:

- pripremljene su datoteke sa tačkama koje pripadaju izohipsama digitalizovanim sa RO visinske predstave TK25;
- pripremljene su datoteke sa karakterističnim tačkama (kotama) i trigonometrima digitalizovanih sa RO situacije TK25.

Za svaku od tačaka iz pripremljenih datoteka interpolovane su visine iz DMT-ova formiranih na osnovu podataka više tačnosti i upoređene sa visinama dobijenim digitalizacijom. Rezultati upoređenja dati u dodatku C predstavljani su detaljno za svako test područje i pregledno po test područjima, tipu visina (trigonometri, kote i tačke izohipsi) i nagibima terena, i to preko:

- detaljnih izveštaja sa statističkim pokazateljima upoređenja visina (poglavlje C.5, Izveštaj C-1 do Izveštaj C-24);
- grafičkog prikaza odstupanja visina (poglavlje C.6, samo za Beograd DTK5, Slika C-3);
- sažetog tabelarnog prikaza najvažnijih statističkih pokazatelja upoređenja visina (poglavlje C.7, Tabela C-3);
- tabela sa odstupanjima po nagibima terena i za različite kategorije kontrolnih podataka (poglavlje C.8, Tabela C-4, Tabela C-5, Tabela C-6 i Tabela C-7).

Kao što se iz priloženih tabela (Tabela C-4, Tabela C-5, Tabela C-6 i Tabela C-7) može zaključiti, radi se o izuzetno velikoj količini podataka (2154833 tačke izohipsi, 2486 trigonometara i 1518 kota).



Nagib terena $\alpha$ [°]	Rs = 1:26000		Rs = 1:33000	
	Tačke	Izohipse	Tačke	Izohipse
	$\sigma_{HF}$ [m]	$\sigma_{HF}$ [m]	$\sigma_{HF}$ [m]	$\sigma_{HF}$ [m]
0	0.59	1.17	0.74	1.49
5	0.69	1.67	0.84	1.98
10	0.82	2.25	0.97	2.54
15	0.97	2.87	1.11	3.15
20	1.13	3.54	1.27	3.81
25	1.32	4.26	1.45	4.52
30	1.53	5.04	1.65	5.30
35	1.76	5.92	1.87	6.17
40	2.02	6.91	2.14	7.16
45	2.33	8.06	2.44	8.31

Tabela 5-5 : Greške digitalizovanih visina sa TK25 (primarno prikupljanje - fotogrametrijska restitucija, georeferenciranje RO visinske predstave - 4 pasera u uglovima karte)

### 5.3.3.2 Eksperimentalna ocena tačnosti visinske predstave TK25

Da bi se proverilo da li se proračunata visinska tačnost podataka sa TK25 (Tabela 5-5) može realno i postići digitalizacijom postojećih TK25 karata izveden je veliki broj eksperimenata. U okviru svih tih eksperimenata korišćeni su realni podaci iz više različitih izvora. Cilj eksperimenata je bio da se visine dobijene digitalizacijom podataka sa TK25 (kote, trigonometri i tačke izohipsi) uporede sa visinama dobijenim interpolacijom iz digitalnih modela terena formiranih na osnovu podataka više tačnosti od one koja se očekuje za TK25 podatke. Ideja je bila da se izbegne formiranje DMT-a na osnovu podataka dobijenih sa TK25 da bi se greške modeliranja površi terena eliminisale iz dobijenih rezultata. Procena je da su greške interpolacije visina, tj. greške modeliranja terena na osnovu podataka više tačnosti, znatno manje u odnosu na tačnost podataka TK25 i da neće bitno promeniti dobijene rezultate upoređenja. Podaci korišćeni u okviru eksperimenata i dobijeni rezultati predstavljeni su detaljno u dodatku C.

Za potrebe eksperimenta korišćeni su podaci visinske predstave prikupljeni u okviru realizacije sledećih projekata:

- izrada digitalnog ortofotoa razmere 1:5000 (DOF5);
- izrada digitalne topografske karte razmere 1:5000 (DTK5);
- topografski premer 1:1000 (TP1).

Za svaki od ovih projekata formiran je odgovarajući DMT. Slika C-2 (poglavlje C.4, dodatak C) sadrži prikaz svih područja za koja je vršeno upoređenje visina i analiza rezultata. Ukupna površina koja je pokrivena ovim test područjima iznosi 3359.4 km<sup>2</sup> (3.28% teritorije Srbije i Crne Gore). Procena je da se radi o dosta dobrom uzorku. Zastupljeni su svi važniji tipovi terena, sem najsloženijih tipova terena karakterističnih za planinska područja u Crnoj Gori za koje nije bilo raspoloživih podataka za upoređenje.

DOF5 projekti iz kojih su preuzeti DMT podaci za izabrana test područja mogu se podeliti u dve grupe:

- projekti u kojima su svi podaci dobijeni merenjem na digitalnim fotogrametrijskim sistemima (test područja: Pančevo, Valjevo 1, 2 i 3, Čačak, Kruševac i Novi Pazar);
- projekti u kojima su izohipse digitalizovane sa postojećih ODK karata razmere 1:5000, a zatim verifikovane i dopunjene strukturnim i prelomnim linijama terena i karakterističnim tačkama

U okviru detaljnih izveštaja date su srednje kvadratne greške (oznaka RMSE, formula 4-11), standardne devijacije (oznaka STDEV, formula 4-12) i ostali statistički pokazatelji (broj odstupanja, minimalna, maksimalna i srednja vrednost odstupanja sračunata po formuli 4-9). Ove vrednosti date su zbirno i po nagibima terena. Određeni su i prikazani i koeficijenti  $m_{H_0}$  i  $K$  regresione prave koja predstavlja odnos srednje kvadratne greške  $m_H$  i nagiba terena  $\alpha$ :

$$m_H = m_{H_0} + K \cdot \text{tg}\alpha \quad (5-11)$$

Date su i odgovarajuće greške modeliranja regresione krive. Izveštaj sadrži i procentualnu raspodelu odstupanja prema apsolutnoj vrednosti odstupanja. Ovo su inače standardni izveštaji koji su u *Surfling*-u predviđeni za statistički prikaz rezultata upoređenja visina.

Izveštaji sa rezultatima upoređenja visina za kote i trigonometre dati su samo za ona test područja za koja je bilo na raspolaganju više od sto kota, odnosno trigonometara. Takođe, dati su samo izveštaji nakon eliminacije rezultata sa odstupanjima velikim po apsolutnim vrednostima. To su odstupanja za koje je procenjeno da predstavljaju grube greške, tj. da značajno odstupaju od ostalih rezultata. Uglavnom je korišćeno jednostavno pravilo da se izbacе sva odstupanja veća od trostruke vrednosti najveće srednje kvadratne greške određene za neki nagib terena. Pri tome, kod izbora maksimalne greške korišten je princip da se u obzir uzimaju samo one greške koje su određene na osnovu dovoljnog broja odstupanja. Izuzetak od ovog pravila su bili podaci sa izohipsama za neke projekte. Ako je uvidom u konkretne podatke sa TK25 sa sigurnošću utvrđeno da nije reč o grubim greškama u dodeljivanju visina izohipsama, ti podaci nisu eliminisani iz obrade.

U sažetom tabelarnom prikazu rezultata upoređenja po test područjima dati su u najkraćem obliku svi zbirni statistički pokazatelji preuzeti iz detaljnih izveštaja. Da bi čitalac stekao bolji uvid u rezultate upoređenja, dati su i pokazatelji dobijeni na osnovu podataka bez eliminacije grubih grešaka.

Radi uštede prostora, grafički prikaz raspodele odstupanja po testiranom području dat je samo za test područje Beograd DTK5. Brojni grafički prikazi dati su u dodatku E gde je vršena ocena kvaliteta DMT-a formiranog po predloženoj metodologiji.

Tabelarni pregled upoređenja visina po nagibima i test područjima dat u poglavlju C.8 predstavlja vrlo sažet i pri tome vrlo iscrpan prikaz raspodele i iznosa odstupanja. Za sva test područja date su srednje kvadratne greške i standardne devijacije sračunate za određeni interval nagiba terena. U obradu su uključene samo one vrednosti grešaka koje su određene na osnovu 10 i više odstupanja. Za više test područja koje karakteriše ista kategorija kontrolnih podataka sračunate su i prosečne vrednosti srednjih kvadratnih grešaka i standardnih devijacija. Te vrednosti su u tabelama obeležene zelenom bojom. Pri tome su korištena dva pristupa. Prvi podrazumeva korišćenje opšte, a drugi proste aritmetičke sredine kvadrata srednjih kvadratnih grešaka odnosno standardnih devijacija. Vrednost određena preko opšte aritmetičke sredine u tabelama je označena kao *prosečna greška sa težinama*, dok se za vrednost određenu preko proste aritmetičke sredine koristi termin *prosečna greška bez težina*. Kod opšte aritmetičke sredine za težinu se koristi broj odstupanja na osnovu kojih je neka srednja kvadratna greška, odnosno standardna devijacija određena, pa se ova vrednost računa po formuli:

$$m^2 = \frac{\sum_{i=1}^N n_i \cdot m_i^2}{\sum_{i=1}^N n_i}, \quad (5-12)$$

gde je  $n_i$  broj odstupanja korišćen za računanje srednje kvadratne greške  $m_i$  (odnosno standardne devijacije), a  $N$  ukupan broj srednjih kvadratnih grešaka. Računanje prosečnih vrednosti na prethodni način je sasvim opravdano, jer se dobija realna zbirna ocena za sva test područja. Sa druge strane, izvršen je i proračun prosečnih vrednosti bez težina upravo da bi se eliminisao efekat nejednakog broja visina po testiranim područjima. Na primer, test područja Pančevo i Kruševac imaju znatno veći broj visina od ostalih test područja, pa bi tako oni mogli neopravdano da pomere prosečne vrednosti srednjih kvadratnih grešaka i standardnih devijacija, samo zato što se radi o većim test područjima.

Prvobitna namera kod osmišljavanja ovih eksperimenata je bila da se statističkom analizom razlika između visina dobijenih sa TK25 karata i visina interpolovanih iz DOF5, DTK5 i TP1 projekata dođe do objektivne ocene tačnosti visina digitalizovanih sa TK25 i da se ta ocena iskaže egzaktno preko srednje kvadratne greške. Međutim, rezultati dobijeni iz upoređenja visina pokazali su da to zahteva mnogo dublju analizu koja nije predviđena u okviru ovog rada. Naime, ispostavilo se da su čak i podaci



prikupljeni istim tehnikama vrlo heterogene tačnosti i da je vrlo teško utvrditi i izdvojiti pojedine izvore grešaka, pa prema tome i oceniti iznose samih grešaka.

Pokazalo se da ni podaci iz DOF5 projekata nisu toliko kvalitetniji od podataka prikupljenih sa TK25 podloga koliko se moglo očekivati. Postoje značajne indicije da glavni uzrok za ovako heterogenu tačnost između DOF5 projekata realizovanih korišćenjem istih tehnika prikupljanja podataka, kao i za neočekovano slabiju tačnost DOF5 podataka, leži u niskom kvalitetu podataka u šumskim područjima.

Svakako treba imati u vidu i neažurnost podataka TK25, jer se oni odnose na stanje do 1965., dok se DOF5 odnose na stanje od 2002 do 2005. Ova neslaganja su posebno velika na mestima gde je došlo do velikih promena na terenu (površinski kopovi, deponije i sl.). U istraživanju je uložan razuman napor da se ovakva mesta ne uključe u analize, ali ne može se pouzdano tvrditi da se u tome i uspelo. DMT podaci dobijeni sa TK25 i iz DOF5 projekata, osim po svojoj tačnosti, razlikuju se i po tome što se DMT kod DOF5 projekata radi za potrebe ortofoto produkcije i sadrži i objekte kao što su mostovi i nadvožnjaci, dok to nije slučaj sa podacima sa TK25, pa je za očekivati i pojavljivanje većih odstupanja u visinama koje su posledica ovoga. Sva odstupanja koja su rezultat gore pomenutih razlika TK25 i DOF5 podataka mogu dati pomerenu ocenu srednje greške iz razlike visina.

Finija analiza rezultata podrazumeva odstranjivanje iz obrade svih odstupanja koji nisu posledica grešaka u merenju. Pored toga, potrebno je da se ulazni podaci dodatno klasifiraju prema kategorijama terena (pošumljen, izgrađen, čist) i da se izvede potpuno odvojena analiza za pojedine klase terena. Na kraju, treba istaći i neophodnost korišćenja tačnijih modela terena sa visinama koje su pouzdane, što je verovatno teško ostvarljivo, bar za veća područja.

Zbog svih navedenih problema sračunate prosečne greške treba uzeti sa velikom rezervom i posmatrati ih samo kao okvirne vrednosti koje više predstavljaju ocenu slaganja visina iz različitih izvora podataka, a manje objektivnu ocenu tačnosti visina digitalizovanih sa TK25. Jedino se podaci dobijeni iz upoređenja za test područja Beograd DTK5 i Kragujevac mogu smatrati merodavnim, jer su izvršena sa znatno boljim kontrolnim podacima (precizni DMT za izradu karte 1:5000 i DMT iz premera 1:1000, oba urađena za područja bez gustih šuma).

I pored navedenih problema i nemogućnosti da se definitivna ocena tačnosti podataka digitalizovanih sa TK25 karata da u vidu srednje kvadratne greške visina (zbirno i po nagibima terena), može se zaključiti da su realizovani eksperimenti vrlo korisni. Iako nije data definitivna ocena tačnosti podataka, na osnovu velike količine obrađenih podataka može se steći dosta dobar utisak o slaganju visina dobijenih sa TK25 karata i visina dobijenih iz drugih projekata. Mogu se doneti i neki zaključci o mogućnostima formiranja DMT-a za teritoriju države na osnovu podataka sa TK25 karata. S obzirom da su rezultati opširno predstavljeni u dodatku C, oni se ovde detaljno ne analiziraju za svako konkretno test područje ili kategoriju podataka sa TK25, već se daju samo komentari dobijenih rezultata i neki generalni zaključci:

- primetno je bolje slaganje visina sa TK5 i visina dobijenih digitalizacijom izohipsi sa ODK5 karata, u poređenju sa visinama iz DOF5; ovo je evidentno i iz analize srednjih vrednosti odstupanja dobijenim za pojedina test područja; za većinu test područja sa DOF5 podacima (Kruševac, Novi Pazar, Valjevo 2 i 3 i Čačak) dobijene su vrednosti preko 0.8 m što govori da postoji značajan sistematski uticaj; za sve ove projekte visine dobijene iz TK25 su više; posebno je drastičan primer Novog Pazara gde srednja vrednost odstupanja iznosi preko 2m (Tabela C-3, Izveštaj C-5); ne može se pouzdano utvrditi šta je uzrok ovom neslaganju, ali je evidentno da ovo značajno utiče na dobijene vrednosti srednjih grešaka; jedno od objašnjenja bi moglo da bude da se te razlike javljaju u predelima obraslim šumom;
- iz grafičkog prikaza odstupanja visina tačaka izohipsi digitalizovanih sa TK25 od visina interpolovanih iz DMT-a dobijenog u okviru projekta izrade digitalne topografske karte za test područje Beograd DTK5 (Slika C-3) može se zaključiti da se najveća odstupanja javljaju na obalama reka (nasipi) i na mestima gde je očigledno došlo do promena na terenu (Rakovica); u oba slučaja odstupanja nisu posledica tačnosti merenja;
- iako su podaci dobijeni digitalizacijom sa TK25 prošli fazu verifikacije, tokom realizacije eksperimenata otkriven je značajan broj grubih grešaka u njima; ove greške se uglavnom odnose na pogrešne visine izohipsi, ali su otkrivene i greške u visinama kota i trigonometara; ovo dodatno ukazuje na značaj detaljne verifikacije podataka digitalizovanih sa TK25;
- ako se pretpostavi da je kartiranje izohipsi na TK25 i ODK kartama za test područja Barajeva, Lazarevca, Sopota i Vrčina vršeno potpuno nezavisno, može se zaključiti da su dobijeni vrlo dobri rezultati slaganja visina (Tabela C-5); ako se ovi rezultati uporede sa proračunatim vrednostima

(Tabela 5-5), i ako se uzme u obzir očekivana tačnost podataka sa ODK karata, vidi se da su prosečne vrednosti srednjih kvadratnih grešaka i standardnih devijacija na nivou očekivanih;

- posebno su indikativni rezultati upoređenja visina za test područja Kragujevac i Beograd DTK5 za koje su obezbeđeni najkvalitetniji DMT-ovi za kontrolu visina digitalizovanih sa TK25; dobijene su prosečne vrednosti srednjih kvadratnih grešaka i standardnih devijacija (Tabela C-5) koje se izuzetno dobro slažu sa očekivanim vrednostima (Tabela 5-5); podaci koji su upoređivani su sasvim sigurno potpuno nezavisno prikupljeni i dobijeni rezultati svedoče o vrlo visokoj tačnosti, kako podataka sa TK25, tako i podataka prikupljenih u okviru premera grada Kragujevca i izrade digitalne topografske karte za delove Beograda;
- vrednosti prosečnih grešaka dobijenih upoređenjem visina kota i trigonometara digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DMT-ova dobijenih iz DOF5 projekata ukazuju na nižu tačnosti ovih DMT-ova od one koja je očekivana; malo je verovatno da su greške određivanja visina kota i trigonometara uzrok ovako velikim odstupanjima.

Na kraju ovog prikaza rezultata preliminarnih eksperimenata sprovedenih sa ciljem ocene kvaliteta podataka na TK25 podlogama treba reći da su dobijeni zadovoljavajući rezultati. U delovima gde se podaci odnose na teren bez guste i visoke vegetacije dobijena je očekivana tačnost podataka. Jedino otvoreno pitanje je tačnost podataka u predelima sa gustom i visokom šumom. Na onovu raspoloživih podataka i sprovedenih eksperimenata ne može se pouzdano tvrditi kakav je odnos tačnosti visina dobijenih sa TK25 podloga i visina iz DOF5 projekata za ovakve tipove terena. Neke indicije govore u prilog tome da je taj odnos dosta izjednačen. Naime, i jedni i drugi podaci su dobijeni fotogrametrijskom restitucijom. Tačnost merenja visina za terene obrasle gustom i visokom šumom ne zavisi toliko od razmere snimanja, koliko od procene operatera za koliko da redukuje visinu šumskog pokrivača da bi dobio površ terena. U svakom slučaju, dobijene vrednosti definitivno ukazuju na to da se korišćenjem podataka sa TK25 može dobiti DMT čija bi tačnost sasvim sigurno bila u granicama očekivanja za tu razmeru.

## 5.4 Savremene metode prikupljanja podataka za potrebe formiranja nacionalnog DMT-a

Sasvim je jasno da je najjednostavniji način za formiranje nacionalnog DMT-a korišćenje podataka sa postojećih podloga. Duga tradicija na poslovima prikupljanja prostornih podataka i visok kvalitet rada koji je godinama negovan, mogu biti dobar motiv da se ovi podaci iskoriste. Ovakav pristup omogućava da se, uz izuzetno niska ulaganja, dođe do kvalitetnog DMT-a. Većina poslova na takvoj izradi DMT-a može se poveriti domaćim stručnjacima, uz vrlo ograničenu obuku. Sa postojećom, ili nešto obnovljenom opremom i uz nabavljanje pristupačnih softverskih alata, može se brzo realizovati ceo projekat. S obzirom da se radi o tehnologiji koja je pristupačna, mnoga rešenja mogu se razviti i u okviru naših institucija.

Analiza savremenih metoda za masovno prikupljanje DMT podataka jasno pokazuje da je poslednjih godina ostvaren značajan napredak (poglavlje 2). Međutim, evidentno je da je primena novih metoda, kao što su LiDAR i InSAR uslovljena vrlo visokim finansijskim ulaganjima. To je posebno izraženo kod LiDAR-a. Pored toga, odnos između ekonomičnosti i efikasnosti ovih metoda dosta je sličan onom koji se ostvaruje primenom fotogrametrijskih metoda, bilo da se radi o satelitskim ili aerofotogrametrijskim snimcima. Uz sve ovo, ako se uzme u obzir i činjenica da su očigledne velike potrebe za ortofotoproduktima u Srbiji, jasno je da najveće izgleda za primenu neke od ovih metoda ima upravo fotogrametrija. U tom slučaju najprihvatljivije rešenje je korišćenje satelitskih ili aerofotogrametrijskih snimaka i njihova obrada korišćenjem digitalnih fotogrametrijskih sistema. U tom smislu, nacionalni program ortofotoprodukcije za razmere 1:5000 do 1:25000 predstavlja jedan ekonomičan način da se kvalitet DMT-a dobijenog na osnovu podataka digitalizacije karata 1:25000 značajno popravi ili da se formira potpuno novi DMT. Kada je reč o izboru aerofotogrametrije ili satelitskih snimaka, bar za naše uslove, aerofotogrametrija još uvek ima izvesnu prednost. Istraživanja su pokazala da kvalitet DMT-a koji se može dobiti na osnovu satelitskih snimaka iz misija kao što su *SPOT*, *IKONOS* i *QuickBird* još uvek zaostaje za onim koji se može dobiti iz aerofotogrametrijskih snimaka uz slična finansijska ulaganja. Sa druge strane snimci iz misija *IKONOS* i *QuickBird*, (na osnovu kojih se može dobiti DMT koji po svome kvalitetu prevazilazi DMT iz podataka digitalizacije TK25), još uvek su skupi u poređenju sa aerofotogrametrijskim snimanjem (poglavlje 2.1.2, Tabela 2-5).



Kada je reč o fotogrametriji, iskustvo i znanje domaćih stručnjaka, uz relativno niska ulaganja za implementaciju novih tehnoloških rešenja, vrlo brzo mogu dati konkretne rezultate na izradi nacionalnog DMT-a. Osnov za ovu tvrdnju je i pojava relativno velikog broja preduzeća na domaćem tržištu koji u okviru svojih usluga nude usluge aerofotogrametrijskog snimanja, izrade ortofotoa i digitalne fotogrametrijske restitucije.

Iskustva i projekti izrade nacionalnih DMT baza podataka u razvijenim zemaljama pokazuju da se na ovim poslovima sve više koristi InSAR radarska metoda, bilo da se radi o podacima sa satelitskih misija kao što su *ERS 1/2* ili *SRTM* (poglavlje 5.1.3, *Poidomani 2000*) ili o posebnim nacionalnim projektima radarskog aviosnimanja, kao što je to primer Velike Britanije i SAD (poglavlja 5.1.4 i 5.1.2, *Li 2004*). Kada su u pitanju satelitske misije analiza pokazuje da dobijeni podaci znatno zaostaju po svom kvalitetu u odnosu na podatke koji bi se mogli ostvariti primenom aerofotogrametrije ili InSAR radarskim aero-snimanjem. Sa druge strane, uspešno izvedeni projekti izrade nacionalnog DMT-a primenom radarskog aviosnimanja, kao i slični projekti koji su u pripremljivoj fazi, svedoče o trendu sve veće primene ove metode na ovim poslovima. Tome svakako najviše doprinosi izuzetno povoljan odnos kvaliteta i cene koji se standardno ostvaruje ovom metodom. Naravno, pri tome se ne sme zanemariti i vrlo visoka efikasnost i brzina sa kojom se ovakvi projekti mogu realizovati. U svetu postoji mali broj kompanija koje su osposobljene da izvode velike projekte izrade DMT-a primenom radarskog aviosnimanja, tako da nije realno očekivati da će se kod nas pojaviti jedna takva kompanija. Ono što se ne može isključiti je mogućnost da se izdvoje značajna finansijska sredstva i da se realizacija takvog jednog projekta poveri stranim kompanijama koje imaju iskustva na ovim poslovima. I u tom slučaju, kod nas postoje institucije i preduzeća koje su u stanju da se aktivno i u manje-više značajnoj meri uključe u realizaciju jednog takvog projekta.

Primena LiDAR-a na projektima formiranja DMT-a za teritorije država je vrlo ograničena i po pravilu je rezervisana za države koje su u stanju da za ove projekte izdvoje izuzetno visoka finansijska sredstva. Realizacija sličnih projekata kod nas, bar kada je reč o većim područjima, je nerealna. Naravno, mogu se očekivati projekti snimanja za specijalne namene. Tipičan primer su snimanja koridora za potrebe projektovana saobraćajnica, snimanja područja ugroženih poplavom ili snimanja gradova. Ove podatke treba obavezno iskoristiti za ažuriranje nacionalnog DMT-a, ali i za ocenu njegove tačnosti i pouzdanosti.

## 5.5 Predložena metodologija

Prethodna i eksperimentalna ocena kvaliteta podataka raspoloživih na postojećim topografskim podlogama (TK25) sprovedena u okviru ovog istraživanja (poglavlje 5.3.3) pokazala je da treba očekivati da se korišćenjem ovih podataka može dobiti DMT čija se tačnost može iskazati srednjom kvadratnom greškom visina koja bi bila u rasponu od 1.5 do 8m, u zavisnosti od tipa terena (nagib i vegetacija). Ovi rezultati i analiza savremenih metoda za masovno prikupljanja DMT podataka sprovedena u poglavlju 2 ukazuju na to da:

- korišćenjem podataka dobijenim radarskim sensorima u okviru satelitskih misija (*ERS 1/2*, *SRTM*) ne može se dobiti DMT čija bi tačnost bila viša od DMT-a dobijenog na osnovu digitalizacije TK25;
- troškovi izrade DMT-a koji bi po tačnosti odgovarao DMT-u iz digitalizacije TK25, a koji bi se mogao dobiti obradom podataka radarskog aviosnimanja ili obradom satelitskih ili aerofotogrametrijskih snimaka primenom digitalne fotogrametrije, znatno je veća od troškova izrade DMT-a iz TK25.

Zbog toga je u ovom trenutku najracionalnije da se ovaj DMT-a formira na osnovu podataka koji će se dobiti digitalizacijom postojećih podloga TK25. Ovo potvrđuju i iskustva mnogih zemalja koja su problem formiranja nacionalnog DMT-a rešila upravo na ovaj način.

Projekat formiranja DMT-a na osnovu digitalizacije postojećih podloga treba realizovati kroz sledeće faze:

- digitalizacija podataka sa postojećih podloga:
  - skeniranje svih podloga koje sadrže relevantne podatke za formiranje DMT-a;
  - utvrđivanje i otklanjanje deformacija skeniranih podloga i njihovo georeferenciranje;
  - vektorizacija izohipsi;

- kontrola i korekcija povezivanja izohipsi na granicama listova karata;
- dodeljivanje visina izohipsama ako to nije učinjeno u postupku vektorizacije izohipsi;
- digitalizacija ostalog sadržaja (kote, trigonometri, hidrografija);
- primarna verifikacija, korekcija i dopuna prikupljenih podataka u smislu okrivanja grubih grešaka, nekonzistentnosti u podacima i nedovoljne količine podataka za korektnu rekonstrukciju površi terena;
- inicijalno ažuriranje DMT podataka:
  - ažuriranje podataka na područjima gde je došlo do većih promena na terenu (površinski kopovi, deponije, veliki građevinski radovi, brane, i sl.) korišćenjem svih raspoloživih tehnika i izvora podataka (digitalna fotogrametrija, ortofoto projekti, digitalizacija podataka sa ODK ako postoje ažurne podloge);
- formiranje DMT-a:
  - formiranje inicijalnog DMT-a na osnovu prikupljenih podataka sa postojećih podloga;
  - prelazak na DMT baziran na visinama u pravilnom ili promenljivom rasteru (interpolovanim iz inicijalnog DMT-a), uz dodatni sadržaj (kote, trigonometri, elementi hidrografije, automatski detektovane forme terena) – ova faza je opciona;
- verifikacija DMT-a:
  - definitivna verifikacija DMT-a upoređenjem sa raspoloživim podacima iz drugih izvora;
  - ocena tačnosti DMT-a;
- radovi vezani za održavanje i distribuciju podataka:
  - formiranje skupova podataka pogodnih za distribuciju najširem krugu korisnika;
  - izrada Internet prezentacije sa informacijama o podacima i načinu njihovog dobijanja;
  - formiranje baze podataka povezane sa Internet prezentacijom za interaktivni pregled sadržaja i sl..

Nakon početnog perioda eksploatacije formiranog DMT-a i povratnih informacija dobijenih od korisnika, može se doneti odluka u kojoj meri je potrebno podizati njegov kvalitet i koja područja su u tom pogledu posebno interesantna. Ovaj pristup je inače opšteprihvaćen kod većine zemalja sa razvijenim nacionalnim programima za prikupljanje podataka o prostoru i izradu kartografskog materijala.

Analiza koja je sprovedena sa ciljem utvrđivanja kvaliteta podataka na postojećim TK25 kartama pokazala je da je realno očekivati da se za ovako formirani DMT ostvari tačnost sa srednjim kvadratnim greškama u rasponu od 1.5 do 8m, u zavisnosti od nagiba terena. Jedan od načina da se to i ostvari je striktno poštovanje procedura i numeričkih postupaka predloženih u okviru ovog istraživanja, jer je utvrđeno da postoji i značajan broj slabih mesta (georeferenciranje RO, područja bez visina, izbor adekvatne metode interpolacije, itd.), kao i sistematskih i grubih grešaka (greške u visinama kota, trigonometara i izohipsi, greške u područjima pod šumom, itd.).

Nakon realizacije projekta formiranja nacionalnog DMT-a, treba pokrenuti i postupak njegovog ažuriranja i podizanja kvaliteta korišćenjem podataka za sva područja za koja su u skorije vreme prikupljeni podaci više tačnosti. Ovo se posebno odnosi na naseljena mesta gde već postoji znatna količina visinskih podataka, bilo da se radi o podacima iz katastarskog premera ili podacima dobijenim pri izradi ortofoto planova i karata.

Paralelno sa drugom fazom treba da otpočne i redovno ažuriranje nacionalnog DMT-a kroz proces održavanja TK25 u digitalnom obliku. Kod ovog održavanja posebnu pažnju treba obratiti na prikupljanje podataka o strukturnim i prelomnim linijama terena, jer je realno očekivati da će se na taj način najviše dobiti u smislu podizanja kvaliteta i pouzdanosti DMT-a, uz relativno mala ulaganja. Za ove potrebe najlogičnija je primena digitalne fotogrametrije, jer će ova metoda svakako biti dominantna kada je u pitanju izrada i ažuriranje geodetskih planova i karata uopšte. Tome svakako sve više doprinosi i povećan interes za ortofoto proizvode, pa se može očekivati da će TK25, ali i ODK karta vrlo brzo dobiti korespondentne ortofoto proizvode koji će biti deo jednog državnog programa. U tom slučaju, DMT odgovarajuće tačnosti postaje nezaobilazan segment ortofotoprodukcije na državnom nivou. Najracionalnije je onda nacionalni DMT realizovati u okviru ovih programa.



Naravno, ono što u svakom trenutku treba imati na umu su dalja dešavanja u oblasti razvoja i primene najnovijih tehnologija za prikupljanje podataka DMT-a. Nije isključeno da se u vrlo bliskoj budućnosti efikasnost i ekonomičnost prikupljanja podataka radarskim ili laserskim snimanjem do te mere poboljšaju da se ove metode nametnu kao jedina razumna opcija. Isto važi i za podatke koji se prikupljaju u okviru brojnih satelitskih misija. Trenutno, ove metode i dalje predstavljaju vrlo skupu alternativu digitalizaciji postojećih podloga.

## 5.6 Softverska podrška

Imajući u vidu značaj koji softver ima na realizaciji projekta formiranja DMT-a u ovom poglavlju su u sažetom obliku razmotrena i softverska rešenja koja se mogu koristiti za svaku od važnijih faza u okviru predložene metodologije. Uglavnom su razmatrana ona rešenja koja su u širokoj primeni u svetu i kod nas. Nisu razmatrana specifična rešenja koje su pojedine nacionalne institucije u svetu razvijale za svoje sopstvene potrebe, ili rešenja koja nisu komercijalna i prisutna na softverskom tržištu. Jedini izuzetak u tom pogledu su rešenja koja je autor razvio u okviru svojih istraživanja.

U okviru ovog poglavlja samo se navode neka od mogućih softverskih rešenja i daju se njihove generalne karakteristike i prednosti i mane kod primena za formiranje nacionalnog DMT-a. U cilju verifikacije predložene metodologije, neka od ovih rešenja su korišćena za realizaciju eksperimenata koji su predstavljali deo ovog istraživanja (*DigiScan*, *MapSoft* i *Surflng*, *ArcGIS* – *ArcMap* i ekstenzije *Geostatistical Analyst* i *3D Analyst*). Softverska rešenja kao što su *DigiScan*, *MapSoft* i *Surflng*, koja je autor koristio za razvoj i implementaciju numeričkih postupaka (kalibracija i georeferenciranje skeniranih podloga, prikupljanje i verifikacija podataka, rekonstrukcija površi terena na osnovu izohipsi, ocena kvaliteta DMT-a) detaljnije su opisana u poglavljima 4.2.1 i 4.2.2.

### 5.6.1 Softver za prikupljanje podataka sa postojećih podloga

Za digitalizaciju sadržaja mogu se koristiti svi softverski alati koji mogu da doprinesu da se efikasno i kvalitetno sadržaj sa postojećih podloga prevede u digitalni oblik. S obzirom na predložene operacije u okviru ove faze formiranja nacionalnog DMT-a može se govoriti o softverskim rešenjima za:

- skeniranje i obradu skeniranih podloga;
- otklanjanje deformacija i georeferenciranje skeniranih podloga;
- digitalizaciju (vektorizaciju) sadržaja;
- verifikaciju i obradu prikupljenih podataka.

**Softver za skeniranje i obradu skeniranih podloga** obuhvata softverska rešenja koja se standardno isporučuju uz skenere i koji služe kao direktna podrška u procesu skeniranja, kao i softverska rešenja kojima se može obraditi skenirani sadržaj. Softver koji se isporučuje uz skener omogućava izbor optimalnih parametara skeniranja. Značaj ovog softvera se posebno ogleda kod skeniranja podloga lošeg kvaliteta. Pošto to nije slučaj kod skeniranja reprodukcijских originala topografskih karata, kvalitet ovog softvera nema veliki uticaj na sam postupak skeniranja.

Mnogo veći značaj ima softver za naknadnu obradu skeniranog sadržaja. I softver koji se isporučuje uz skener raspolaže izvesnim funkcijama za obradu skeniranog sadržaja. Najznačajnija obrada, sa aspekta ovog istraživanja, je mogućnost izdvajanja sadržaja koji pripada jednoj oleati topografske karte, a sa slike dobijene skeniranjem kolorne topografske karte. Pored ove obrade, može biti interesantna i obrada u smislu "čišćenja" digitalne slike od neželjenog sadržaja. Ova obrada je preporučljiva u situacijama gde se predviđa automatska vektorizacija sadržaja. Tada je mnogo bolje očistiti rastersku sliku od nepotrebnog sadržaja pre same vektorizacije, nego naknadno popravljati vektorski sadržaj. Ova obrada se može izvoditi manuelno ili automatski.

Manuelna obrada je neophodna u svim situacijama gde se radi o sadržaju čiji je geometrijski ili radiometrijski kvalitet korektan, ali tematski nije interesantan za dalju obradu, tj. vektorizaciju i može

prouzrokovati veliki broj grešaka u samoj vektorizaciji ili je značajno usporiti. Primeri takvog sadržaja su: brojevi i ispisi na karti, koordinatna mreža, kartografski simboli, šrafure i sl.

Automatska obrada se najčešće sastoji u otklanjanju šumova nastalih zbog nečistoća materijala koji se skenira ili su prouzrokovani samim skeniranjem. Ova obrada može uključiti i druge operacije koje su tipične za digitalnu obradu slika, a sve u cilju dobijanja sadržaja podesnog za dalju obradu. Neki od softverskih alata koji se mogu uspešno koristiti u ove svrhe su:

- *PhotoShop, Adobe;*
- *R2V, Able Software Corp. (w39);*
- *Easy Trace, Easy Trace Group;*
- *ArcScan - ekstenzija GIS softvera ArcGIS, ESRI (w33);*
- *IRAS/C - samostalno softversko rešenje ili deo softverskog paketa GeoVec Office, Intergraph.*

Svaki od ovih alata raspolaže velikim fondom funkcija za digitalnu obradu slika i u tom pogledu bilo koji od njih može odgovoriti većini zahteva kod obrade skeniranih topografskih podloga. Za razliku od ostalih softvera koji su posebno prilagođeni obradi skeniranog kartografskog materijala, tj. pripremi za postupke vektorizacije sadržaja, *PhotoShop* je softver za digitalnu obradu slika opšte namene. Kao takav on je relativno jeftin i pristupačan, a s druge strane, raspolaže vrlo velikim brojem naprednih i kvalitetnih funkcija za obradu slika. Danas se na tržištu može naći i dosta drugih alata sa sličnom funkcionalnošću. Ovome je značajno doprineo i razvoj digitalne fotografije i njena pristupačnost najširem krugu korisnika.

**Softver za kalibraciju i georeferenciranje skeniranih planova i karata** ima za cilj utvrđivanje i otklanjanje deformacija skeniranih planova i karata, bilo da su one posledica deformacija samog materijala ili da su nastale u postupku skeniranja. Ovaj softver obično omogućava i georeferenciranje skeniranih podloga. Neki od softverskih alata koji se mogu koristiti za ove svrhe su:

- *R2V, Able Software Corp. (w39);*
- *DigiScan, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, MapSoft;*
- *ArcScan - ekstenzija GIS softvera ArcGIS, ESRI;*
- *Geomedia Image, Intergraph;*
- *IRAS/C - samostalno softversko rešenje ili deo softverskog paketa GeoVec Office, Intergraph.*

Izbor nekog od ovih softverskih alata i sama realizacija postupka skeniranja i georeferenciranja skeniranih topografskih karata može značajno uticati na kvalitet podataka dobijenih digitalizacijom sadržaja sa tih karata. Ova konstatacija je potvrđena i u poglavljima gde je eksperimentalno ocenjivan kvalitet podataka sa postojećih podloga (poglavlje 5.3.3.2). Kod izbora softvera koji će biti korišćen za georeferenciranje skeniranih topografskih podloga, treba posebno voditi računa o:

- karakteru deformacija skenirane slike - da li su one lokalnog karaktera ili ne, i
- matematičkim modelima za otklanjanje deformacija kojima određeni softver raspolaže.

Najpovoljniji slučaj je korišćenje softvera koji ima stohastički model za utvrđivanje i otklanjanje deformacija podloge. Primer softvera koji raspolaže takvim modelom je *DigiScan*, originalno softversko rešenje koje je razvio autor (Slika 5-14). Detaljniji prikaz ovog softvera dat je u poglavlju 5.7.2.1. Primenljivost ostalih softverskih rešenja u najvećoj meri je određena karakterom deformacija skeniranih podloga. Poseban problem predstavljaju greške "proklizavanja" podloge koja se provlači kroz skener. Ove greške nije jednostavno otkriti i korektno eliminisati kada se za otklanjanje deformacija skenirane slike koriste polinomske funkcije višeg stepena. Zato se ovaj softver slobodno može preporučiti kao optimalno rešenje za kalibraciju i georeferenciranje svih skeniranih geodetskih podloga.

**Softver za digitalizaciju sadržaja** ima presudan značaj za efikasnost prevođenja sadržaja sa postojećih podloga u digitalni oblik. S obzirom da se radi o vrlo velikoj količini podataka i velikoj količini vremena potrebnog da se ovi podaci prevedu u digitalni oblik, treba pažljivo izabrati odgovarajuće softverske alate i izabrati optimalne tehnike rada. Na tržištu postoji dosta softvera koji može da odgovori ovim zahtevima. Neki od softverskih alata koji se mogu koristiti za ove potrebe su:

- *R2V, Able Software Corp. (w39);*
- *Easy Trace, Easy Trace Group;*
- *GeoVec i GeoVec Office, Intergraph;*



- *ArcGIS* i njegova ekstenzija *ArcScan*, *ESRI*;
- *Geomedia Professional*, *Intergraph*;
- *MapSoft*, *Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu*, *MapSoft*;
- *AutoCAD*, *Autodesk*;
- *Microstation*, *Bentley*.

Za efikasnu vektorizaciju izohipsi sa skeniranih topografskih karata neophodni su softverski alati koji podržavaju poluautomatsku ili automatsku vektorizaciju sadržaja sa rasterske slike. U okviru ovog i nekih drugih istraživanja (Šoškić 2001) testirana su prva dva softverska alata od gore nabrojanih - *R2V* i *Easy Trace*.

Verzija softvera *R2V* (Slika 2-8) koja je korišćena za testiranje je 5.5 za Windows 9x/NT operativni sistem. Korisnički interfejs softvera je vrlo kvalitetan i komforan za rad. Na raspolaganju je solidan fond funkcija za digitalnu obradu rasterske slike. Moguće je otklanjanje deformacija podloge primenom triangulacije referentnih (kontrolnih) tačaka. Softver raspolaže funkcijama za automatsku i poluautomatsku vektorizaciju. Ozbiljan nedostatak softvera je nemogućnost definisanja maksimalne praznine u okviru linije koja se vektorizuje. Zbog toga nije moguća automatska ili poluautomatska vektorizacija isprekidanih linija i linija predstavljenih tačkicama. Podešavanje ostalih parametara vektorizacije je rešeno na zadovoljavajući način. Dodeljivanje visina izohipsama se može uraditi tokom vektorizacije ili naknadno. Vizuelizacija je rešena na zadovoljavajući način. Softver omogućava i efikasno korigovanje rezultata vektorizacije. Rezultati vektorizacije za jednu rastersku sliku se čuvaju u okviru jedne datoteke i mogu se konvertovati u nekoliko standardnih CAD i GIS formata (DXF, MIF, SHP, ...). *Easy Trace* je testiran u verziji softvera za DOS, iako je na tržištu prisutna i verzija za Windows operativni sistem. To je i razlog za glavnu manu ovog softvera, a to je da korisnički interfejs nije dovoljno komforan za rad. Za razliku od Windows verzije, DOS verzija softvera ne raspolaže opcijom za automatsku vektorizaciju, kao ni funkcijama za kalibraciju i georeferenciranje podloge. Za razliku od softvera *R2V* ovaj softver podržava vektorizaciju isprekidanih linija i linija predstavljenih tačkicama, što je svakako značajna prednost. Sve ostalo kod ovog softvera je slično kao kod softvera *R2V*. Zajednička karakteristika oba softverska rešenja je da za svoj rad ne zahtevaju licenciranje drugih softverskih GIS i CAD okruženja i da su relativno jeftina.

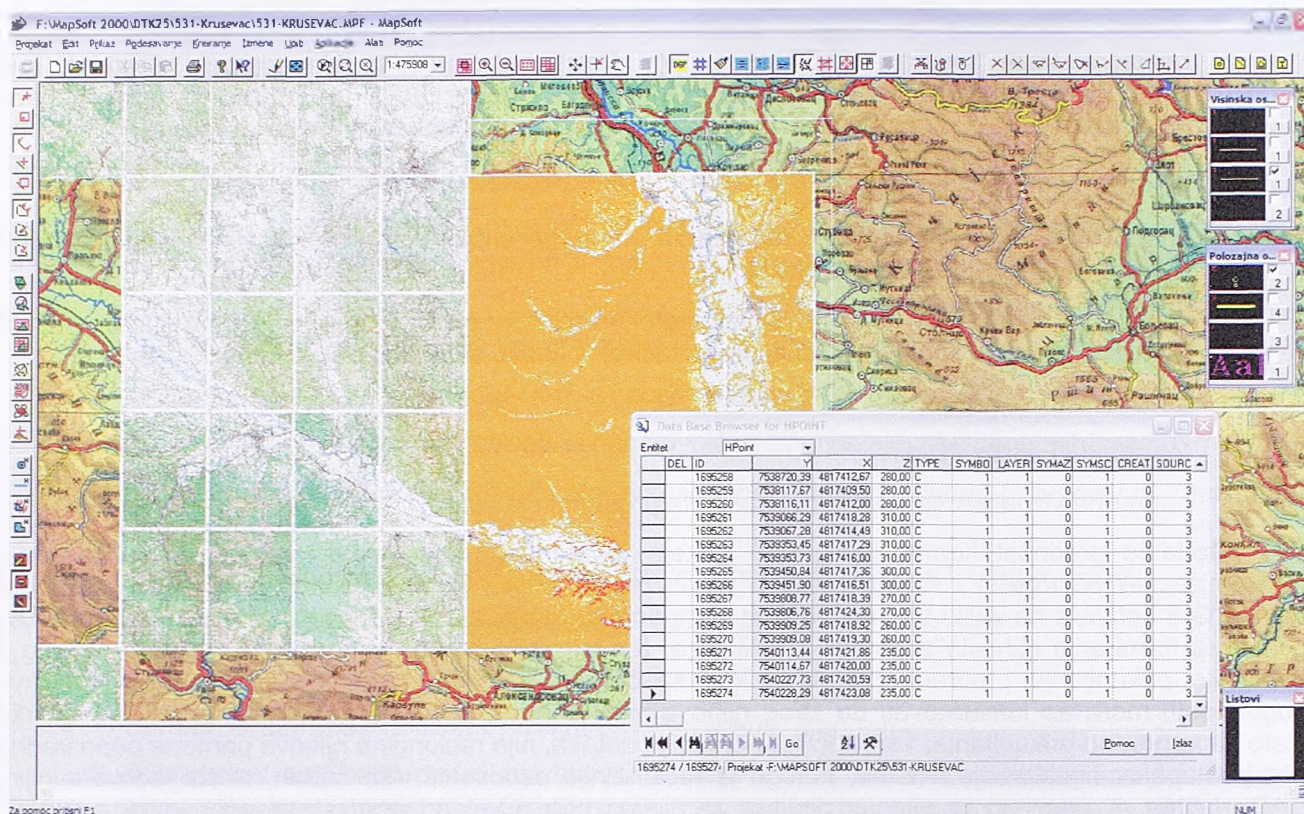
Druga grupa rešenja za digitalizaciju obuhvata alate koji se isporučuju u okviru velikih GIS paketa. To je ujedno i garancija kvaliteta implementiranih rešenja, ali i razlog za relativno visoku cenu. Prednost ovih rešenja je u tome što omogućavaju prikupljanje i direktno smeštanje podataka u okviru georelacione baze podataka. Ovo pojednostavljuje verifikaciju i dalju obradu prikupljenog sadržaja, jer se izbegavaju konverzije podataka koje nekad onemogućavaju povratak u prethodno okruženje radi ispravljanja uočenih grešaka. Pored toga, bolji GIS paketi raspolažu i kvalitetnim funkcijama za detekciju i eliminaciju grešaka u topologiji i geometriji prikupljenih podataka. Tipičan primer ovakve kombinacije naprednog softvera za manuelnu, poluautomatsku ili automatsku vektorizaciju i GIS softvera sa funkcijama za obradu, analizu i rukovanje velikom količinom prostornih informacija su *ArcScan* ekstenzija koja je deo *ArcGIS* softvera firme *ESRI*. Slična konstatacija važi i za proizvode iz firme *Intergraph*.

Treća grupa rešenja koja se mogu primeniti na ovim poslovima su CAD softverski paketi sa svojim alatima za digitalizaciju. Ovi alati uz nešto nižu cenu nude iste, ako ne i veće mogućnosti za editovanje i manipulaciju vektorskim sadržajem. Generalno, trend u softverskoj industriji je da se razlike između CAD i GIS softverskih alata smanjuju. Praksa da se CAD okruženja (*AutoCAD* firme *Autodesk*, *Microstation* firme *Bentley*) koriste kao platforma za realizaciju GIS softvera (*ArcCAD* firme *ESRI*, *AutoCAD Map* firme *Autodesk*, *MGE* firme *Intergraph*) prisutna je već duže vreme. Savremeni CAD alati nude mogućnost povezivanja sa relacionim bazama podataka. Isto tako, savremeni GIS alati, kao što su *ArcGIS* i *Geomedia* sadrže dosta CAD funkcionalnosti.

Softverski paket *MapSoft* je softversko rešenje koje se po svojim mogućnostima, kada je reč o manipulaciji prostornim podacima, nalazi negde između specijalizovanih alata za digitalizaciju (i CAD paketa) i naprednih GIS alata. Uz vrlo pristupačnu cenu, koja je niža od većine CAD i GIS paketa, ovo softversko rešenje obezbeđuje brojne funkcije za digitalizaciju i analizu prostornog sadržaja. *MapSoft* omogućava, kao i veliki GIS paketi, direktno smeštanje podataka koji se odnose na veći broj topografskih karata u georelacionu bazu podataka. Posebno kvalitetno je rešena manipulacija i prikaz velikog broja rasterskih podloga (Slika 5-5). Ovo softversko rešenje ne raspolaže naprednim tehnikama poluautomatske ili automatske vektorizacije, pa ne može biti alternativa softverskim alatima kao što su to *R2*, *Easy Trace*, *ArcScan* ili *GeoVec*. Isto tako, funkcije *MapSoft*-a za manipulaciju prostornim sadržajem (pomeranje, kopiranje, isecanje, selekcija, izmene geometrije, itd.) ne mogu se po svom obimu i kvalitetu



meriti sa funkcijama koje se nude u okviru komercijalnih GIS i CAD paketa. Međutim, za manuelnu digitalizaciju tačkastog sadržaja, funkcionalnost kojom raspolaže *MapSoft* sasvim je dovoljna.



Slika 5-5 : Korisnički interfejs *MapSoft-a*; prikazane su učitane rasterske podloge (više listova TK25) i digitalizovane izohipse za područje jedne karte razmere 1:100000; data je i tabela iz baze podataka sa visinskim tačkama

**Softver za verifikaciju i obradu prikupljenih podataka** treba da omogući inicijalnu obradu sadržaja, kao i otkrivanje grešaka i nedostataka u prikupljenim podacima pre formiranja konačnog DMT-a. Obrada sadržaja podrazumeva kontrolu i korekciju povezivanja izohipsi na spojevima listova karata. Softver treba da raspolaže i funkcijama za otkrivanje grešaka u geometriji i topologiji prikupljenih podataka. Poželjna je mogućnost formiranja privremenog DMT-a i njegova analiza, u cilju efikasnog otkrivanja grešaka u visinskom smislu. Neki od alata koji ovo omogućavaju su:

- *AutoCAD* i *Land Development*, *Autodesk*;
- *Microstation*, *Bentley*;
- *ArcGIS* i njegove ekstenzije *Geostatistical Analyst*, *Spatial Analyst* i *3D Analyst*, *ESRI*;
- *Geomedia Professional* sa ekstenzijama *Geomedia Grid* i *Geomedia Terrain*, *Intergraph*;
- *SCOP++* i modul *SCOP++ GVE*, *Institute for Photogrammetry and Remote Sensing*, *Vienna University of Technology*, *Inpho GmbH*;
- *MapSoft* i *Surfing*, *Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu*, *MapSoft*.

Ako je to moguće, treba izabrati standardne i široko rasprostranjene CAD alate za obradu vektorskog sadržaja. Primeri takvih alata su *AutoCAD* firme *Autodesk* i *Microstation* firme *Bentley* koji su i postavili standarde na ovom polju kako u pogledu funkcionalnosti i performansi softvera tako i u pogledu formata podataka. Nezavisni proizvođači softvera često razvijaju aplikacije specijalno za određene inženjerske potrebe upravo u okruženjima jednog od ova dva CAD alata. Ako te aplikacije raspolažu i funkcijama za formiranje i analizu DMT-a, onda se ovi alati mogu uspešno primeniti i za verifikaciju prikupljenih podataka s obzirom na greške u visinskom smislu.

Nešto skuplja alternativa ovim CAD alatima su GIS softverski alati, koji su po prirodi stvari više prilagođeni obradi prostornih podataka, pa samim tim i podacima dobijenim digitalizacijom postojećih kartografskih podloga. Najpoznatiji alati te vrste su rešenja implementirana u okviru GIS softverskih paketa *Geomedia Professional* firme *Intergraph* i *ArcGIS* (u konfiguracijama *ArcEditor* i *ArcInfo*, a donekle i *ArcView*) firme *ESRI*. Za oba paketa potrebno je i posedovanje odgovarajućih ekstenzija za DMT



analize. Dodatna pogodnost kod ovih paketa je što oni uključuju u druge funkcije za rukovanje prostornim entitetima i prostorne analize kao što su:

- čuvanje geometrije, topologije i tematskog sadržaja (atributi) prostornih podataka u okviru relacione baze podataka (RDBMS - engl. *Relational Database Management System*); ovo znatno proširuje mogućnosti za manipulaciju ovim podacima i, uz korišćenje servera baze podataka (*Oracle, Microsoft SQL Server*), omogućava rukovanje izuzetno velikim količinama podataka; sve ovo nije moguće realizovati korišćenjem CAD alata koji crtež čuvaju u okviru jedne datoteke;
- prikupljanje i vođenje dodatnih atributa za prostorne entitete sa mogućnošću modeliranja svih prostornih objekata i njihovih relacija;
- verifikacija i napredne funkcije za automatsku detekciju grešaka u topologiji prostornih entiteta (preseci linija, loši spojevi na linija, bliske tačke) i njihovo automatizovano korigovanje;
- geostatističke analize;
- formiranje i analiza DMT-a;
- napredna vizualizacija podataka i rezultata prostornih analiza.

Dodatna prednost komercijalnog GIS paketa je što oni nude velike mogućnosti podešavanja (kustomizacije) postojećih i razvoj potpuno novih rešenja. Ovo je obezbeđeno razbijanjem strukture samog GIS softvera na veliki broj softverskih komponenti – objekata, koji se zatim nude korisnicima kao osnov za formiranje njihovih softverskih aplikacija. Na taj način može se obezbediti, između ostalog, i efikasnije prikupljanje i obrada podataka kod specifičnih primena. Iako GIS paketi nude sve ove pogodnosti, mora se konstatovati da zbog njihove visoke cene, posebno za konfiguracije koje sadrže alate za napredno prikupljanje, verifikaciju i obradu podataka, nije racionalna njihova primena neposredno kod postupaka digitalizacije. Naime, mnogo je racionalnije osposobiti više radnih mesta jednostavnijim CAD alatima, ili posebno razvijenim alatima za digitalizaciju i vektorizaciju skeniranih podloga. Nakon inicijalnog prikupljanja ovih podataka, može se na manjem broju radnih mesta opremljenim GIS softverom izvršiti objedinjavanje, verifikacija i automatizovano korigovanje prikupljenog sadržaja.

*SCOP++ GVE* koji se nudi kao nezavistan softver ili modul softverskog paketa *SCOP++* specifičan je po tome što predstavlja grafičko okruženje specijalno namenjeno za verifikaciju i kontrolu kvaliteta DMT podataka. Omogućen je i prikaz rasterskih podloga u cilju digitalizacije i verifikacije DMT podataka. Softver raspolaže funkcijama za brz prikaz profila, izohipsi i 3D pogleda generisanih na osnovu prikupljenih podataka. Obezbeđene su i funkcije za rukovanje i obradu LiDAR podacima (*INPHO 2004*). Moguća je istovremena obrada podataka sa više miliona visina smeštenih u datotekama sa različitim formatima. Podržane su brojne funkcije za otkrivanje i ispravljanje grešaka u prostornim podacima, kao i druge funkcije za njihovo popravljanje (*INPHO 2004*):

- interaktivno editovanje tačaka i linija (promena koda i sloja, snimanje u druge datoteke, digitalizacija novih entiteta, brisanje, aktiviranje, ubacivanje novih tačaka u linijski string, itd);
- provera i korekcija topološke i geometrijske konzistentnosti u podacima (provera preseka linija, provera razlika po XY i Z za susedne linijske segmente, provera monotonosti visina za linije i korekcija korišćenjem linearne interpolacije, provera i brisanje duplih tačaka sa povezivanjem prekinutih linijskih segmenta, ubacivanje novih tačaka na preseku linija, itd.);
- redukcija ulaznih podataka, tj. proređivanje tačaka na osnovu zadatih kriterijuma.

*MapSoft* u kombinaciji sa *Surfing*-om nudi slične mogućnosti kao i *SCOP++ GVE*, s tim da se tu raspolaže sa manjim fondom standardnih CAD i GIS funkcija. Detaljniji opis ovih softverskih alata dat je u poglavljima 4.2.1 i 4.2.2. Prednost ovih alata u odnosu na standardne CAD alate ogleda se u mogućnosti rukovanja većom količinom prostornih podataka koji se čuvaju u relacionoj bazi podataka, vođenju topologije prostornog sadržaja i u vrlo kvalitetnoj implementaciji velikog broja funkcija za formiranje i verifikaciju DMT-a. U tom smislu, ovi softverski alati mogu predstavljati optimalno rešenje za realizaciju poslova na brojnim fazama formiranja nacionalnog DMT-a. Posebno se to odnosi na fazu verifikacije prikupljenih DMT podataka. Softver se takođe može uspešno koristiti i u fazi prikupljanja podataka, kao i za formiranje (interpolaciju) samog DMT-a i njegovo kasnije održavanje i eksploataciju.

## 5.6.2 Softver za formiranje i verifikaciju DMT-a

Softver za formiranje i verifikaciju DMT-a treba da obezbedi sledeće:

- kvalitetne metode interpolacije DMT-a na osnovu podataka digitalizacije postojećih podloga;
- obradu izuzetno velike količine podataka;
- mogućnost mozaikovanja (spajanja) manjih DMT-ova u veće celine;
- arhiviranje finalnog DMT-a u okviru RDBMS-a ili u odvojenim datotekama sa standardnim formatom zapisa;
- mogućnost arhiviranja DMT-a u vidu rastera, tj. grida, TIN-a ili u vidu entiteta (objekata) visinske predstave terena (tačka, linija i površina);
- napredne analize za verifikaciju DMT-a i ocenu njegovog kvaliteta.

Neki od softverskih alata koji u celosti, ili bar delimično ispunjavaju navedene zahteve su:

- *SCOP++*, *Institute for Photogrammetry and Remote Sensing*, *Vienna University of Technology*, *Inpho GmbH*;
- *ArcGIS* sa ekstenzijama *Geostatistical Analyst*, *Spatial Analyst* i *3D Analyst*, *ESRI*;
- *Geomedia Professional*, *Geomedia Grid* i *Geomedia Terrain*, *Intergraph*;
- *ANUDEM*, *Centre for Resource and Environmental Studies*;
- *Surflng*, *Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu*, *MapSoft*.

Specijalizovani softverski paketi za rukovanje velikim DMT bazama podataka kao što je *SCOP* nemaju tako veliki fond standardnih GIS funkcija kao najrasprostranjeniji komercijalni GIS softveri. Međutim, za razliku od komercijalnih GIS alata koje tek treba prilagoditi posebnim zahtevima koji se javljaju kod rukovanja velikim DMT bazama podataka, *SCOP* već ima sve što je neophodno. Ovaj softver je svoju funkcionalnost višestruko dokazao na poslovima formiranja i rukovanja nacionalnim DMT bazama podataka Austrije, Švajcarske, Nemačke i drugim. Osnovna prednost *SCOP*-a u odnosu na ostale softverke alate, uključujući tu i standardna GIS rešenja, je u tome što on omogućava formiranje i rukovanje visoko kvalitetnim DMT-om sa izuzetno velikom količinom podataka.

Standardni GIS paketi uglavnom omogućavaju formiranje standardnih TIN ili grid DMT-a koji su uslovljeni, ili ograničenjima vezanim za maksimalne količine podataka (za TIN DMT), ili ograničenjima vezanim za efikasno i kvalitetno modeliranje terena (grid DMT, ne respektuju se strukturne i prelomne linije terena, nema metoda interpolacije koje su pogodne za formiranje DMT-a na osnovu izohipsi i sl.).

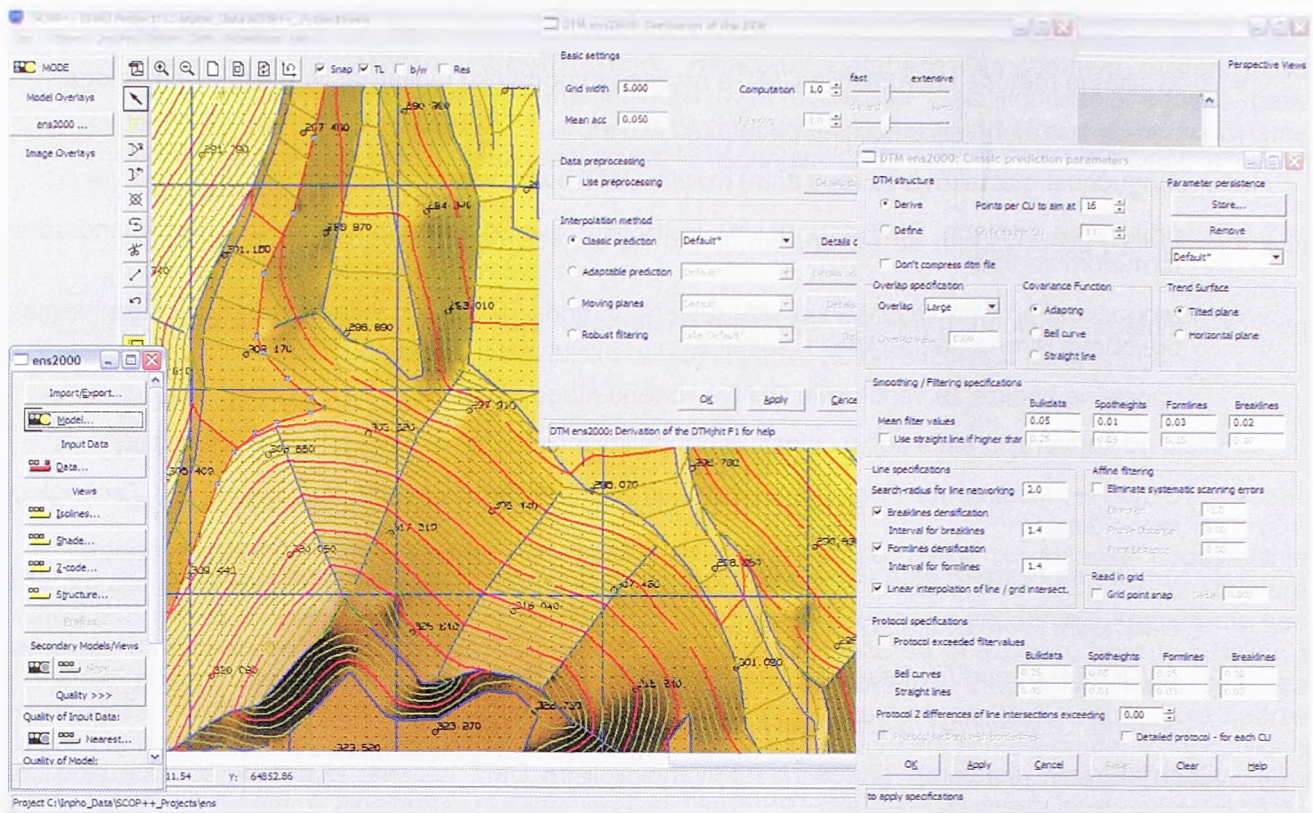
*SCOP* se zasniva na korišćenju hibridne strukture podataka sa uniformnim ili promenljivim gridom proširenim za karakteristične tačke i linije površi terena (poglavlje 3.1.1, Slika 3-3, Slika 3-4). Područje DMT-a deli se na manje pravougaone jedinice-celine jednake veličine (engl. *Computing Units – CU*). Za svaku jedinicu posebno se računa interpolaciona funkcija. Pored toga, za svaku jedinicu posebno se vode i informacije o svim linijskim segmentima koji se u njoj nalaze. Za slučaj kada su to prelomne linije područje jedne jedinice deli se na više celina i za svaku od ovih celina određuje se posebna interpolaciona funkcija. Na ovaj način omogućeno je formiranje i efikasno rukovanje DMT-om koji ima i do milijardu visina, bez kompromisa u pogledu kvaliteta DMT-a. Podržane su praktično sve funkcije za formiranje i analizu DMT-a: formiranje DMT-a sa ili bez filtriranja podataka, preklapanje više DMT-ova, konstrukcija izohipsi, izrada podužnih i poprečnih profila, izrada karata i modela nagiba terena, DMT algebra, senčeni prikaz terena, itd. (*INPHO 2004a*).

Osnovni metod interpolacije je linearna predikcija po metodi najmanjih kvadrata (kolokacija ili kriging - poglavlje 3.2.2). Podržano je i pretprocesiranje podataka sastavljenih od izohipsi. Za to su korišćene procedure bazirane na TIN-u slične onim koje su razvijene u ovom radu (poglavlje 3.4.2.1.1, *Heitzinger 2001*). Obezbeđeno je rigorozno poštovanje strukturnih i prelomnih linija terena. Posebno je značajna mogućnost filtriranja podataka s obzirom na slučajne greške u visinama. Pri tome je omogućeno definisanje različite visinske tačnosti za pojedine kategorije podataka. Sve ovo su opcije koje su relativno retko podržane kod standardnih GIS sistema.

Najnovija verzija softvera nudi: platformsku nezavisnost (razne verzije UNIX-a i Windows-a), bogat korisnički interfejs (Slika 5-6), paralelnu obradu podataka, vezu sa *TopDM* podsistemom za arhiviranje i



rukovanje velikom količinom primarnih i sekundarnih DMT podataka u okviru RDBMS-a, mogućnost korišćenja funkcionalnosti SCOP-a u drugim aplikacijama preko poziva funkcija, itd.



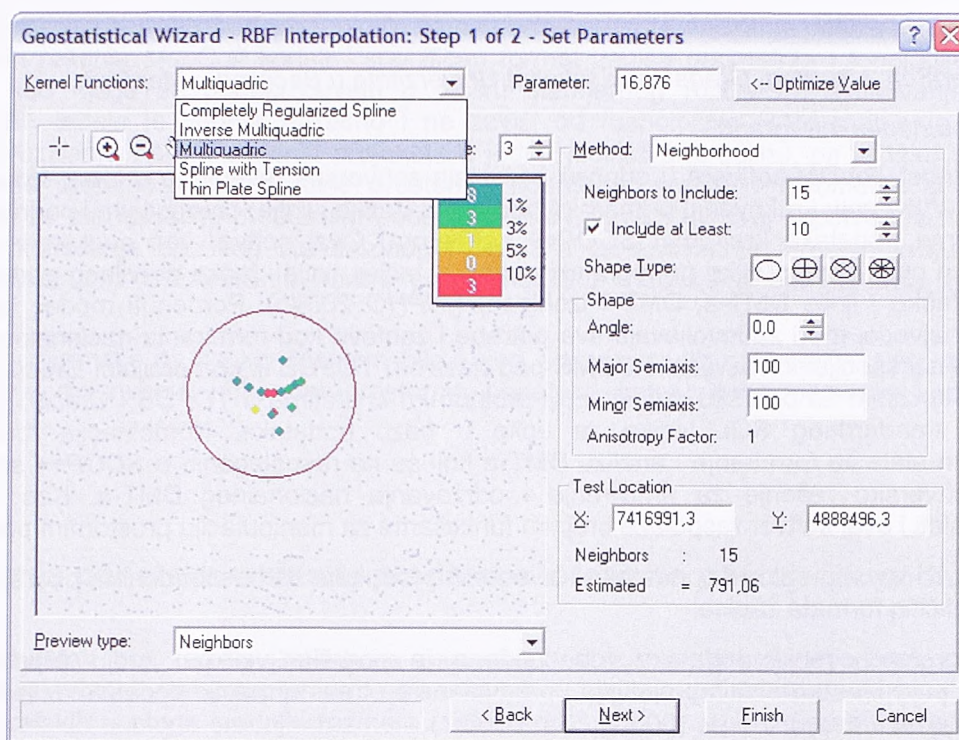
Slika 5-6 : Grafičko okruženje softvera SCOP++; prikazani su originalni ulazni podaci (tačke sistematskog samplinga sa kotama i prelomne linije terena), konstruisane izohipse i struktura formiranog DMT-a (podela na CU jedinice i tačke grida); u desnom delu slike vide se dijalozi sa parametrima za formiranje DMT-a

Geomedia i ArcGIS, najrasprostranjeniji komercijalni GIS softverski paketi raspolažu implementacijama svih značajnijih metoda interpolacije podataka. U prethodnim poglavljima je već naglašeno da ovi softverski alati omogućavaju rad sa izuzetno velikom količinom podataka korišćenjem komercijalnih RDBMS servera baze podataka. Ako se za oblik organizacije finalnog DMT-a izabere grid, tj. sistem visina u pravilnoj mreži (DMV - digitalni model visina, engl. DEM - Digital Elevation Model), onda ovi softverski alati mogu da ponude čitavu paletu standardnih formata za zapis, od rasterskih formata opšteg tipa do specijalizovanih formata za arhiviranje DEM-a od kojih su neki i nacionalni standardi. Spisak metoda interpolacije kojima raspolaže ArcGIS dat je u poglavlju 4.7.1. Podržani su i grid i TIN modeli podataka, s tim da se u jednom projektu može kreirati i koristiti više ovakvih modela. Geomedia za sada podržava samo grid model podataka, ali je Intergraph već imao proizvode sa TIN strukturom podataka (Terrain Modeller), tako da nije isključeno da će u novijim verzijama i ovaj model biti podržan.

ANUDEM je interesantan, jer se on koristi u Australiji za izradu DMT-a celog kontinenta. Korišćeni su podaci digitalizacije karata 1:100000 dopunjenih strukturnim linijama (Hutchinson 1988, Hutchinson 1989, Hutchinson 1996, w21). Osnovni metod interpolacije kod ovog softvera je metod konačnih razlika sa uslovom odvodnjavanja (poglavlje 3.4.1.3). Metod je specijalno razvijen za formiranje DMT-a na osnovu podataka koji se u najvećem delu sastoje od izohipsi.

U svakom slučaju, kod formiranja DMT-a, bez obzira o kom softverskom alatu je reč, treba posebno voditi računa o izboru odgovarajuće metode interpolacije i izboru njenih opcija i parametara za rad. Većina softverski alata ima na raspolaganju više metoda interpolacije koje, u zavisnosti od rasporeda i gustine ulaznih podataka, njihovog kvaliteta i vrste terena, mogu dati vrlo različite rezultate. Problem izbora parametara interpolacije je posebno kvalitetno rešen kod ArcGIS softverskog paketa u okviru njegove ekstenzije Geostatistical Analyst. Za najveći broj implementiranih metoda interpolacije predviđeno je podešavanje velikog broja parametara obrade, a obezbeđena je i pomoć korisniku kod izbora optimalnih vrednosti za ove parametre (Slika 5-7). Podržane su i metode krosvalidacije i validacije, tako da korisnik može oceniti kvalitet interpolacije i bez potrebe za obezbeđivanjem kontrolnih tačaka.





Slika 5-7 : Izbor optimalnih parametara interpolacije – ArcGIS Geostatistical Wizard

Zato, ma kako kvalitetan softver bio, još uvek najveću odgovornost i uticaj na kvalitet dobijenih rezultata ima onaj ko rukuje tim softverom. Upravo zato je problemu izbora odgovarajuće metode interpolacije i njenih parametara u okviru ovog istraživanja posvećena naročita pažnja (poglavlja 3 i 4). Analizirane su metode interpolacije koje su standardno implementirane u većini značajnijih softverskih paketa koji nude podršku za formiranje i analizu DMT-a, ali i postupci i softverska rešenja koja su razvijena u okviru ovog istraživanja (poglavlje 4.7).

Na tržištu postoji čitav niz drugih softvera koji takođe, u većoj ili manjoj meri, ispunjavaju postavljene zahteve. U svakom konkretnom slučaju trebalo bi proveriti mogućnost njihove primene, a posebno u pogledu primenljivosti za formiranje i rukovanje DMT-om sa velikom količinom podataka, ali treba imati u vidu i specifičnost ulaznih podataka (struktura, tačnost, tip terena). Sasvim je izvesno da budućnost pripada komercijalnim GIS softverima tipa *Geomedia* ili *ArcGIS*. Ovo proizilazi iz nemerljivo veće snage razvojnih timova (samog proizvođača softvera, ali i nezavisnih proizvođača dodatka i proširenja) koji stoje iza ovih produkata, ali i same koncepciji na kojoj oni počivaju. Međutim, u ovom trenutku izbor *SCOP*-a se čini kao najbolje rešenje jer se u jednom zaokruženom sistemu već nudi sve ono što je neophodno za rukovanje nacionalnim DMT-om. Stav autora je da se za ove potrebe vrlo uspešno mogu koristiti i softverski alati razvijeni u okviru ovog istraživanja.

### 5.6.3 Softver za arhiviranje i održavanje DMT-a

Za ove namene treba koristiti softver koji ima podržane funkcije za prikupljanje i verifikaciju podataka DMT-a, ali i funkcije za formiranje i analizu DMT-a. Naravno, mogu se koristiti i kombinacije pojedinih softverskih rešenja da bi se obezbedila zahtevana funkcionalnost. Ovde je poseban naglasak na mogućnosti rukovanja velikom količinom prostornih podataka. Prednost zato treba dati alatima koji podatke čuvaju u okviru komercijalnih servera relacionih baza podataka (*Oracle*, *MS SQL Server* i dr.) , jer se time značajno povećava efikasnost rukovanja podacima i mogućnosti za njihovu manipulaciju. Najnovije verzije ovih RDBMS servera nude i proširenja koja omogućavaju indeksiranje i efikasnu manipulaciju sa prostornim podacima (tačke, linije, poligoni,...) i velikim količinom rasterskih datoteka, tako da se rukovanje primarnim podacima DMT-a može relativno jednostavno realizovati. Neki od alata koji u većoj ili manjoj meri zadovoljavaju ove zahteve su:

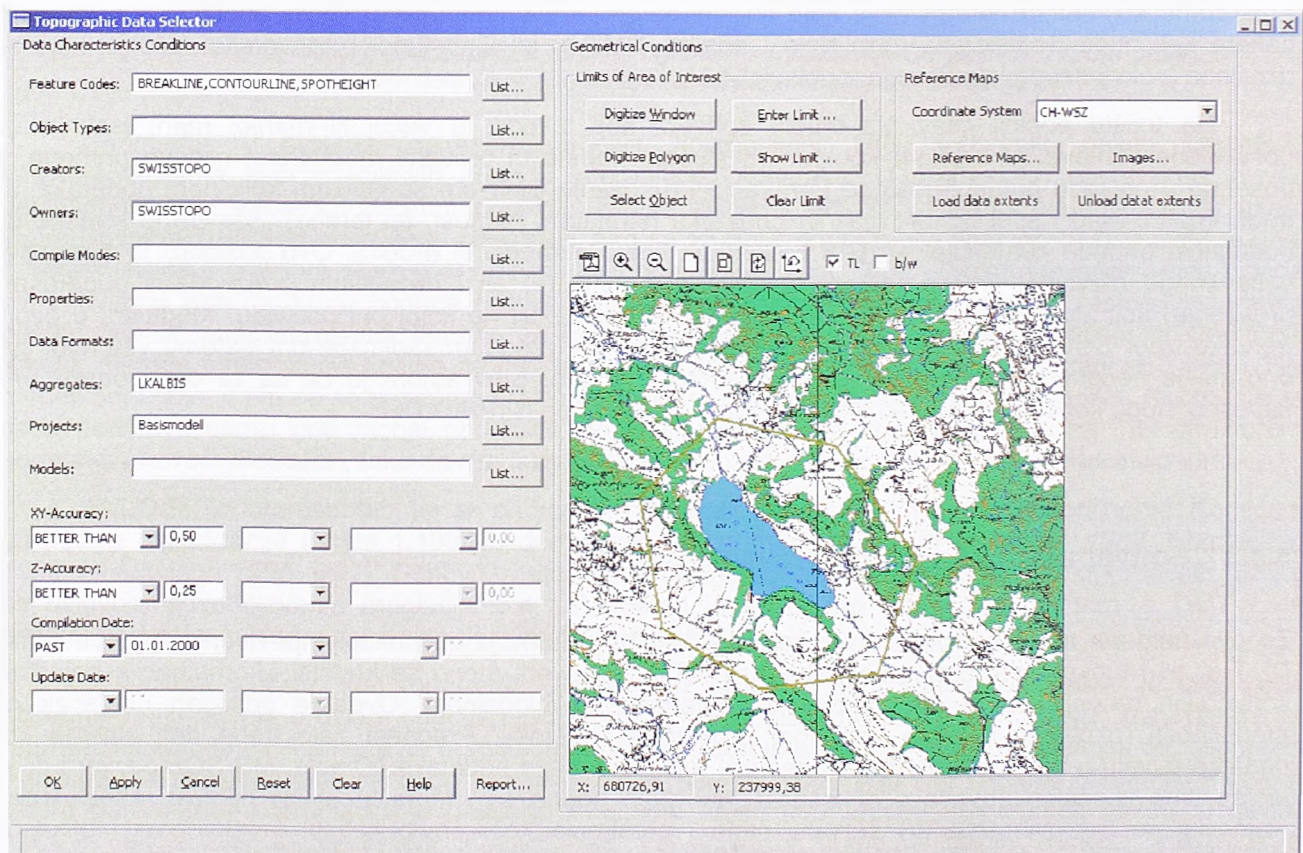
- *SCOP++* i modul *TopDM*, *Institute for Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna University of Technology, Inpho GmbH*;



- ArcGIS, ESRI;
- MapSoft i Surfing, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, MapSoft;
- Geomedia, Intergraph.

Prednost *TopDM* softvera u odnosu na ostala softverska rešenja je u tome što on pored podrške efikasnom arhiviranju i rukovanju primarnim podacima (tačke i linije) omogućava i podršku radu sa velikim DMT bazama podataka kreiranim *SCOP++* softverom. Ovaj softver već nudi korisniku gotov model podataka za primarne podatke (topografski podaci – tačke, linije i tačke pravilnog grida) i izvedene DMT produkte (tačke i linije DMT-a, DMT i izohipse) (*INPHO 2004b*). Pomenuti model, kao i sam *TopDM* softver u najvećoj meri zadovoljavaju sve potrebe i zahteve kod formiranja nacionalnog DMT-a. Softver opciono koristi specijalno razvijeni RDBMS pod nazivom *TOPDB* ili komercijalni *Oracle* sistem sa *Oracle Spatial* ekstenzijom za podršku manipulaciji prostornim entitetima. I *TOPDB* i *Oracle Spatial* obezbeđuju proširenja standardnog SQL jezika za upite u bazu podataka. Kombinacija funkcija *TopDM*-a i sofisticiranih alata za formiranje i analizu DMT-a koji su na raspolaganju u *SCOP++* softveru predstavlja idealno softversko rešenje za arhiviranje i održavanje nacionalnog DMT-a. Kao i standardni GIS softverski alati i ovaj softver raspolaže brojnim funkcijama za manipulaciju prostornim podacima:

- uvoz i izvoz prostornih podataka i izvedenih produkata sa obezbeđenom podrškom velikom broju različitih formata zapisa;
- georeferenciranje podataka (obezbeđena je podrška velikom broju elipsoida, koordinatnih sistema i kartografskih projekcija, predviđene su transformacije podataka iz jednog koordinatnog sistema u drugi);
- vođenje meta-podataka za arhivirane podatke;
- izmene podataka u grafičkom okruženju sa mogućnošću prikaza georeferenciranih rasterskih slika (promena geometrije i atributa entiteta, brisanje, dodavanje novih entiteta);
- selekcija prostornih podataka po prostornom kriterijumu i atributima (Slika 5-8).



Slika 5-8 : Interfejs *TopDM* softvera za rukovanje DMT podacima; prikazan je primer dijaloga za selekciju podataka (*INPHO 2004b*)

Svi ostali GIS softverski alati takođe raspolažu sličnim funkcijama za arhiviranje i rukovanje velikom količinom prostornih podataka. Jedino je tu *MapSoft* znatno inferiorniji u pogledu funkcionalnosti (manji



broj podržanih formata, nisu obezbeđene funkcije za napredno georeferenciranje podataka). Za razliku od ostalih softverskih rešenja *MapSoft* koristi i specifičan format zapisa geometrije i topologije prostornih podataka, ali i kod njega se podaci čuvaju u okviru standardnog RDBMS-a. Rukovanje podacima smeštenim u DBF tabele je veoma efikasno i ne zavisi od raspoložive RAM memorije. Takođe je omogućeno i povezivanje više nezavisnih projekata u jednu jedinstvenu celinu, pa je tako obezbeđena mogućnost obrade izuzetno velike količine prostornih podataka. *ArcGIS* i *Geomedia* koriste *Oracle Spatial* ekstenziju za manipulaciju prostornim podacima. *ESRI* je razvio i svoj sopstveni sistem *ArcSDE* koji omogućava korišćenje bilo kog standardnog RDBMS-a za arhiviranje i manipulaciju prostornim podacima. Pomenuti alati ispunjavaju norme propisane *ISO* i *OpenGIS* standardima za prostorne podatke.

Sve ovo je garancija da se korišćenjem bilo kojeg od pomenutih softverskih alata može postići efikasno rukovanje masovnom količinom prostornih podataka kakvu treba očekivati kod formiranja nacionalnog DMT-a.

## 5.7 Prikupljanje podataka visinske predstave terena sa postojećih podloga

Prvi i osnovni zadatak kod izrade DMT-a na osnovu podataka sa postojećih podloga predstavlja prevođenje svih relevantnih informacija sa ovih podloga u digitalni oblik. Prevođenje podataka sa postojećih kartografskih podloga srednjih razmera (1:5000 do 1:50000) se u izvesnom broju institucija u našoj zemlji već duže vreme sprovodi. Međutim, sve ove digitalizacije su uglavnom vezane za konkretne poslove na projektima ograničenog obima. Izuzetak od ovih poslova je projekat pokrenut u Vojnogeografskom institutu. Cilj tog projekta je prevođenje u digitalni oblik podataka sa svih karata razmere 1:25000. U poglavlju 5.3.1 je konstatovano da ove karte sistematski pokrivaju celokupnu državnu teritoriju Srbije i Crne Gore, a prikazane su i osnovne karakteristike ove serije karata.

Kao što je to već rečeno u poglavlju 5.5 digitalizacija podataka sa postojećih podloga obuhvata sledeće faze rada:

- skeniranje svih podloga koje sadrže relevantne podatke za formiranje DMT-a;
- utvrđivanje i otklanjanje deformacija skeniranih podloga, tj. kalibracija i georeferenciranje;
- vektorizacija izohipsi;
- digitalizacija ostalog sadržaja (kote, trigonometri, hidrografija);
- kontrola i korekcija povezivanja linijskog sadržaja na granicama listova karata;
- verifikacija i korekcija prikupljenih podataka u smislu okrivanja grubih grešaka drugih i nekonzistentnosti u podacima.

Treba istaći da se faze koje slede nakon georeferenciranja i otklanjanja deformacija skeniranih podloga mogu samo uslovno posmatrati kao izdvojene faze. Naime, kontrola i korekcija povezivanja sadržaja, verifikacija i korekcija grešaka mogu se izvoditi paralelno sa postupcima vektorizacije.

Razmatranja u okviru ovog poglavlja uglavnom se odnose na digitalizaciju podataka sa TK25. I pored toga, najveći deo tih razmatranja može se u potpunosti i bez bitnijih izmena primeniti i na digitalizaciju ODK. U slučajevima gde postoje značajne razlike kod digitalizacije podataka sa ovih topografskih podloga, to je posebno naglašeno i razmatrano.

### 5.7.1 Skeniranje podloga i primarna obrada skeniranih podloga

Zahvaljući napretku računarskog hardvera i softvera, postupak skeniranja je u velikoj meri usavršen i danas ne predstavlja neki značajniji problem ni u tehnološkom ni u finansijskom pogledu. Veliki broj institucija u našoj zemlji već se opremio kvalitetnim skenerima velikog formata, a postoji i dosta firmi koje pružaju usluge skeniranja. Skeniranje podloga većeg formata, u kolor tehnici i visokoj rezoluciji (preko 400 DPI) je praktično standardna procedura za sve značajnije projekte koji se zasnivaju na postojećim kartografskim podlogama.



### 5.7.1.1 Obezbeđenje i kontrola kvaliteta skeniranja

Obezbeđenje i kontrola kvaliteta skeniranja je vrlo važna stvar, s obzirom na to da se propusti učinjeni u okviru ove faze rada teško otklanjanju kasnije i mogu znatno da otežaju obradu u sledećim fazama rada, ali i da snize kvalitet izlaznih rezultata. Ovo je posebno važno istaći kada je reč o velikim projektima, kao što je to na primer projekat skeniranja kompletnog kartografskog materijala razmere 1:25000 celokupnu državnu teritoriju.

Ono na šta posebno treba obratiti pažnju kod skeniranja su greške koje neminovno prate ovaj postupak. Tu se pre svega misli na greške geometrijskog karaktera, tj. deformacije skenirane slike. Ove deformacije su najčešće posledica nesavršenosti ili kvarova na skeneru, ali često i rezultat nedovoljno stručne realizacije samog skeniranja. Uobičajeno je da se korisnik uglavnom zadovolji tehničkim karakteristikama skenera koje je proizvođač uređaja specificirao u pratećoj dokumentaciji. U praksi, na konkretnim poslovima skeniranja, neretko se ispostavi da je situacija znatno drugačija, tj. da se na skeniranim slikama uočavaju deformacije koje su znatno veće od očekivanih. Ovo je posledica nekoliko uticaja:

- ne postoji ustaljena praksa servisiranja skenera, što podrazumeva ispitivanje i kvalitetnu kalibraciju skenera;
- skener se koristi za skeniranje podloga koje su u lošem stanju i na takvim materijalima da dolazi do promena na mehanizmu za provlačenje podloga kroz skener;
- postupak skeniranja sprovode osobe koje nisu dovoljno stručne i osposobljene za ovaj posao.

Kada je reč o greškama koje su posledica nesavršenosti skenera, tu pre svega treba obratiti pažnju na dva najčeća izvora grešaka. Prvi izvor grešaka je loše poravnanje (aliniranje) CCD glava skenera. Na valjkastim skenerima koji se najčešće koriste kod nas nalazi se više CCD kamera kojima se realizuje skeniranje jedne linije piksela. Potrebno je ispitati i po potrebi rektifikovati ove kamere tako da budu upravne na osu skenera. Za ove potrebe uz skener se isporučuje i odgovarajući softver koji olakšava proceduru ispitivanja i kalibracije CCD glava.

Drugi izvor grešaka, koji je znatno opasniji, jer proizvodi veće deformacije i teže se koriguje, je nesavršenost mehanizma za transport podloge koja se skenira kroz skener. Dugotrajnim radom, a posebno sa podlogama koje odstupaju od standarda specificiranih od strane proizvođača skenera, dolazi do oštećenja transportnog mehanizma. Ova oštećenja se prilikom skeniranja manifestuju tako što dolazi do "proklizavanja" podloge, tj. do neravnomernog transporta podloge ispred CCD kamera. Na taj način dolazi do ispuštanja ili višestrukog ponavljanja jednog ili više redova piksela. Ove greške se vrlo teško uočavaju vizuelnim pregledom. Greške ovog tipa se mogu minimizirati korišćenjem kvalitetnih skenera, njihovi pravilnim rukovanjem i servisiranjem. Idealno rešenje je nabavka ravnog skenera velikog formata čime bi se greške skeniranja mogle u potpunosti ukloniti.

Iako na prvi pogled može da se učini da postupak skeniranja ne zahteva posebnu stručnost, u praksi se pokazalo da veliki deo problema kod digitalizacije postojećih podloga dolazi upravo kao posledica nestručnog skeniranja. Korektno skeniranje podrazumeva da dobijena digitalna slika ispunjava postavljene zahteve u pogledu kvaliteta, kako u geometrijskom, tako i u radiometrijskom smislu. Kada je reč o radiometrijskom kvalitetu skenirane slike, on se uglavnom postiže izborom optimalnih parametara skeniranja. Ovo podešavanje parametara skeniranja izvodi se u okviru softvera za skeniranje koji se najčešće isporučuje uz sam softver. Ovi parametri najviše zavise od same podloge koja se skenira, tj. sadržaja koji se skenira i eventualne zaprljanosti podloge. U nekim slučajevima ovi parametri se biraju i u zavisnosti od namene za koju se podloge skeniraju. Moguće su i naknadne korekcije skenirane slike u softveru za obradu slika.

Adekvatno obezbeđenje kontrole kvaliteta u okviru postupka skeniranja veće količine podloga podrazumeva periodično kontrolisanje i kalibrisanje skenera, odnosno njegovo servisiranje. Pored toga, potrebno je praćenje rezultata koji se dobijaju kod kalibracije i otklanjanja deformacija skeniranih podloga. Statističke analize koje se izvode nad skeniranom podlogom (rasterskom slikom) imaju za cilj utvrđivanje deformacija te slike. Ove deformacije mogu biti posledica deformacija materijala na kome je nanet kartografski sadržaj ili su te deformacije nastale tokom skeniranja. Najčešće se radi o kombinaciji ova dva izvora grešaka. Ako se pretpostavi da su deformacije kartografskog materijala uglavnom konstantne, onda svaka promena u veličini deformacija koja se utvrdi prilikom statističke analize merenja ostvarenih na skeniranoj podlozi (kalibracija podloge) mogu ukazivati da je došlo do promena u funkcionisanju skenera. Zato se preporučuje da se paralelno sa skeniranjem vrši i sukcesivno kalibrisanje i georeferenciranje skeniranih podloga.

### 5.7.1.2 Izbor rezolucije skeniranja i formata zapisa digitalne slike

Izbor odgovarajuće rezolucije skeniranja je direktno povezan sa veličinom fajlova u kojima se arhiviraju skenirane topografske podloge. U sledećoj tabeli date su očekivane veličine fajlova u Mb za listove topografske karte i reproduksijske originale 1:25000, a u zavisnosti od rezolucije skeniranja, broja bita po pikselu, formata zapisa i tipa kompresije slike. Format podloge, uključujući tu i vanokvirni sadržaj je 500x700mm.

Rezolucija [DPI]	Format slike [piksel]	Nekomprimovani TIFF			Komprimovani TIFF			ECW	
		1bpp	8bpp	24bpp	CCIT4 1bpp	LZW 8bpp	LZW 24bpp	8bpp	24bpp
300	5906x8268	6	47	140	~0.5	26	70	~5	~12
400	7874x11024	10	83	248	~1.0	40	130	~8	~22
500	9843x11378	16	129	388	~1.5	62	200	~12	~35
600	11811x16535	23	186	559	~2	90	290	~17	~45

Tabela 5-6 : Veličine rasterskih slika u Mb za list karte 1:25000 (format 500x700mm), u zavisnosti od rezolucije skeniranja, broja bita po pikselu i formata zapisa

Veličine fajlova kod komprimovanog TIFF formata i ECW formata treba uzeti sa rezervom, jer su date samo približne vrednosti. Kod ovih formata zapisa veličina fajlova u velikoj meri zavisi od sadržaja na konkretnom listu karte, a kod ECW formata i od stepena kompresije. Sadržaj karte zavisi od tipa sadržaja (vrsta oleate), kao i od konkretnih pojava na terenu koje su na karti predstavljene (kompleksnost visinske predstave, količina vegetacije, gustina detalja i sl.). Stepenn kompresije koji se postiže korišćenjem JPEG2000 i MrSID formata vrlo je sličan onom kod ECW formata. Slične vrednosti mogu se sračunati i za skenirane listove ODK.

Na osnovu podataka iz prethodne tabele, zahteva u pogledu kvaliteta skeniranih podloga i trenutnih mogućnosti računarskog hardvera i softvera, mogu se dati sledeće preporuke u pogledu izbora optimalne rezolucije skeniranja:

- radne originale skenirati u rezoluciji 400-600 DPI u crno-beljoj tehnici (1bpp) sa korišćenjem nekog formata zapisa kod koga je primenjena kompresija podataka bez gubitka kvaliteta (TIFF CCIT G4 i sl.);
- kolornu topografsku kartu skenirati u rezoluciji 300 ili 400 DPI (i višoj) u koloru (24bpp) takođe sa korišćenjem nekog formata zapisa kod koga je primenjena kompresija podataka bez gubitka kvaliteta (TIFF LZW i sl.).

Ako se pretpostavi da ima ukupno 850 podloga, da će se skeniranje svih podloga obaviti u rezoluciji 400DPI (24 bita po pikselu za kolorne karte i 1 bit po pikselu za reproduksijske originale) i da se skenirane podloge arhiviraju korišćenjem CCIT4 formata za reproduksijske originale i nekomprimovanog TIFF formata za kolorne karte, dobija se procena memorijskih zahteva u iznosu od oko 200Gb. Ako se za kolorne karte koristi LZW format, onda se ti zahtevi smanjuju na oko 100Gb, a sa korišćenjem ECW formata na približno 20Gb.

U Vojnogeografskom institutu je već završena kampanja skeniranja kompletnog topografskog materijala 1:25000. Reprodukcijski originali sa visinskom predstavom (braon oleata) i reprodukcijski originali situacije (crna oleata, u žargonu: "gerip") skenirani su u rezoluciji 508 DPI. Ovakva rezolucija skeniranja izabrana je da bi se dobio piksel skenirane slike od 0.05mm na karti, odnosno 1.25m u prirodi. Topografske karte i ostali reprodukcijski originali skenirani su u rezoluciji od 254 DPI. Topografske karte su skenirane u koloru sa 24 bita po pikselu, a reprodukcijski originali u crno-beljoj tehnici, tj. sa 1 bitom po pikselu. Svi fajlovi su arhivirani u nekomprimovanom TIFF formatu. S obzirom na gore navedene činjenice, razumljivo je da prethodna razmatranja najverovatnije ne mogu da se iskoriste u okviru projekta formiranja nacionalnog DMT-a na osnovu ovih podloga, ali mogu biti interesantna za eventualne projekte digitalizacije ODK podloga.

U softverskim aplikacijama treba obezbediti, kad god je to moguće, korišćenje naprednih formata za kompresiju slika (ECW, MrSID, JPEG2000 i sl.) za prikaz i manipulaciju sa skeniranim kolornim topografskim podlogama. Ovi formati omogućavaju vrlo visok stepen kompresije, izuzetno brz prikaz i pristup željenim pikselima slike, minimalne memorijske zahteve, a sve to uz prihvatljiv gubitak kvaliteta sadržaja. Za sve primene gde se vrši digitalno procesiranje sadržaja ili štampanje izlaznih dokumenata gde se traži visok kvalitet, treba koristiti formate koji obezbeđuju kompresiju bez gubitka kvaliteta sadržaja.



### 5.7.1.3 Digitalna obrada skeniranih podloga

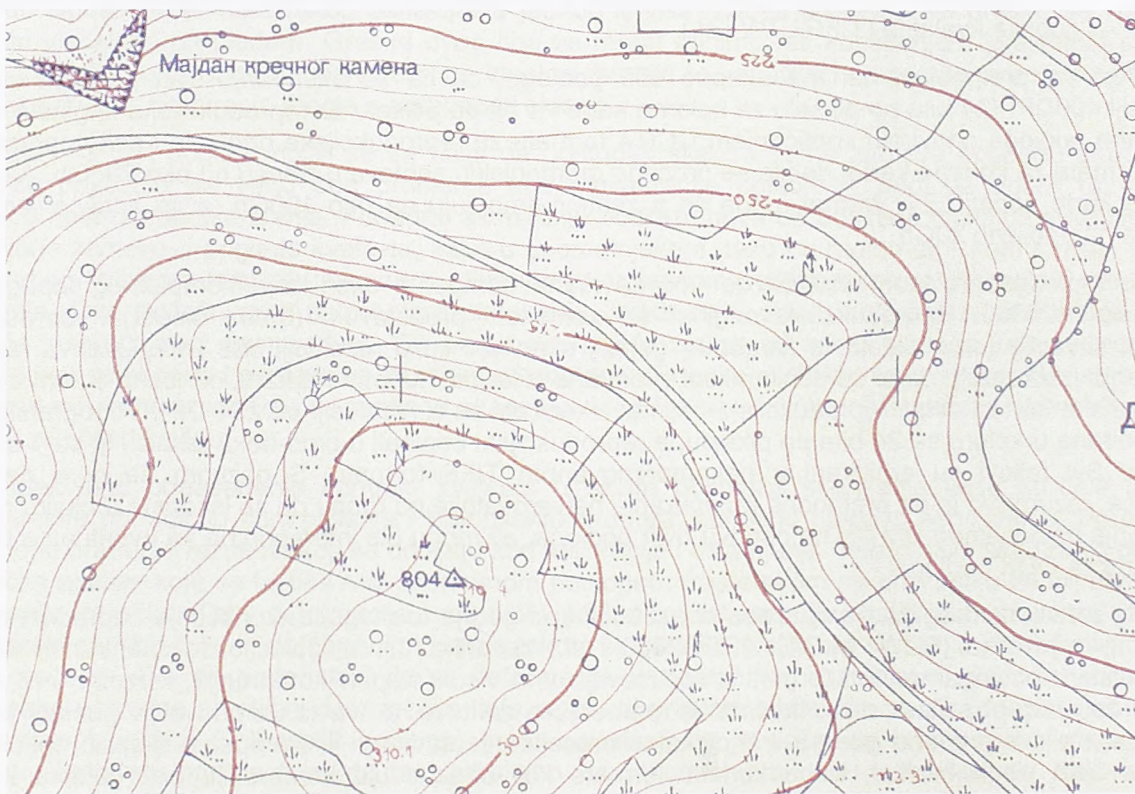
Digitalna obrada skeniranih podloga može se izvoditi pre ili posle otklanjanja geometrijskih deformacija i georeferenciranja podloga. Izuzetak su one operacije nad slikom koje menjaju dimenzije slike, kojima se translira ili menja razmera sadržaja, i druge operacije kojima se menja geometrija sadržaja slike. Sve takve operacije moraju se obaviti pre georeferenciranja skenirane podloge. U suprotnom, nakon promene geometrije slike, moralo bi ponovo da se izvrši njeno georeferenciranje, što je dodatan, a za veću količinu karata i značajan posao.

Digitalna obrada skeniranih podloga je važna i opravdana u sledećim slučajevima:

- skenirana podloga će se koristiti za automatsku vektorizaciju sadržaja, pa je treba "očistiti" od suvišnog sadržaja i nečistoća koje bi otežale softversko procesiranje slike;
- skenirana podloga predstavlja topografsku kartu u koloru, a planira se samo vektorizacija sadržaja predstavljenog bojama u određenom opsegu;
- skenirana podloga će biti korišćena za održavanje i ažuriranje topografske karte u rasterskom obliku, što predviđa i njeno periodično publikovanje.

Ovde se neće detaljno ulaziti u procedure za digitalnu obradu slika. Na tržištu postoji relativno jeftin softver visokog kvaliteta koji može da odgovori ovim zahtevima. Kao što je već rečeno u jednom od prethodnih poglavlja, *PhotoShop* firme *Adobe* je tipičan predstavnik takvih softverskih alata. U okviru ovog softverskog paketa zastupljene su sve važnije operacije za digitalnu obradu slika. Te operacije su takođe na raspolaganju i u okviru specijalizovanih softverskih alata za rukovanje skeniranim topografskim podlogama, (*IRAS/C* firme *Intergraph*, *ArcRaster* firme *ESRI*, *R2V* firme *Able Software Corp (w39)*, *Easy Trace* firme *Easy Trace Group*, i dr. ). Nivo zahtevane obrade je direktno uslovljen daljim procesiranjem skeniranih podloga. U zavisnosti od samoga sadržaja karte, zaprljanosti podloge i vrste obrade koja sledi, ta obrada može biti minimalna (može čak potpuno izostati), ili pak može predstavljati vrlo značajnu stavku kada se, recimo, planira korišćenje automatizovanih procedura za automatsku vektorizaciju izohipsi, njihovo povezivanje na ivicama listova karte i automatizovano dodeljivanje visina (*Wu 1993, Kamada 1990*). Tada je izuzetno važno da se podloga dobro pripremi, u suprotnom dobiće se rezultati koji iziskuju dosta naknadnog manualnog rada na njihovom korigovanju (*Šoškić 2001*).

Sa aspekta ovog istraživanja posebno je interesantna obrada koja ima za cilj izdvajanje sadržaja sa visinskom predstavom tj. izohipsi i njihovih kota sa skeniranih topografskih karata u koloru. Tako izdvojen sadržaj može se koristiti za poluautomatsku ili automatsku vektorizaciju izohipsi.

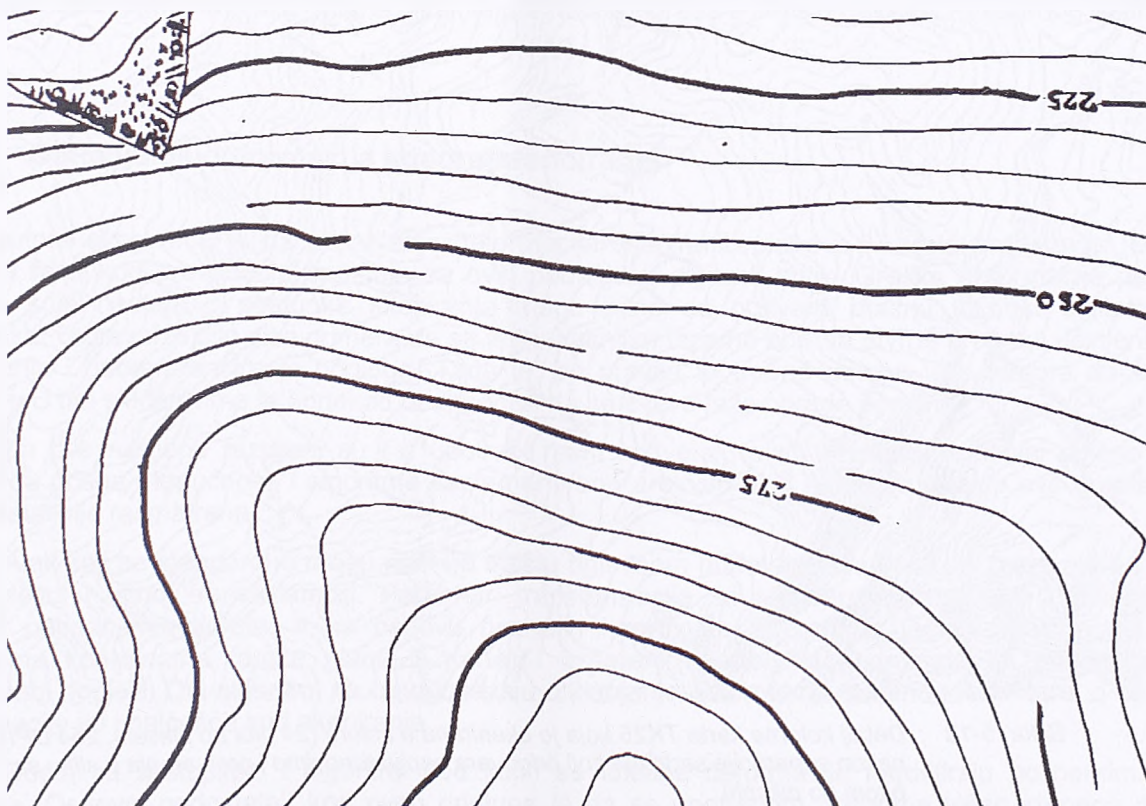


Slika 5-9 : Detalj kolorne karte ODK 1:5000 skenirane u koloru (24 bita po pikselu, 400 DPI)



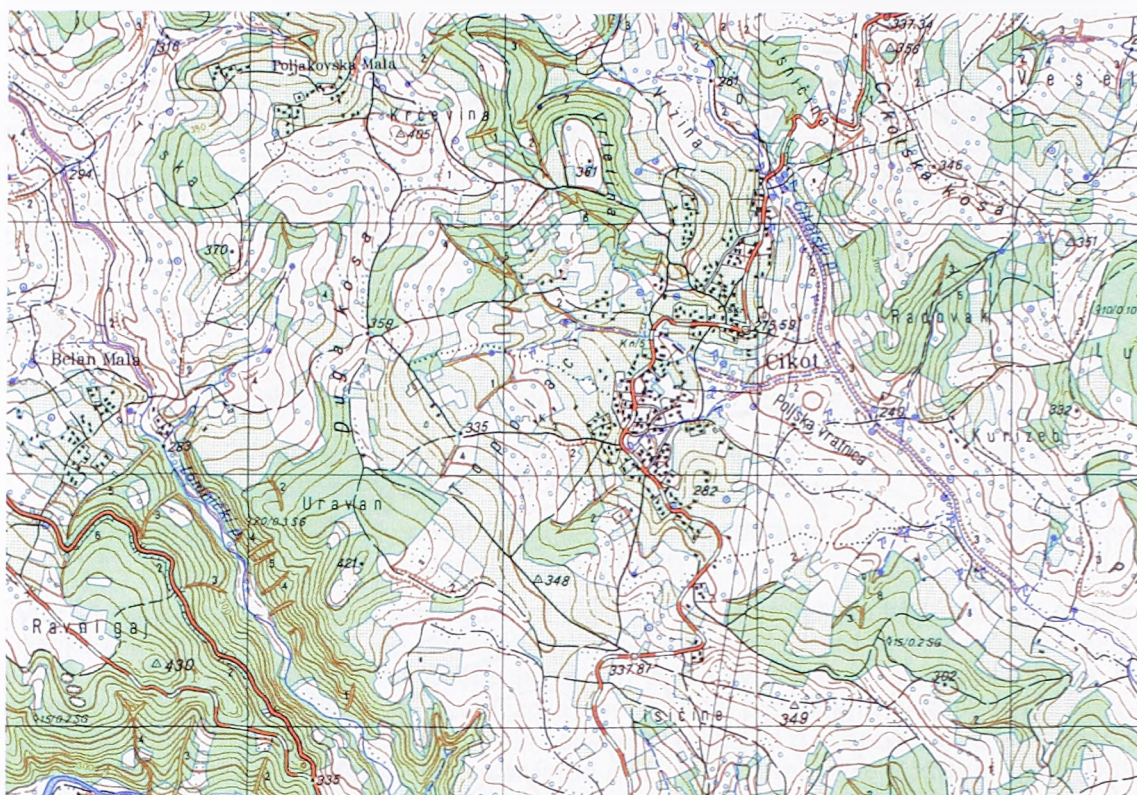


Slika 5-10: Detalj kolorne karte ODK 1:5000 koja je skenirana u koloru (24 bita po pikselu, 400 DPI), nakon separacije sadržaja koji odgovara sepija tonovima i pretvaranja u sliku sa 1 bitom po pikselu



Slika 5-11: Detalj oleate visinske predstave ODK 1:5000 skenirane u crno-beloj tehnici (1 bit po pikselu, 400 DPI)





Slika 5-12 : Detalj kolorne karte TK25 skenirane u koloru (24 bita po pikselu, 254 DPI)



Slika 5-13 : Detalj kolorne karte TK25 koja je skenirana u koloru (24 bita po pikselu, 254 DPI), nakon separacije sadržaja koji odgovara sepija tonovima i pretvaranja u sliku sa 1 bitom po pikselu

Ova mogućnost izdvajanja sadržaja visinske predstave sa kolornih karata interesantna je čak i u situaciji kada se raspolaže sa skeniranim radnim originalom visinske predstave na kome su i inače predstavljene samo izohipse sa kotama i karakteristični zemljišni oblici. Korišćenje podataka sa kolornih topografskih karata, a ne sa radnih originala, može na prvi pogled izgledati nelogično, posebno ako se



ima u vidu da se za karte kao podloga koristi papir koji trpi veće deformacije od astralona na kome su izrađeni reprodukcijски originali. Ovakav pristup može biti u potpunosti opravdan ako se utvrdi da su greške, tj. deformacije skenirane podloge koje nastaju tokom skeniranja tako velike da bitno utiču na izlaznu tačnost. Činjenica da svi reprodukcijски originali, pa i reprodukcijски originali visinske predstave (braon oleata) i hidrografije (plava oleata) od elemenata za georeferenciranje sadrže samo četiri pasera na uglovima korisnog prostora, logično upućuje na zaključak da nije moguće odrediti i eliminisati lokalne deformacije koje su posledica skeniranja ili deformacija same podloge. U tom slučaju, jedini način da se uoče i eventualno otklone nastale deformacije je da se sadržaj preklopi i uporedi sa sadržajem ostalih skeniranih radnih originala ili skeniranom topografskom kartom na kojoj se nalazi kompletan sadržaj sa svih oleata.

Prikupljanje podataka sa skeniranih kolornih karata je u odnosu na korišćenje skeniranih oleata visinske predstave (i drugih oleata) svakako zahtevnije u pogledu:

- primenjenih procedura;
- angažovanja računarskih resursa;
- utrošenog vremena, i
- stručnosti i iskustva koje se zahteva od operatera.

Iskustva na brojnim poslovima digitalizacije visinske predstave sa ODK u preduzeću Geokarta pokazuju da uspešna separacija sadržaja koji se odnosi na visinsku predstavu terena nije jednostavna i zahteva solidno iskustvo i eksperimentisanje sa različitim tipovima podloga. Parametri koji se tako odrede mogu biti primenjeni na veći broj karata koji imaju slične karakteristike i sadržaj. Na taj način vreme koje je potrebno za separaciju sadržaja nije značajno, s obzirom na vreme koje je potrebno za vektorizaciju linijskog sadržaja. Iskustva pokazuju da je za poluautomatsku vektorizaciju izohipsi sa skeniranih i obrađenih kolornih karata ODK potrebno oko 50% više vremena o odnosu na vreme potrebno za isti posao uz korišćenje skeniranih oleata visinske predstave. Za vektorizaciju karata TK25 je ovaj odnos još veći, jer je i gustina sadržaja po jednoj karti veća. Poluautomatska vektorizacija skeniranih podloga dobijenih separacijom kolornog sadržaja (Slika 5-10 i Slika 5-13) dosta je otežana i zahteva dosta često intervenisanje operatera tj. usmeravanje toka digitalizacije na prekidima izohipsi ili na mestima njihovog preseka za sadržajem koji nije uspešno isfiltriran. Treba naglasiti da, sem separacije boja, za skenirane podloge u ovim primerima nije rađena nikakva prethodna obrada u smislu čišćenja neželjenog sadržaja.

## 5.7.2 Otklanjanje deformacija i georeferenciranje

Stav autora ovog rada je da otklanjanje deformacija skeniranih planova i karata predstavlja jednu od kritičnih faza kod prevođenja sadržaja sa ovih podloga u digitalni oblik. Greške deformacija podloge i greške koje nastaju u postupku skeniranja mogu bitno da pokvare izlaznu tačnost digitalizovanih podataka. U praksi je bilo više primera da se tek u kasnijim fazama obrade utvrde propusti učinjeni tokom skeniranja i georeferenciranja podloga. Tada je, po pravilu, potrebno mnogo više napora da se stvar popravi. U tim slučajevima je ponekad neophodno da se čitave faze obrade ponove.

Za ove namene razvijeni su i u upotrebi razni softverski alati. Prosečni korisnici obično nisu u stanju da ocene mogućnosti i algoritme implementirane u okviru ovih alata, pa je zato ova problematika ovde detaljnije razmatrana.

Alati koji se standardno mogu naći na tržištu uglavnom nude algoritme koji se zasnivaju na prosto helmertovoj i afinoj transformaciji. Parametri transformacije se standardno određuju izravnanjem po metodi najmanjih kvadrata, a na osnovu poznatih koordinata referentnih tačaka (obično se radi o temenima koordinatne mreže plana ili karte) i izmerenih pikseljskih koordinata tih istih tačaka na skeniranoj podlozi. Ovi algoritmi ne omogućavaju otklanjanje deformacija lokalnog karaktera, a upravo te deformacije su i najčešće kod skeniranja.

Dosta su zastupljeni i algoritmi kod kojih se lokalne deformacije modeliraju polinomima višeg stepena. Osnovni nedostatak kod ovog pristupa je da se upotrebom polinoma višeg stepena mogu u interpolacionom području pojaviti znatno veće deformacije od onih koje su registrovane na referentnim tačkama. Uzrok za ovo je oscilatorno ponašanje interpolacione funkcije kada se ona modelira polinomima višeg stepena.



Nešto bolji pristup od polinomske transformacije je modeliranje deformacija primenom TIN-a sa temenima u referentnim tačkama. Na osnovu poznatih X i Y komponenti vektora deformacija u čvorovima TIN-a linearnom interpolacijom određuju se deformacije za zadatu tačku unutar svakog trougla. Ovakav algoritam implementiran je u okviru softvera *R2V* američke firme *Able Software (w39)*, razvijenog upravo za poluautomatsku i automatsku vektorizaciju sadržaja sa planova i karata. Sličan postupak koristi se i kod primene bilinearnih polinomskih zakrpa kada se radi o pravilnoj mreži referentnih tačaka.

Nedostatak svih do sada pobrojanih metoda je u tome što one za modeliranje deformacija koriste ili premali broj stepeni slobode, pa se deformacije nedovoljno otklanjaju, ili pak, koriste preveliki broj stepeni slobode pa mogu da se dobiju nerealno velike deformacije. Pored toga, ovi modeli, naročito oni sa velikim brojem stepeni slobode (polinomi višeg stepena, bilinearne zakrpe, TIN) nisu u stanju da otkriju grube greške, bilo da su one posledica oštećenja podloge, proklizavanja skenera ili grešaka kod merenja položaja referentnih tačaka na skeniranoj podlozi.

Pravo rešenje leži u primeni statističkih metoda za analizu vektora odstupanja na referentnim tačkama (*Mihajlović 1985*). To su linearna predikcija po metodi najmanjih kvadrata (kolokacija), tj. kriging. Kao što je to više puta rečeno, u osnovi radi se o istim metodama, samo su im nazivi različiti. Matematičke osnove ovih metoda date su u poglavlju 3.2.2. Ukratko, postupak se sastoji u odvojenoj analizi X i Y komponenti vektora odstupanja na referentnim tačkama nakon affine transformacije. Ove komponente tretiraju se kao stohastička funkcija dve varijable. Nakon empirijskog određivanja korelacione funkcije između vrednosti komponentata vektora odstupanja u referentnim tačkama, vrši se razdvajanje sistematskog (lokalna deformacija) i slučajnog dela komponente u svakoj referentnoj tački. Utvrđeni sistematski uticaji u svakoj referentnoj tački, posmatrano posebno za X i Y koordinatu, koriste se za interpolaciju deformacija u bilo kojoj tački skenirane podloge. Za razliku od ostalih metoda, ova metoda pouzdano otkriva grube greške, otklanja samo sistematske uticaje, tj. deformacije podloge, i vrlo uspešno modelira lokalne deformacije, sve kroz jedan jedinstveni matematički aparat.

Nakon utvđivanja deformacija podloge potrebno je formirati novu rastersku datoteku u kojoj će ove deformacije biti otklonjene. Pri tome se mogu koristiti različite metode resamplinga digitalne slike. Najčešće se koristi metoda najbližeg suseda. Po ovoj metodi za vrednost piksela izlazne slike uzima se vrednost najbližeg piksela iz polazne slike. U većini slučajeva ovakav metod resamplinga daje dobre rezultate, posebno kada je reč o skeniranom crtežu. Nedostatak ove metode je što se kao rezultat dobija slika sa "nazubljenim" sadržajem. Zato se kod obrade skeniranih fotografija bolji rezultati postižu primenom bilinearnog resamplinga. Tu se za određivanje vrednosti piksela izlazne slike koristi bilinearna interpolacija na osnovu vrednosti četiri piksela polazne slike. Pored ovih metoda resamplinga često se koristi i bikubna interpolacija. Kod ove metode resamplinga, vrednost piksela izlazne slike dobija se bikubnom interpolacijom na osnovu šesnaest vrednosti piksela polazne slike. Ovih šesnaest piksela polazne slike predstavljaju matricu piksela dimenzija 4x4 u čije središte pada piksel čija se vrednost interpoluje. Mana ove metode resamplinga je što se dobija izlazna slika manje oštine.

Problem otklanjanja deformacija posebno je delikatan kada je reč o skeniranju i digitalizaciji kartografskog materijala kao što su to reprodukcijски originali topografskih karata. Sa jedne strane zahteva se međusobno usaglašavanje skeniranog sadržaja svih oleata, a sa druge strane, za većinu reprodukcijских originala za georeferenciranje i otklanjanje deformacija na raspolaganju su samo četiri pasera na uglovima korisnog prostora karte. Ukoliko se proceni da je veličina deformacija koje su lokalnog karaktera tako velika da ugrožava tačnost skeniranih podloga, onda se moraju primeniti odgovarajući postupci da bi se te deformacije otklonile. Generalno, moguća su dva pristupa:

- otklanjanje deformacija kod rasterske podloge, i
- otklanjanje deformacija kod vektorizovanog sadržaja.

Oba pristupa se zasnivaju na tome da se izvrši "navlačenje" i "uklapanje" sadržaja koji je deformisan na sadržaj kod koga su deformacije otklonjene i za koji je urađeno korektno georeferenciranje. Kada je reč o topografskim podlogama, ovo bi značilo da se sadržaj radnih originala "navuče" na sadržaj kolorne karte. Svakako da je mnogo bolje da se to primeni već kod rasterske podloge, jer se time dobije korektna podloga za sve dalje operacije. Samo u slučajevima kada se ne raspolaže odgovarajućim softverom, ili su podaci već digitalizovani (vektorizovani) treba primeniti drugi pristup, tj. otklanjanje deformacija vektorskog sadržaja. Kada god je to moguće, rezultate georeferenciranja treba proveriti i vizuelno. To se može postići na dva načina:

- preklapanjem zasebno georeferenciranog i korigovanog rasterskog sadržaja (razne oleate i kolorna karta) korišćenjem opcije za transparentni prikaz podloga i provera slaganja sadržaja;
- učitavanjem više podloga koje se prostorno nadovezuju u jedinstveno okruženje (projekat) i provera slaganja sadržaja na spojevima podloga.

### 5.7.2.1 DigiScan - softver za kalibraciju i georeferenciranje skeniranih planova i karata

Autor ovog rada je još 1993. godine razvio softversko rešenje u okviru koga su implementirane sve pobrojane metode za utvrđivanje i otklanjanje deformacija skeniranih planova i karata, uključujući tu i linearnu predikciju po metodi najmanjih kvadrata (kolokacija). Konceptija prvobitne DOS aplikacije u najvećoj meri je zadržana i u poslednjoj *Windows 95/NT/2000/XP* verziji softvera *DigiScan 2000*. Implementirani algoritmi su provereni i potvrđeni kroz brojne primene, kako u praksi, tako i u okviru naučnih istraživanja.

Aplikacija je razvijena koristeći profesionalne alate za razvoj softvera i karakteriše je:

- savremena arhitektura koja omogućava dalji razvoj aplikacije i njeno eventualno povezivanje sa drugim aplikacijama;
- standardan Windows 95/2000/XP korisnički interfejs;
- veoma brza manipulacija rasterskim slikama;
- intuitivan rad i vrlo jednostavna obuka korisnika;
- podrška velikom broju rasterskih formata i tipova kompresije (TIFF, BMP, PCX, JPEG, EPS, GIF, MAC, CUT, ECW i drugi), kao i rad sa slikama u 1/4/8/24 bita po pikselu;
- osnovne operacije za obradu digitalnih slika i konverziju između podržanih formata;
- automatsko formiranje datoteke sa referentnim tačkama za georeferenciranje na osnovu zadatih parametara podloge (razmera, koordinate donjeg levog temena i dimenzije korisnog prostora, parametri koordinatne mreže);
- implementirane su sledeće metode za utvrđivanje i otklanjanje deformacija: Helmertova, afina, bilinearna, Forstnerova i polinomska transformacija, kao i kolokacija sa i bez filtriranja na referentnim tačkama;
- prikaz rezultata kalibracije i georeferenciranja skenirane podloge u tekstualnom i grafičkom obliku;
- efikasna i kvalitetna rektifikacija (otklanjanje deformacija) skenirane podloge korišćenjem različitih algoritama za resampling slike (najbliži sused, bilinearni i bikubni resampling).

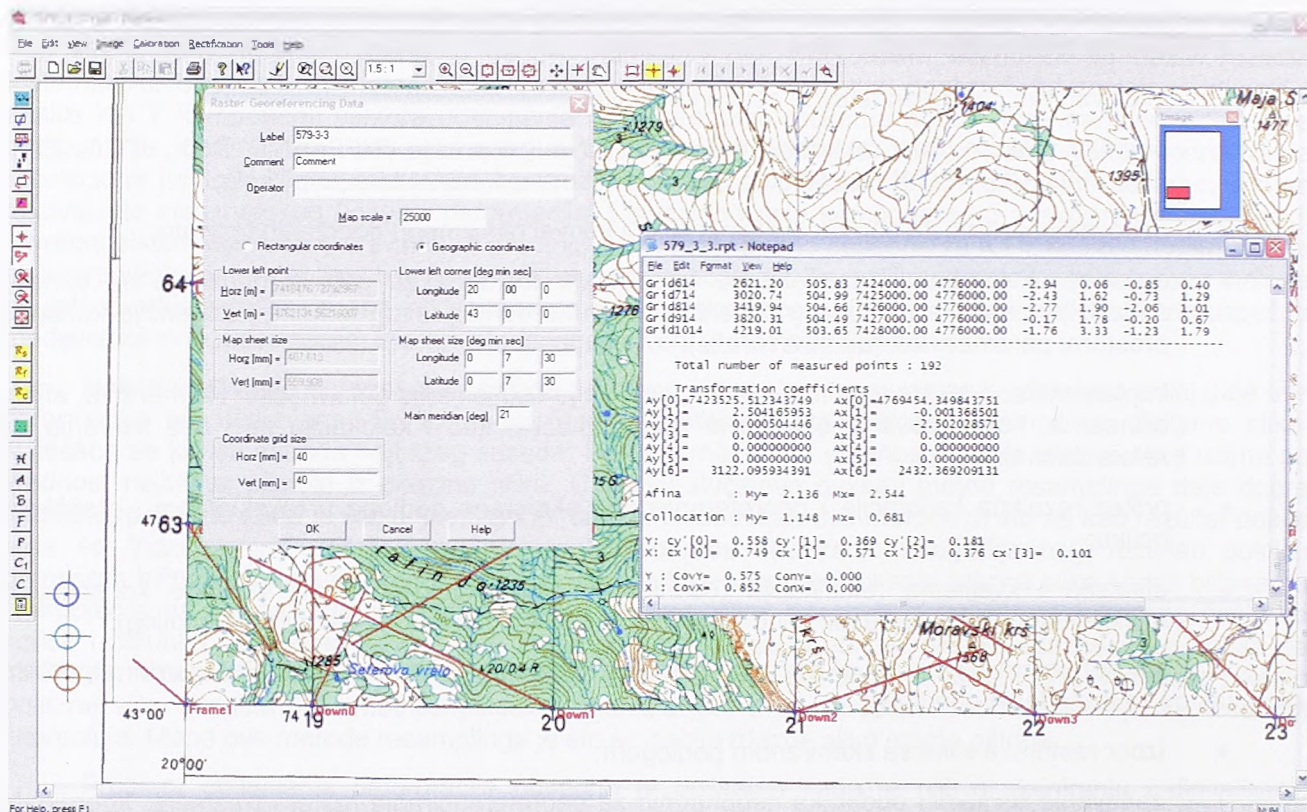
Rad sa softverom na obradi skeniranog plana ili karte vrlo je jednostavan. Standardni algoritam rada sastoji se iz sledećih operacija:

- izbor rasterske slike sa skeniranom podlogom;
- zadavanje osnovnih podataka neophodnih za georeferenciranje rastera (razmera, koordinate donjeg levog temena podloge, dimenzije korisnog prostora, parametri koordinatne mreže) i ostalih relevantnih podataka (operater, oznaka lista i komentar);
- zadavanje putanje do tekstualne datoteke sa spiskom koordinata referentnih tačaka koje će biti korišćene za utvrđivanje deformacija i georeferenciranje podloge (opciono);
- merenje približnih pozicija tačaka u uglovima korisnog prostora karte ili plana (ili pozicije prve četiri referentne tačke, ako nisu poznate koordinate temena korisnog prostora);
- precizno merenje svih temena koordinatne mreže (i/ili pozicija drugih referentnih tačaka za utvrđivanje deformacija i georeferenciranje podloge), pri čemu softver postavlja kursor na približne pozicije, a korisnik treba samo precizno da izmeri pikselske koordinate svakog temena mreže na skeniranoj slici;
- izbor odgovarajućeg numeričkog postupka za utvrđivanje i otklanjanje deformacija (uglavnom kolokacija sa filtriranjem slučajnih grešaka);
- pregled izveštaja o orijentaciji i po potrebi ponavljanje ili isključivanje onih merenja na referentnim tačkama koja su od strane softvera okarakterisane kao grube greške;
- izbor parametara i rektifikacija digitalne slike, tj. formiranje nove digitalne slike sa otklonjenim deformacijama sistematskog karaktera i pratećim parametrima georeferenciranja; ovako dobijena rasterska slika može se učitati u većinu GIS i CAD softverskih okruženja koristeći vrlo jednostavne modele za georeferenciranje (dovoljna je helmertova ili afina transformacija).



Ovaj softver je korišćen za obradu izuzetno velikog broja geodetskih podloga u Srbiji, Crnoj Gori, Makedoniji i Republici Srpskoj. Iskustva pokazuju da je softver u stanju da korektno otkloni sistematske uticaje (deformacije) koje su reda i po nekoliko milimetara. U većini slučajeva srednja kvadratna greška odstupanja na referentnim tačkama nakon otklanjanja deformacija, kao rezultat zaostalih slučajnih komponenti, iznosi od 0.05 do 0.10mm, naravno u zavisnosti od kvaliteta same podloge, a pre svega od tačnosti nanošenja koordinatne mreže koja služi kao osnova za otklanjanje deformacija. Softver je čak korišćen i za otklanjanje vrlo finih deformacija (50-100 $\mu$ m) nastalih pri skeniranju aerofotogrametrijskih snimaka jeftinim desktop skenerom A3 formata.

Rad sa kolornim kartama i oleatama situacije TK25 koje, pored koordinatne mreže u Gaus-Krigerovoj projekciji, sadrže i preseke ove mreže sa meridijanima i paralelama (po ivicama korisnog prostora), zahtevao je dodatnu modifikaciju softvera. Modifikacija se sastojala u dodavanju opcija za zadavanje parametara koordinatne mreže preko geografskih koordinata i formiranje tako definisanih temena koordinatne mreže (Slika 5-14).



Slika 5-14 : Korisnički interfejs softvera DigiScan 2000

Ono što ovom softveru trenutno nedostaje je mogućnost otklanjanja deformacija skeniranog plana ili karte, ali ne na osnovu merenja pozicija referentnih tačaka na rasterskoj slici, već direktnim merenjem vektora odstupanja na korespondentnim detaljima na slici koja se obrađuje i na već obrađenoj slici. Ovaj postupak bi bio interesantan za one podloge koje nemaju nanetu koordinatnu mrežu kao što je to slučaj sa većinom reprodukcijских originala TK25.

Postupak bi se sastojao u tome da se zajedno obrađuju dve već georeferencirane podloge koje se odnose na isto područje i imaju sadržaj koji je položajno tesno povezan. Pri tome, jedna od ovih podloga bi trebala da je već korektno kalibrisana i georeferencirana preko guste mreže referentnih tačaka. To podrazumeva i da je njena rasterska slika već korigovana za utvrđene deformacije. Kod TK25 to mogu biti ili kolorna karta ili reprodukcijски original situacije. Na ovim podlogama postoji naneta matematička osnova - mreža meridijana i paralela, kao i koordinatna mreža u Gaus-Krigerovoj projekciji. Preko slike ove podloge u radnom prozoru *DigiScan*-a, treba transparentno prikazati i podlogu koju nije bilo moguće kalibrisati zbog nedostatka referentnih tačaka. Kod digitalizacije za potrebe izrade DMT-a to su oleata visinske predstave ili oleata hidrografije. Druga opcija je da se za prikaz podloga koriste zasebni prozori. Zadatak operatera bi bio da izmeri odgovarajući broj vektora odstupanja za parove identičnih tačaka na dvema kartama. Poželjno bi bilo da gustina i broj ovih tačaka približno odgovara gustini i broju temena koordinatne mreže. Nakon merenja svih vektora odstupanja softver bi utvrdio sistematske komponente ovih odstupanja. Na osnovu njih bi dalje formirao novu rastersku sliku druge podloge. Tako dobijena



rasterska slika bi bila oslobođena od sistematskih odstupanja i za nju bi bili sračunati novi parametri georeferenciranja.

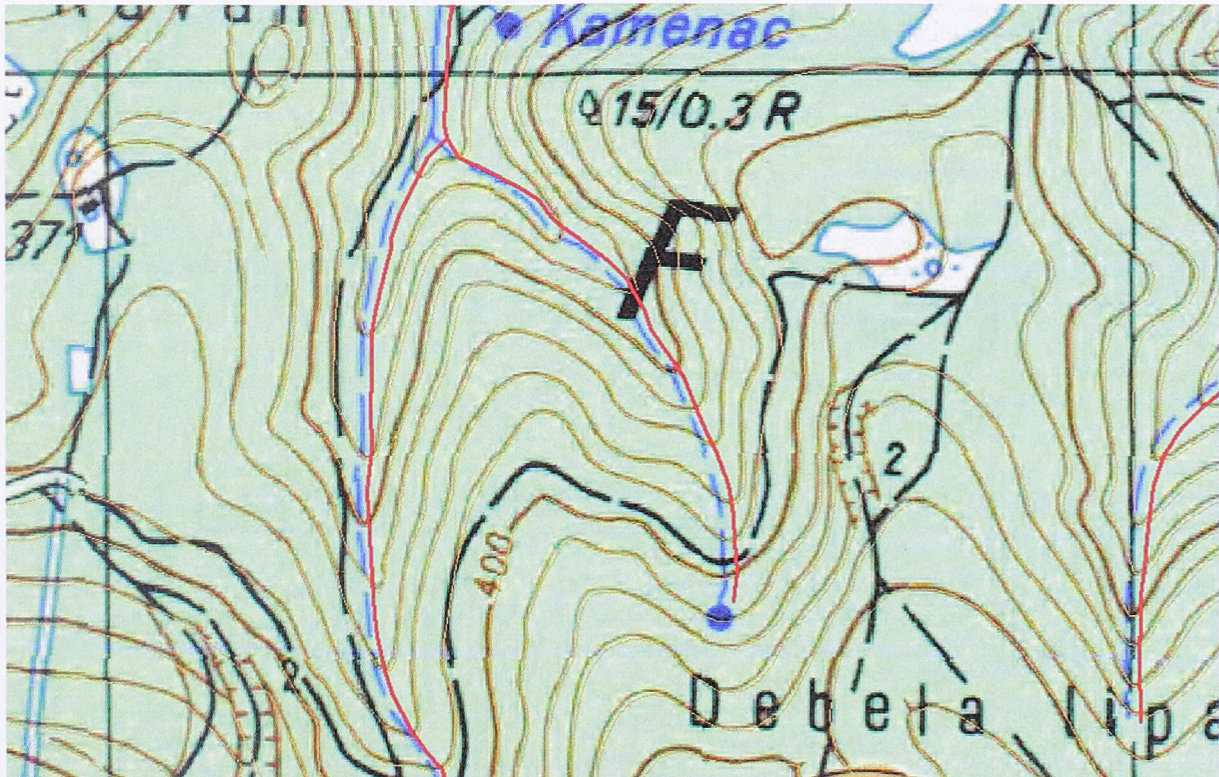
Razvoj pomenute funkcionalnosti u okviru *DigiScan*-a ne predstavlja značajniji zahvat, jer kompletan matematički aparat vezan za utvrđivanje i otklanjanje deformacija, kao i algoritmi za izradu i resampling korigovane slike već postoje. Jedino je potrebno razviti funkcije za merenje vektora odstupanja dveju slika i funkcije za manipulaciju izmerenim podacima (editovanje, prikaz, i sl.).

### 5.7.3 Digitalizacija sadržaja

Digitalizacija sadržaja sa postojećih karata koji bi bio korišćen za formiranje DMT-a svakako predstavlja najobimniju fazu u celom projektu formiranja DMT-a za državnu teritoriju. Sadržaj koji je interesantan za formiranje DMT-a se sastoji od:

- izohipsi dobijenih digitalizacijom RO visinske predstave (braon oleata) ;
- trigonometara i kota rasutih tačaka digitalizovanih sa RO situacije (crna oleata);
- hidrografije digitalizovane sa RO hidrografije (plava oleata);
- granica velikih vodenih površina digitalizovanih sa RO maski za hidrografiju (plava oleata maski).

Opciono, deo ili kompletan sadržaj koji je gore naveden može biti digitalizovan sa skeniranih listova topografske karte. Opređeljujući faktor kod donošenja odluke vezan je za softver koji će biti korišćen za digitalizaciju sadržaja. Na primer, prema informacijama dostupnim sa Interneta softver *Easy Trace* ruske firme *Easy Trace Group* sadrži vrlo kvalitetne funkcije za separaciju boja iz kolorne skenirane podloge. Te funkcije su posebno podešene da obezbede izlazne rezultate koji odgovaraju softveru za poluautomatsku ili automatsku vektorizaciju. Pored toga, algoritmi za automatsku i poluatomatsku vektorizaciju pomenutog softvera u stanju su da vektorizuju i isprekidane linije, linije sastavljene od niza tačaka, itd. Na žalost, ovaj softver nije bio na raspolaganju za potrebe realizacije ovog istraživanja, tako da nije moguće dati pouzdan odgovor na pitanje da li je bolje vršiti digitalizaciju sa skeniranih kolornih karata ili sa pojedinačnih oleata.



Slika 5-15 : Odstupanja hidrografije digitalizovane sa radnih originala (crveno) od georeferencirane i kalibrirane topografske karte; prikazane su i digitalizovane izohipse (sepija)



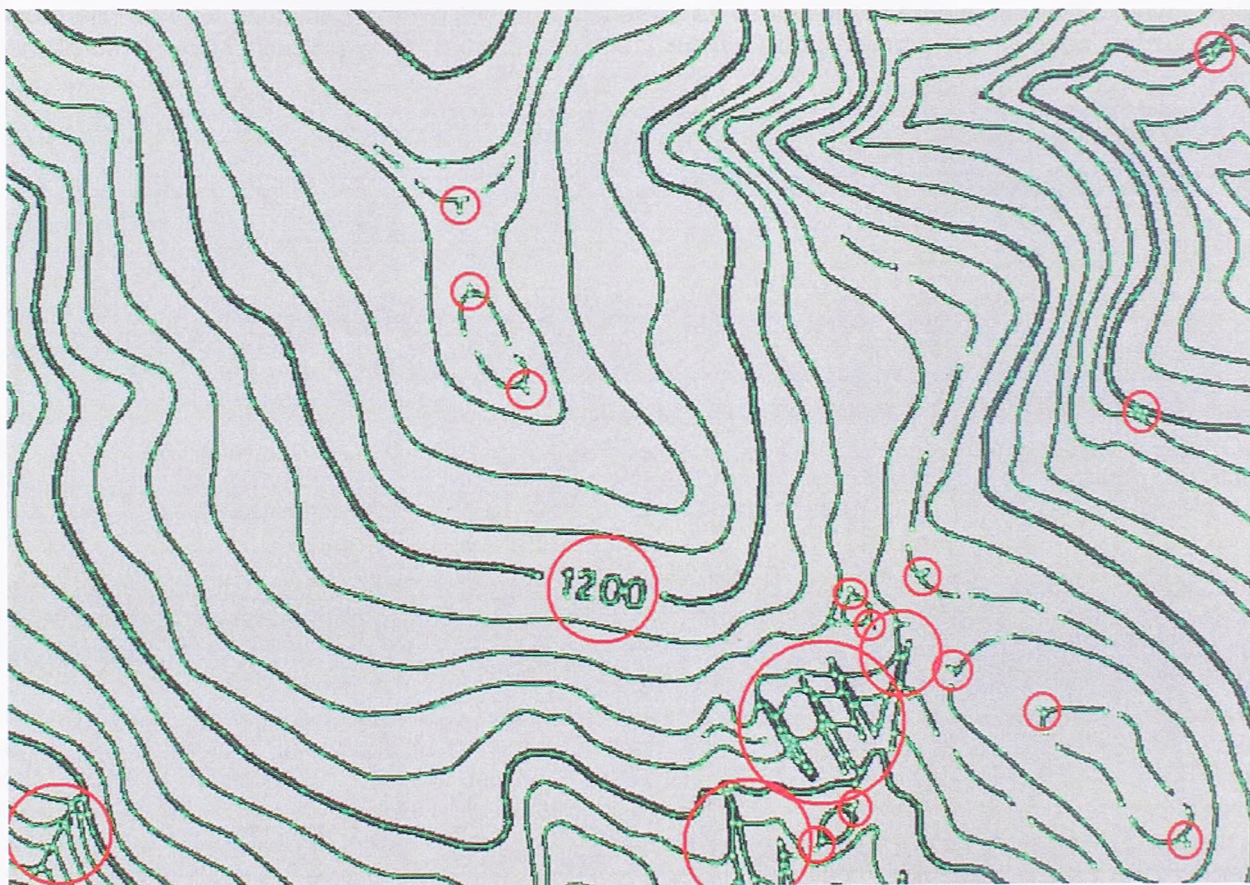
U svakom slučaju, iz analiza koje su sprovedene vidi se da digitalizacija sadržaja korišćenjem pojedinačnih oleata dovodi do dodatnih problema kada je reč o geometrijskom usklađivanju digitalizovanog sadržaja (Slika 5-15).

Radi efikasnije manipulacije prikupljenim sadržajem predlaže se odvojen rad sa vektorskim sadržajem koji se odnosi na pojedinačne reproduksijske originale i kolorne karte. Ovo znači da podatke treba prikupljati i obrađivati u okviru odvojenih datoteka (baza podataka) koje se odnose na dati RO ili kartu. Izuzetak su skupovi podataka manjeg obima i jednostavnije topologije kao što su to trigonometri i kote rasutih tačaka. Integraciju podataka koji se odnose na veća područja, kao što je to blok od 4x4 lista TK25 koji čine jednu topografsku kartu razmere 1:100000 treba izvoditi nakon što je najveći deo obrade urađen za pojedinačne listove, ali svakako pre verifikacije prikupljenog sadržaja u visinskom smislu.

Osim geometrije i topologije, treba predvideti i prikupljanje i vođenje odgovarajućih atributa za sve entitete sadržaja koji se digitalizuje. Ovde treba napomenuti da te attribute treba uskladiti sa svim zahtevima koji se postavljaju za prikupljanje, rukovanje i održavanje podacima topografskih podloga u digitalnom obliku, a ne samo s obzirom na potrebe formiranja DMT-a. Na primer, za vodotoke treba voditi attribute vezane za kategoriju i smer vodotoka, iako to nije neophodno kada je u pitanju korišćenje ovih entiteta za formiranje DMT-a.

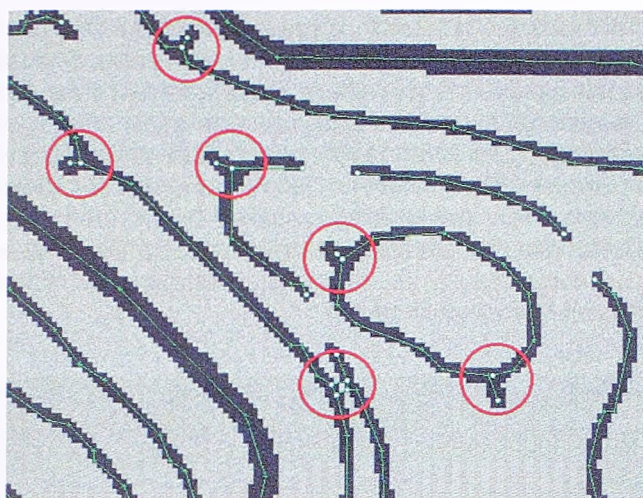
### 5.7.3.1 Izohipse

Digitalizacija izohipsi je svakako najobimniji zadatak u prevođenju visinske predstave terena sa karata u digitalni oblik. Eksperimenti koji su sprovedeni nad izabranim setovima podataka pokazali su na primeru korišćenja softvera R2V firme Able Software Corp. da je tehnika poluautomatske vektorizacije (praćenje linije) superiorna u odnosu na automatsku vektorizaciju izohipsi (Šoškić 2001). Lošiji rezultati automatske vektorizacije su posledica grešaka koje neminovno prate ovaj postupak (Slika 5-16). Ove greške se mogu eliminisati prethodnom obradom rastera ili naknadnim, manuelnim editovanjem dobijenog vektorskog sadržaja.



Slika 5-16 : Tipične greške kod automatske vektorizacije





Slika 5-17 : Greške kod automatske vektorizacije – uvećano

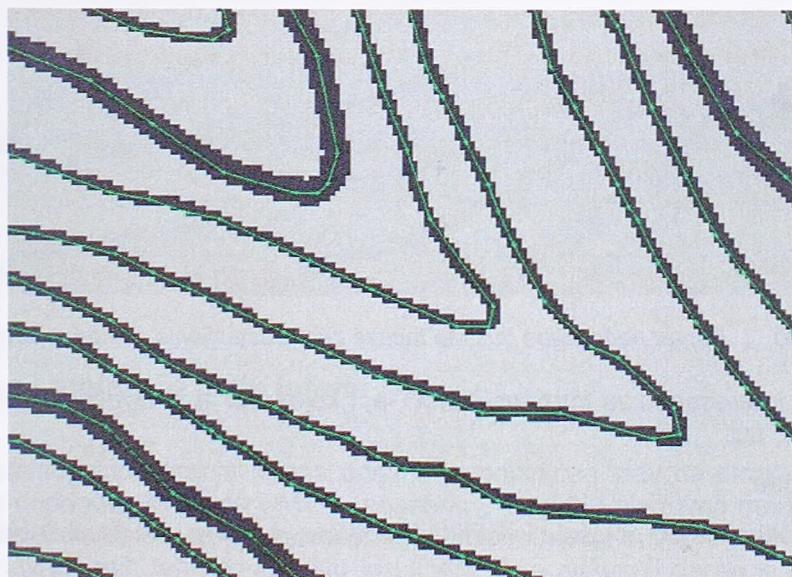
Vreme potrebno za automatsku vektorizaciju izohipsi, uključujući tu prethodno čišćenje rastera, vektorizaciju, manuelno otklanjanje grešaka i dodeljivanje visina dvostruko je veće nego ono potrebno za poluautomatsku vektorizaciju istog sadržaja. Ovi rezultati su u saglasnosti sa rezultatima i iskustvima koji se mogu naći u stručnoj i naučnoj literaturi. Ovaj odnos je, može se reći, nezavistan od tipa terena. Za ravničarski i umereno složen teren dobro obučenom operateru potrebno je oko 5-6 sati za poluautomatsku digitalizaciju jedne karte TK25. Za složeniji teren ovo vreme se udvostručava. Podrazumeva se da ovo vreme ne uključuje verifikaciju podataka i ispravljanje grešaka koje su posledica nekonzistentnosti i grešaka u podacima na karti.

Na osnovu velikog broja obrađenih oleata visinske predstave TK25 došlo se do sledećih zaključaka:

- prosečno vreme potrebno za digitalizaciju izohipsi sa jednog lista karte iznosi oko 10 sati za poluautomatsku i dvostruko više za automatsku vektorizaciju;
- prosečan broj tačaka izohipsi po jednom listu karte iznosi 20 hiljada za ravničarsko područje, oko 100 hiljada za brežuljkasto i 200-300 hiljada za planinsko područje (Tabela C-2, dodatak C.3).

Obrada ODK karata razmere 1:5000 pokazala je da se prosečan broj tačaka izohipsi po jednoj karti kreće od 5 hiljada za ravničarske terene, pa do 50 hiljada za planinska područja. Vreme potrebno za digitalizaciju jednog lista ODK iznosi od 2 do 3 sata.

Sam postupak digitalizacije dosta je jednostavan, posebno za slučaj poluautomatske digitalizacije, tj. digitalizacije sa praćenjem linije. Automatska digitalizacija zahteva mnogo više stručnosti i podešavanja parametara, posebno ako se radi o slabijem kvalitetu skeniranih podloga.



Slika 5-18 : Primer optimalne gustine tačaka za predstavljanje vektorizovane izohipse



Treba posebno obratiti pažnju na izbor odgovarajućih parametara za geometrijski korektno predstavljanje vektorizovane izohipse (Slika 5-18). Preoštri zahtevi u pogledu vernosti predstave geometrije izohipse dovode do neopravdano velikog broja tačaka (Slika 5-19). Ovo značajno otežava kasniju obradu u smislu angažovanja računarskih resursa (memorija i procesorsko vreme). Druga krajnost, kada se izohipsa predstavi preko nedovoljnog broja tačaka, može prouzrokovati gubitak kvaliteta kod rekonstruisane površi terena (Slika 5-20). Optimalna gustina tačaka, uz očuvanje geometrije vektorizovanih izohipsi, podrazumeva i ravnomeran raspored tačaka izohipsi po površini terena. Drugima rečima, prosečno rastojanje tačaka na izohipsama treba da odgovara prosečnom rastojanju između izohipsi na karti. Izuzetak od ovog pravila su, naravno, mesta gde izohipse imaju veliku zakrivljenost (presek izohipsi sa vododelnicama i vodoslivnicama).



Slika 5-19 : Primer prevelike gustine tačaka za predstavljanje vektorizovane izohipse



Slika 5-20 : Primer nedovoljne gustine tačaka za predstavljanje vektorizovane izohipse

Atributi koji su interesantni za formiranje DMT-a, i koje, ako je to izvodljivo, treba prikupiti za svaku digitalizovanu izohipsu su:

- visina izohipse;
- tačnost određivanja po položaju i visini (šifra načina merenja kod prvobitnog kartiranja);
- godina kada je izohipsa prvobitno kartirana.

Dodeljivanje visina izohipsama može se raditi u toku same vektorizacije ili naknadno. Naravno, u slučaju automatske vektorizacije visine se mogu dodeljivati samo naknadno. Bolji softveri, kao *R2V* (*w39*), raspolažu funkcijama za inkrementiranje poslednje dodeljene visine, tako da ako se izohipse digitalizuju sukcesivno naviše ili naniže, visine nije potrebno unositi za svaku izohipsu posebno. Isto tako, na raspolaganju su i opcije za istovremeno dodeljivanje visina za više izohipsi. Postupak se izvodi tako što se zada linija koja seče niz sukcesivnih izohipsi, pri čemu je ekvidistancija između njih ista, a teren je monotonno rastući ili opadajući. Potrebno je zadati ekvidistanciju i visinu prve izohipse. Nakon toga softver automatski dodeljuje visine svim izohipsama koje seku zadatu liniju. Ovakav postupak značajno ubrzava dodeljivanje visina i smanjuje greške kod unosa visina.

### 5.7.3.2 Tačke sa poznatim visinama

Topografske karte sadrže određen broj tačaka čije su visine ispisane na samoj karti. Radi se o trigonometrijskim tačkama ili tačkama za koje su date kote da bi se bolje definisala visinska predstava terena. U velikom broju slučajeva te tačke ujedno predstavljaju i karakteristične tačke terena u visinskom smislu, tj. radi se o lokalnim ekstremumima, kao što su vrh brda ili dno doline. Ove tačke mogu značajno da podignu kvalitet DMT-a, posebno u pogledu njegovog morfološkog kvaliteta. Pored toga, položaj i visine ovih tačaka određene su direktnim merenjem (u statičkom režimu rada), a ne interpolacijom ili dinamičkim izvlačenjem linija (kao što je to slučaj sa izohipsama, za slučaj fotogrametrije), pa su samim tim one pogodne i za kontrolisanje ostalih podataka koji se digitalizuju.

Kada je u pitanju prevođenje ovih informacija u digitalni oblik najjednostavniji način svakako je manuelna digitalizacija pozicija ovih tačaka i unošenje njihovih visina tokom te digitalizacije. U okviru ovog rada nije razmatrana mogućnost primene softverskih rešenja sa tehnikama za optičko prepoznavanje teksta (engl. *OCR - Optical Character Recognition*) u cilju automatizacije ovog postupka. Prosečan broj tačaka sa poznatim visinama po jednoj topografskoj karti iznosi oko 150, tako da čak i manuelna digitalizacija ovih tačaka ne predstavlja značajniju stavku u celokupnom postupku prevođenja topografskih karata u digitalni oblik. Zato se u okviru ove metodologije predlaže korišćenje *MapSoft*-a ili sličnih softverskih rešenja (*AutoCAD*, *Microstation*, *R2V*) koja su već na raspolaganju.

Digitalizacija tačaka sa poznatim visinama može se izvesti korišćenjem skeniranih topografskih karata ili reprodukcijских originala sa situacijom. Na oba načina dobijaju se rezultati istog kvaliteta, s tim da je digitalizacija sa reprodukcijских originala nešto jednostavnija, jer se radi o redukovanom sadržaju, a datoteke sa rasterskim slikama zahtevaju znatno manje memorijskih resursa.

Atributi koji su interesantni za formiranje DMT-a, i koje, ako je to izvodljivo, treba prikupiti za svaku digitalizovanu tačku su:

- tip tačke - rasuta, lokalni ekstremum (vrh, dno), sedlo;
- tačnost određivanja po položaju i visini (šifra načina merenja kod prvobitnog kartiranja);
- godina kada je tačka prvobitno kartirana.

U toku verifikacije digitalizovanog sadržaja, operacije koja je detaljnije obrađena u narednim razmatranjima, utvrđeno je da u ovim podacima ima i izvestan broj grešaka koje nisu zanemarljive. Ove greške su najčešće rezultat loših kota ispisanih na karti. Često se radi o greškama koje su posledica zamene korektnih cifara sličnim ciframa (9, 6 i 0, 7 i 1). U većini slučajeva može se sa dosta velikom sigurnošću zaključiti koja je vrednost visine korektna.

### 5.7.3.3 Strukturne i prelomne linije terena

U teoriji i praksi digitalnog modeliranja terena odavno je prihvaćen stav da strukturne i prelomne linije terena vrlo značajno doprinose kvalitetu DMT-a, posebno u pogledu njegovog morfološkog kvaliteta. Pri tome, bitno se smanjuje količina ostalih podataka koje je potrebno prikupiti, a pre svega rasutih tačaka. Zato se, čak i kod savremenih tehnika kao što je LiDAR, čine pokušaji da se iz prikupljenih podataka odrede strukturne i prelomne linije terena, jer to omogućava značajnu redukciju prikupljenog skupa



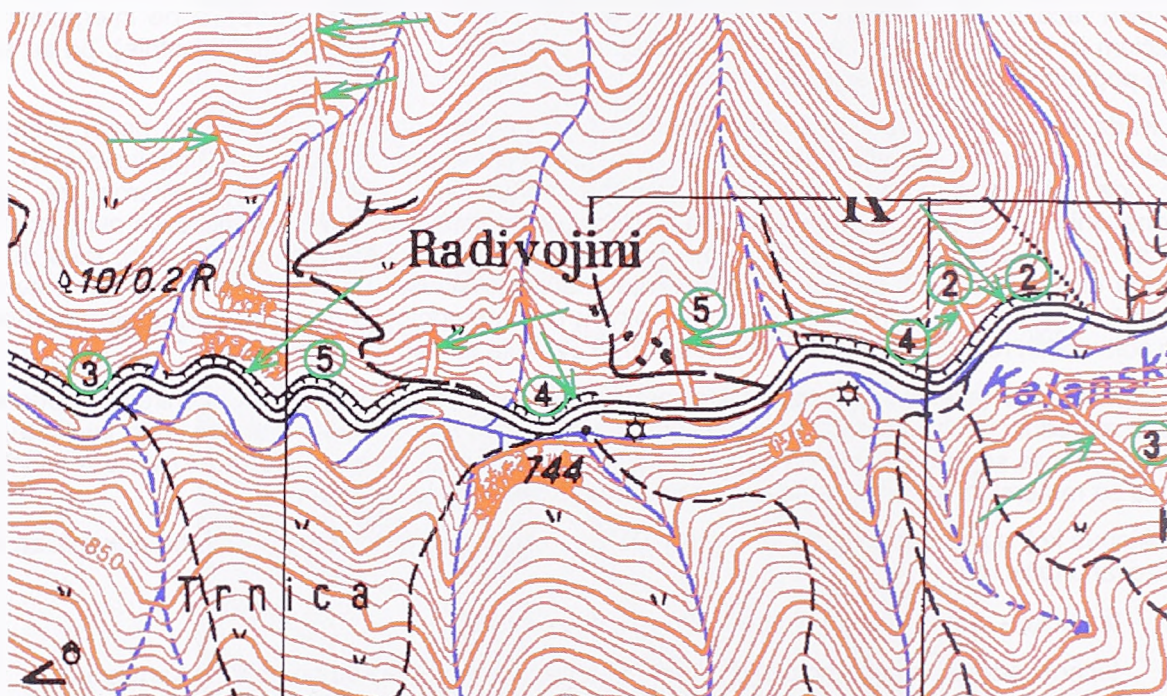
podataka. U slučajevima manuelnog, poluautomatskog ili automatskog prikupljanja podataka DMT-a na fotogrametrijskim instrumentima merenje ovih linija je takođe vrlo zastupljeno u praksi.

Kada je u pitanju digitalizacija sadržaja sa postojećih podloga situacija je znatno drugačija. Strukturne i prelomne linije terena su samo izuzetno na karti predstavljene eksplicitno, dok su u najvećem broju slučajeva one implicitno date preko izohipsi.

Atributi koji su interesantni za formiranje DMT-a, i koje, ako je to izvodljivo, treba prikupiti za svaku digitalizovanu liniju su:

- tip linije - strukturna (vododelnica, vodoslivnica, prevojna), prelomna, vertikalni zid; atribut treba prikupljati samo ako tip linije nije implicitno definisan ostalim atributima;
- tačnost određivanja po položaju i visini (šifra načina merenja kod prvobitnog kartiranja);
- godina kada je linija prvobitno kartirana.

Prelomne linije terena na kartama se obično daju eksplicitno, ali vrlo retko sa visinama u prelomnim tačkama linije. Stoga nema nikakvog opravdanja da se takve linije digitalizuju. Ove linije će se eventualno prikupiti u okviru naknadne dopune i ažuriranja inicijalnog DMT-a primenom digitalne fotogrametrijske restitucije. Primeri linija koje su ovako predstavljene na kartama TK25 su jaruge, vododerine, urvine, pukotine i dr. Kanali i veći nasipi su prikazani čak i sa informacijama kolika je visina nasipa, ali je ipak vrlo neracionalno ovakve linije digitalizovati i ručno im dodeljivati ove informacije (Slika 5-21).



Slika 5-21 : Primeri strukturnih i prelomnih linija koje su date na karti ali njihova digitalizacija ne bi bila racionalna (crne linije obeležene zelenim strelicama); obeležene su i druge informacije na karti koje nije racionalno uzimati u obzir kod formiranja nacionalnog DMT-a

Jedine strukturne linije koje su na karti eksplicitno prikazane su vodoslivnice koje predstavljaju rečna korita i sastavni su deo hidrografije. Čak i za ove linije nije moguće sa karata preuzeti visine prelomnih tačkaka. Sa druge strane, postavlja se opravdan zahtev usklađenosti visinske predstave terena sa hidrografijom. Ovo upućuje na potrebu respektovanja hidrografije u postupku formiranja DMT-a i na opravdanost digitalizacije linija hidrografije.

Sasvim je izvodljivo da se strukturne linije terena, bilo da su one na karti prikazane eksplicitno ili implicitno, digitalizuju zajedno sa ostalim sadržajem. U najvećem broju slučajeva ovo podrazumeva samo definisanje ovih linija u horizontalnoj ravni, dok je određivanje visina za tačke ovih linija u postupku digitalizacije praktično neizvodljivo. Visine za ove tačke treba odrediti iz DMT-a formiranog na osnovu ostalih podataka.

Kada su u pitanju eksplicitno date strukturne linije terena, a uglavnom su to linije hidrografije, mogu se koristiti manuelne, poluatomatske ili automatske metode digitalizacije linijskog sadržaja. Ovaj posao može se efikasno realizovati primenom softverskih alata za poluatomatsku ili automatsku vektorizaciju



kao što su *R2V*, *Easy Trace* i slični. Sa RO hidrografije i maski hidrografije treba digitalizovati linije koje predstavljaju sledeće pojave i objekte u prirodi:

- reke prikazane uslovnim znakom (stalni i povremeni tokovi) ;
- kanali prikazani uslovnim znakom (stalni i privremeni tokovi).

Pravila kojih se treba pridržavati pri digitalizaciji hidrografije ovog tipa su:

- zaseban vodotok treba predstaviti jednom polilinijom sa odgovarajućim atributom;
- voditi računa o smeru vodotoka tako da smer polinije odgovara smeru toka vode;
- kod mreže vodotoka voditi računa o usklađenosti geometrije i topologije vodotoka;
- za vodotoke kojima se dodeljuju visine (kod prikupljanja ili obrade) obezbediti monotonost promene visina.

Kod digitalizacije strukturnih linija koje su implicitno date preko izohipsi, potrebno je da operater proceni pravac pružanja ovih linija (vododelnice, vodoslivnice i sedla) i da ih manuelno digitalizuje. U praksi se ovakav pristup, sem u izuzetnim slučajevima, ne preporučuje već se ide na automatsko detektovanje strukturnih linija koje su implicitno date preko izohipsi.

Druga mogućnost, koja je takođe vrlo česta u praksi, je da se podaci za strukturne linije terena koje nisu eksplicitno date na karti prikupe naknadnim fotogrametrijskim merenjima na isti način kao i prelomne linije terena. U okviru ovih merenja dodatno se vrši i verifikacija postojećih podataka, kartiraju karakteristične tačke terena i uzimaju odgovarajuća kontrolna merenja.

Poseban problem kod formiranja DMT-a na osnovu izohipsi može biti problem gde se sa strmog terena (planina ili brdo) naglo prelazi u ravnicu ili zaravan (Slika 5-22). S obzirom da je količina visinskih podataka za ravničarske delove terena na kartama po pravilu mala, može doći do velikih grešaka kod interpolacije DMT-a. U tim slučajevima potrebno je sprečiti pojavu nepostojećih udubljenja u ravnici, tj. sprečiti da se padina ili uspon produži. Ovo posebno važi za splajn metode interpolacije (splajnovanje tankim pločama, regularizovani splajn, splajn sa tenzijom, TIN i površinske splajn zakrpe). Ove metode interpolacije su detaljno opisane u poglavljima 3.2.4 i 3.3.2.3, a o ovim problemima je bilo reči i u poglavljima 4.5 i 4.7.



Slika 5-22 : Problematična mesta za interpolaciju splajn funkcijama

Na osnovu iskustava i rezultata stečenih nakon sprovedenih eksperimentalnih istraživanja (poglavlje 4.7) mogu se preporučiti sledeća rešenja za prevazilaženje pomenutih problema:

- eksplicitno specificiranje prelomnih linija koje razdvajaju brdo od ravnice u postupku digitalizacije sadržaja – samo za jasno definisane rečne doline;
- korišćenje numeričkih postupaka i algoritama za inteligentnu rekonstrukciju površi terena na ovim mestima;



- dopuna podataka naknadnim merenjima (fotogrametrijska restitucija).

Numerički postupci koji se mogu koristiti za ove svrhe posebno su razmatrani u poglavljima 4.5.2.1.2 i 4.5.3. Realizovani eksperimenti su pokazali da ovde izuzetan značaj imaju i izohipse na polovini i četvrtini ekvidistancije, pa ih obavezno treba digitalizovati na ovakvim mestima. Istovremeno, ispostavilo se da je vrlo teško bez dodatnih informacija korektno rekonstruisati površ terena za ovakve slučajeve. Zato je korišćenje druge opcije, bez dodavanja novih informacija, opravdano samo ako ne postoje uslovi da se obezbede te dodatne informacije.

Za potrebe formiranja DMT-a na osnovu digitalizacije TK25 predlaže se digitalizacija samo hidrografije. Visine za tačke koje pripadaju linijama hidrografije treba odrediti na osnovu analize DMT-a formiranog na osnovu digitalizovanih izohipsi i kota. Naravno, naknadno kartiranje mreže vodotoka i ostalih strukturnih linija terena korišćenjem digitalne fotogrametrijske restitucije vrlo je poželjno.

#### 5.7.3.4 Površine sa posebnim značenjem

Površine koje su sa aspekta formiranja DMT-a interesantne za digitalizaciju uglavnom se odnose na veće vodene površine. Granice ovih površina treba vektorizovati sa RO hidrografije, RO maski hidrografije i RO visinske predstave. Visine za ove linije mogu se odrediti u toku same vektorizacije, ako je reč o granicama mora, jezera ili ribnjaka, ili se to može naknadno uraditi interpolacijom iz DMT-a formiranog na osnovu ostalih digitalizovanih podataka. Svakako da je druga varijanta nepovoljnija, jer je podložna greškama interpretacije podataka i same interpolacije.

Kao i kod vektorizacije hidrografije predlaže se primena softverskih alata za poluatomatsku (automatsku) vektorizaciju kao što su *R2V* ili *Easy Trace*.

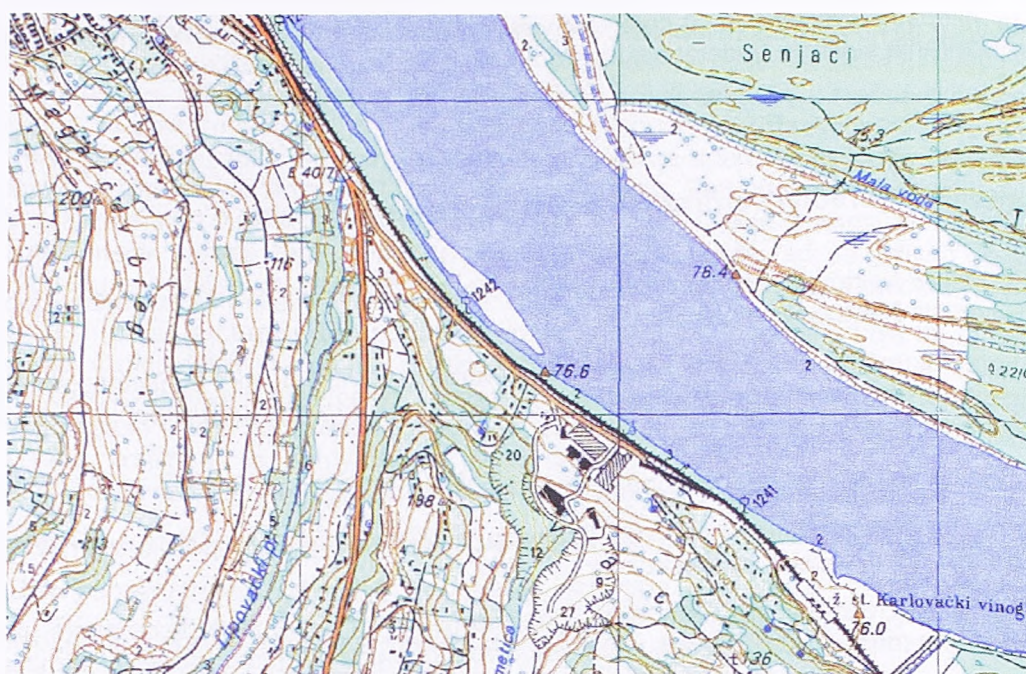
Od sadržaja treba digitalizovati granice (konture) sledećih pojava i objekata predstavljenih na karti:

- industrijske vode;
- močvarno tlo (prohodno i neprohodno);
- reke prikazane u razmeri;
- kanali prikazani u razmeri (samo veći);
- rukavac prikazan u razmeri;
- mrtvaje;
- jezera;
- bare;
- ostrva;
- sprudovi;
- morska obala.

Granične linije ovih površina vrlo su značajne za podizanje kvaliteta formiranog DMT-a, posebno u slučajevima kada se radi o većim površinama i brdskim i planinskim terenima (Slika 5-23). Tipičan primer ovakvih slučajeva su rečne klisure i kanjoni, jezera u brdskim i planinskim područjima i slično. Kao i kod dolina, ako se ove površine posebno ne definišu može kod rekonstrukcije površi terena doći do velikih odstupanja rekonstruisane od realne površi DMT-a.

Kod prikupljanja ovih podataka poželjno je da oni budu topološki korektni, tj. da sve prikupljene granične linije površinskih entiteta budu zatvoreni poligoni. Za površine koje su definisane na osnovu topologije ovih linija treba uneti i prikupiti i odgovarajuće atribute:

- pripadnost odgovarajućoj grupi objekata;
- kota vodene površine jezera, ribnjaka i sl.



Slika 5-23 : Primer terena gde treba definisati površinu pod rekom

S obzirom da će se formirani DMT najverovatnije koristiti i za konstruisanje izohipsi za potrebe kartografske produkcije TK25 potrebno je, pored gore pomenutih vodenih površina, i definisanje svih drugih površina preko kojih se neće iscrtavati izohipse. To su najčešće veći objekti, gusto izgrađena urbana područja, površinski kopovi i slično. Ako je predviđena digitalizacija ovih površina u okviru neke druge teme, onda ih treba samo preuzeti ili na neki način povezati sa podacima visinske predstave. Analogno važi i za DMT koji se formira za topografske podloge razmere 1:5000.

Atributi koji su interesantni za formiranje DMT-a, i koje, ako je to izvodljivo, treba prikupiti za svaku digitalizovanu površinu su:

- tip površine - područje sa nedefinisanom visinom, površina sa konstantnom visinom (velika vodena površina, veštački objekat i sl.); atribut treba prikupljati samo ako tip linije nije implicitno definisan ostalim prikupljenim atributima;
- kota vodene površine (samo za veće vodene površine) ;
- tačnost određivanja po položaju i visini (šifra načina merenja kod prvobitnog kartiranja);
- godina kada je površina prvobitno kartirana.

#### 5.7.4 Obrada i verifikacija prikupljenih podataka

Obrada i verifikacija prikupljenih podataka, pored samog prikupljanja podataka, predstavlja najobimniju i najznačajniju fazu kod formiranja DMT-a. Obrada digitalizovanih podataka visinske predstave terena može biti vrlo ograničenog obima, s obzirom da se veći deo obrade može uraditi u toku interaktivne digitalizacije sadržaja. Međutim, bez obzira da li se radi o manuelnim, poluautomatskim ili automatskim procedurama, u prikupljenim podacima moraju se očekivati greške i nedostaci. Zato se u okviru ove faze ovi nedostaci i greške moraju otkloniti, pre nego što se krene na formiranje i arhiviranje konačnog DMT-a.

Procedure za obradu i verifikaciju DMT podataka mogu se grubo podeliti na dve grupe:

- standardne procedure za generalnu obradu i verifikaciju digitalizovanog vektorskog sadržaja;
- procedure specijalno namenjene za obradu i verifikaciju DMT podataka.

Kao što se može zaključiti, u prvu grupu spadaju procedure koje se mogu izvoditi za sve vrste digitalizovanih podataka, dok u drugu grupu spadaju one koje su specifične za podatke namenjene za formiranje DMT-a. U oba slučaja vrši se kontrola i korekcija topologije i geometrije prikupljenih podataka,



kao i provera njihovog kvaliteta u pogledu tačnosti i kompletnosti. Takođe se može vršiti i dopuna podataka, ali i filtriranje suvišnih podataka s obzirom na predviđenu namenu.

#### 5.7.4.1 Generalna obrada i verifikacija digitalizovanih podataka

Za sav digitalizovani vektorski sadržaj treba uraditi verifikaciju i korigovanje u smislu geometrijske i topološke ispravnosti. Neke od tih kontrola su:

- kontrola geometrije vektorskog sadržaja u pogledu kompletnosti i saglasnosti sa skeniranim sadržajem, ukoliko to nije izvršeno tokom same vektorizacije (preklapanjem digitalizovanog sadržaja sa skeniranom podlogom);
- kontrola da se izohipse međusobno ne dodiruju ili seku;
- kontrola preseka digitalizovanih linija (izohipse, strukturne i prelomne linije terena) i eventualno ubacivanje novih tačaka na presecima;
- kontrola povezivanja segmenata jedne izohipse (u okviru jedne karte ili na spojevima karata – segmenti ne moraju biti povezani, samo treba voditi računa da nema preseka i mimoilaženja);
- verifikacija i po potrebi redukcija broja tačaka izohipsi na optimalan nivo;
- kontrola spojeva dva ili više vodotoka (u okviru jedne karte ili na spojevima karata);
- kontrola smera kod linija vodotoka;
- kontrola topološke korektnosti površinskih entiteta;
- kontrola da nema duplo kreiranih entiteta, tj. entiteta koji se odnose na iste elemente karte, i dr.

Svakako da jedna od obaveznih kontrola treba da bude i provera kompletnosti digitalizovanog sadržaja. Ovo se uglavnom radi vizuelnom kontrolom i to preklapanjem vektorskog i rasterskog sadržaja. Sledeća kategorija ovih procedura su procedure za kontrolu geometrije i topologije sadržaja: veze linijskih entiteta, preseki linija, geometrija linija, zatvaranje kontura, dupli entiteti, itd.

Značajan deo obrade prikupljenih podataka visinske predstave terena otpada na kontrolu i korekciju povezivanja vektorizovanog linijskog sadržaja na granicama listova karata. Ova obrada je posebno obimna kada su u pitanju digitalizovane izohipse. Analiza podloga visinske predstave TK25 skeniranih u okviru projekta koji je u toku Vojnogeografskom institutu pokazala je da su deformacije tih podloga značajne (poglavlje 5.3.3.1.2). Ove deformacije su najverovatnije posledica grešaka nastalih u procesu skeniranja. Velike deformacije su prouzrokovale i značajna odstupanja sadržaja na spojevima listova. Zato je kontrola i korekcija povezivanja sadržaja na spojevima listova u ovom slučaju nešto obimnija i komplikovanija, ali je u svakom slučaju obavezna. Povezivanje sadržaja na granicama listova karata može se izvršiti i tokom same digitalizacije ukoliko se ona izvodi u okviru jedinstvenog projekta, tj. ako se svi podaci čuvaju u okviru jedinstvene baze podataka, ili je bar omogućena njihova vizuelizacija i objedinjena obrada na neki drugi način.

U VGI-u se koristi princip manuelne kontrole i korekcije povezivanja sadržaja. Zato i vreme potrošeno u ovoj fazi rada ima značajan udeo u ukupnim troškovima kada je u pitanju prevođenje ovih informacija u digitalni oblik. Kontrola i korekcija povezivanja izohipsi na spojevima karata zahteva dosta vremena. Procenjuje se da na ovo povezivanje treba utrošiti u proseku oko 6-8 sati po jednom listu karte visinske oleate TK25. Za oleate hidrografije ovo vreme je daleko kraće. Vreme utrošeno na ovim poslovima ukazuje na to da kod sličnih poslova u budućnosti (eventualna masovna digitalizacija ODK) treba pokušati sa primenom automatizovanih procedura. Da bi se pojava grešaka kod primene ovih procedura smanjila na najmanju moguću meru potrebno je uložiti dodatni napor da se otklanjanje deformacija skeniranih oleata uradi što je moguće kvalitetnije.

Vizuelna kontrola i korekcija sadržaja po gore navedenim stavkama može se jednostavno izvesti korišćenjem i manje sofisticiranih softverskih alata kao što su to *MapSoft*, alati za vektorizaciju (*R2V*) ili CAD softver opšteg tipa (*AutoCAD*, *Microstation*). Međutim, daleko je bolje da se za ove potrebe koriste kvalitetniji softverski alati sa naprednim CAD i GIS funkcijama za automatizovanu detekciju i korekciju grešaka u topologiji i geometriji prostornih podataka. Konačna odluka koji od alata će se koristiti zavisi pre svega od toga sa kojim resursima se raspolaže: softverskim licencama, brojem i obučenošću stručnjaka, budžetom, predviđenim vremenom za realizaciju posla, itd.

U okviru generalne obrade i verifikacije podataka podaci se mogu obrađivati u okviru nezavisnih datoteka, pri čemu se za sadržaj svake oleate ili karte TK25 formira po jedna takva datoteka. To mogu biti datoteke u standardnim CAD formatima (DXF, DWG, DGN, ...) ili datoteke u standardnim GIS formatima (ESRI Shape, ...). U svakom slučaju, mora se obezbediti mogućnost učitavanja više ovakvih datoteka u CAD/GIS radno okruženje da bi se izvršila kontrola i korekcija spajanja sadržaja na spojevima. Ovaj zahtev ispunjava većina savremenih CAD i GIS softverskih alata. Prednost ovakvog načina rada je što se posao može realizovati na više nezavisnih radnih mesta i uz korišćenje skromnijeg softvera i hardvera. Međutim, ovakav način obrade zahteva dobru organizaciju rada, jer se radi sa velikim brojem datoteka, pa treba voditi računa o podeli posla, arhiviranju podataka, najnovijim verzijama datoteka i sl.

Druga mogućnost je obrada svih podataka korišćenjem baze podataka koja se može formirati za veće celine ili celokupnu državnu teritoriju. Prednost ovakve obrade je što se svi podaci nalaze na jednom mestu, pa to olakšava organizaciju posla i administraciju. Istovremeno, podržan je i mrežni rad više korisnika i neposredan uvid u najažurnije podatke. Nedostatak ovog pristupa je što se zahteva kvalitetniji softver i mrežna konfiguracija hardvera sa jakim serverom baze podataka. Optimalna softverska konfiguracija kod ovakve organizacije posla treba da se sastoji od sledećih komponenti:

- GIS rešenja kao što su *Geomedia* ili *ArcGIS* (poglavlje 5.6);
- RDBMS serveri (*Oracle*, *Microsoft SQL Server*, *IBM DB2*, *Informix*);
- ekstenzije servera ili aplikativni serveri za efikasno upravljanje prostornim podacima (*Oracle Spatial*, *ESRI ArcGIS Server* i *ArcSDE*).

Nabavka i korišćenje ovih softverskih alata znatno podiže troškove, ali omogućava jednostavan prelazak sa faze prikupljanja i obrade podatka na fazu arhiviranja i održavanja podataka. U tom slučaju, ove dve faze se međusobno prepliću, a koriste se praktično iste procedure i model podataka.

U okviru ovog istraživanja sprovedeni su manji eksperimenti sa ciljem provere funkcionalnosti dostupnog softvera u radu sa velikom količinom podataka digitalizovanih sa TK52. Korišćeni su softverski alati *MapSoft* i *ArcGIS*.

Korišćenjem *MapSoft*-a za svako područje koje pokriva jedna karta razmere 1:100000 (16 listova TK25) formiran je po jedan nezavistan projekat. Na raspolaganju su bili podaci digitalizacije (izohipse, kote i trigonometri) za 13 ovakvih projekata. Prosečan broj visina za jedan projekat iznosio je oko 1.3 miliona, a maksimalan oko 3.7 miliona. Ukupan broj visina je iznosio oko 17.5 miliona. Ovi podaci dobro reprezentuju podatke za celokupnu teritoriju SCG, gde prosečno po projektu treba očekivati oko 1.8 miliona visina, a maksimalno oko 5.6 miliona visina (Tabela C-2). Za smeštanje geometrije i topologije podataka korišćene su standardne DBF tabele. Za svaki od ovih projekata izvršeno je i učitavanje skeniranih i georeferenciranih TK25 podloga. Korišćen je ECW format za skenirane kolorne karte (24 bita po pikselu) i CCIT4 TIFF format za skenirane reprodukcijske originale (1 bit po pikselu). Nisu uočeni ozbiljniji problemi u pogledu performansi tokom rada, čak ni za najveće projekte. Ovome je doprinelo i to što su sve izohipse prekinute na granicama listova TK25 karata, čime je izbegnuto formiranje jako velikih entiteta koji se prostiru preko velikog područja i koji bi prostorno indeksiranje podataka učinili neefikasnim. Zatim su svi projekti koji se odnose na kompletnu teritoriju Srbije i Crne Gore povezani u jednu grupu projekata. Na ovaj način omogućen je nesmetan rad i vizuelizacija u okviru jedinstvenog radnog prostora, bez značajnog gubitka u performansama rukovanja podacima.

Na osnovu rezultata ovog eksperimenta (bilo je potrebno 2.2Gb za smeštanje 17.5 miliona visina) i prikupljene količine visinskih podataka za celokupnu teritoriju SCG (oko 124 miliona visina, Tabela C-2) procenjeno je da memorijski zahtevi za arhiviranje visinske predstave terena (podaci digitalizacije) za celokupnu teritoriju SCG iznose oko 16Gb. Ovo je posledica neracionalnog zapisa za visinske tačke i tačke izohipsi, gde se za svaku tačku vodi nepotrebno mnogo atributa (oznaka, izvor podataka, tačnost, simbol, sloj, itd.). Ovo donekle ima opravdanja za pojedinačne visinske tačke, ali je svakako besmisleno kada je reč o tačkama izohipsi. Jednostavnim redizajniranjem modela podataka može se postići da prostor na disku iznosi i ispod 5Gb.

Nešto slično je urađeno i sa *ArcGIS* softverom. Formirana su dva projekta i u svaki od njih uvezeni su svi digitalizovani podaci (izohipse, kote i trigonometri) za područje koja pokriva svih 13 karata razmere 1:100000. Pri tome su podaci za prvi projekat smešteni u *ESRI Shape* formatu, a za drugi je formirana geobaza podataka u *Microsoft Access-u* (*ESRI* koristi termin: *Personal geodatabase*). Na osnovu rezultata ovog eksperimenta procenjeno je da za arhiviranje visinske predstave za SCG korišćenjem bilo kog od ova dva formata treba oko 4Gb, s tim da treba računati na dodatne zahteve kod geobaze za indeksiranje podataka. Rad sa izohipsama u *Shape* formatu kada su svih 13 projekata učitani u jedan projekat bio je prilično nekomforan i spor, dok u radu sa podacima smeštenim u geobazu podataka nisu uočeni ozbiljniji problemi. Može se pretpostaviti da bi uz korišćenje servera baze podataka i naprednijih

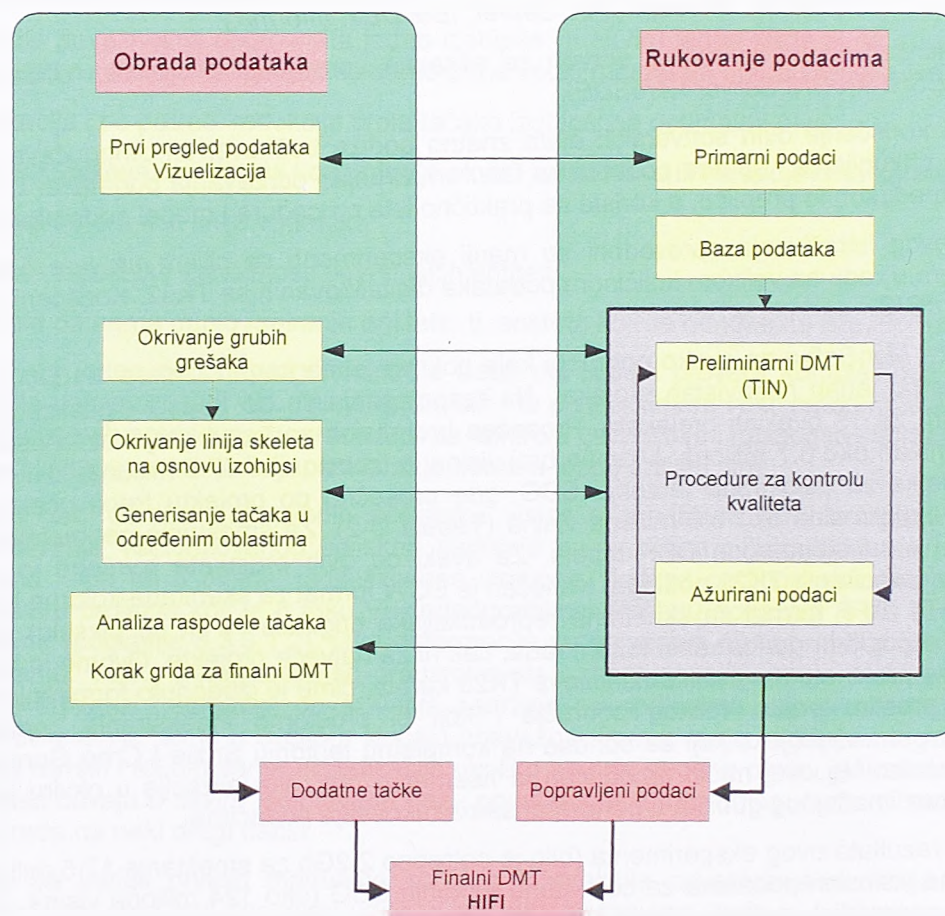


tehnika keširanja ovi rezultati bili i povoljniji, odnosno da ne bi trebalo očekivati veće probleme ni kod obrade podataka za celokupnu teritoriju SCG.

Na kraju, treba reći i to da u ovoj fazi zaista nema potrebe da svi podaci koji pripadaju istoj klasi prostornih podataka budu smešteni u okviru iste grupe tabela ili u okviru jedinstvene baze podataka. Iako eksperimenti izvedeni sa ArcGIS-om, kao i neka svetska iskustva, ukazuju na to da je obrada svih podataka u okviru jedne baze podataka sasvim realna mogućnost, ipak je mnogo jednostavnije da se to obavi po manjim celinama. Jedini uslov pri tome je da se može obezbediti zajednička verifikacija i obrada podataka za područja na spojevima celina.

#### 5.7.4.2 Obrada i verifikacija specifična za DMT podatke

U ovu grupu procedura za obradu i verifikaciju DMT podataka spadaju sve one procedure koje su specifične upravo za DMT podatke. Karakteristično za veći deo ovih procedura je da njihova realizacija podrazumeva korišćenje specijalizovanih softverskih alata sa funkcijama za formiranje i analizu DMT-a.



Slika 5-24 : Dijagram obrade podataka (Aumann 1992)

U okviru obrade i verifikacije podataka potrebno je sprovesti sledeće procedure (Aumann 1992):

- interaktivne procedure za otkrivanje i eliminaciju grubih grešaka;
- analiza kvaliteta ulaznih podataka;
- utvrđivanje rasporeda visinskih tačaka unutar posmatranog područja;
- generisanje referentnih tačaka unutar posebno definisanih površina (jezera, veće reke);
- generisanje dodatnih tačaka u oblastima sa nedovoljnom gustinom tačaka;
- specijalno procesiranje digitalizovanih izohipsi;



- provera efikasnosti automatskih procedura i korekcija rezultata;
- utvrđivanje optimalnih parametara za interpolaciju DMT-a.

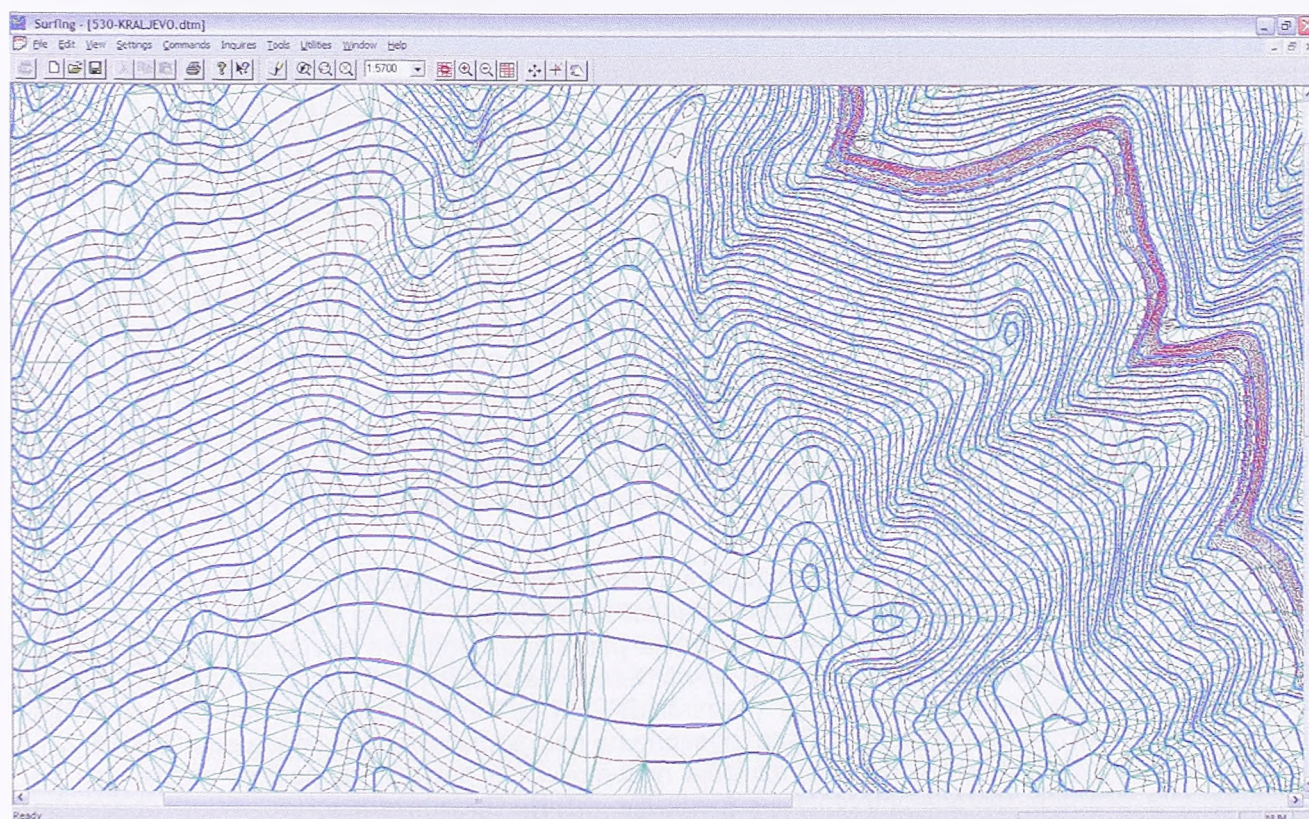
Procedure za otkrivanje i eliminaciju grubih grešaka su predviđene za otkrivanje onih grešaka koje su preostale nakon izvođenja prethodnih kontrola geometrije i topologije digitalizovanih podataka. To su one greške koje se inače ne mogu uočiti standardnim softverskim alatima. Ove kontrole obuhvataju:

- kontrolu monotonosti visina za tačke linija hidrografije;
- kontrolu slaganja visina susednih, bliskih tačaka;
- kontrolu slaganja visina na mestima gde se seku izohipse, strukturne i prelomne linije terena;
- kontrolu ispravnosti i slaganja visina dodeljenih visinskim tačkama i izohipsama i slične kontrole.

Prve tri kontrole mogu se realizovati korišćenjem nekih postojećih softverskih alata (na primer *SCOP++ GVE*, poglavlje 5.6.1), korišćenjem postojećih ili pisanjem novih procedura za izvođenje u GIS okruženju, ili razvojem posebnih, sopstvenih softverskih alata. Ove procedure se relativno jednostavno mogu implementirati i u okviru *Surfng-a*, gde bi se one izvodile tokom formiranja TIN-a ili nakon što je TIN već formiran.

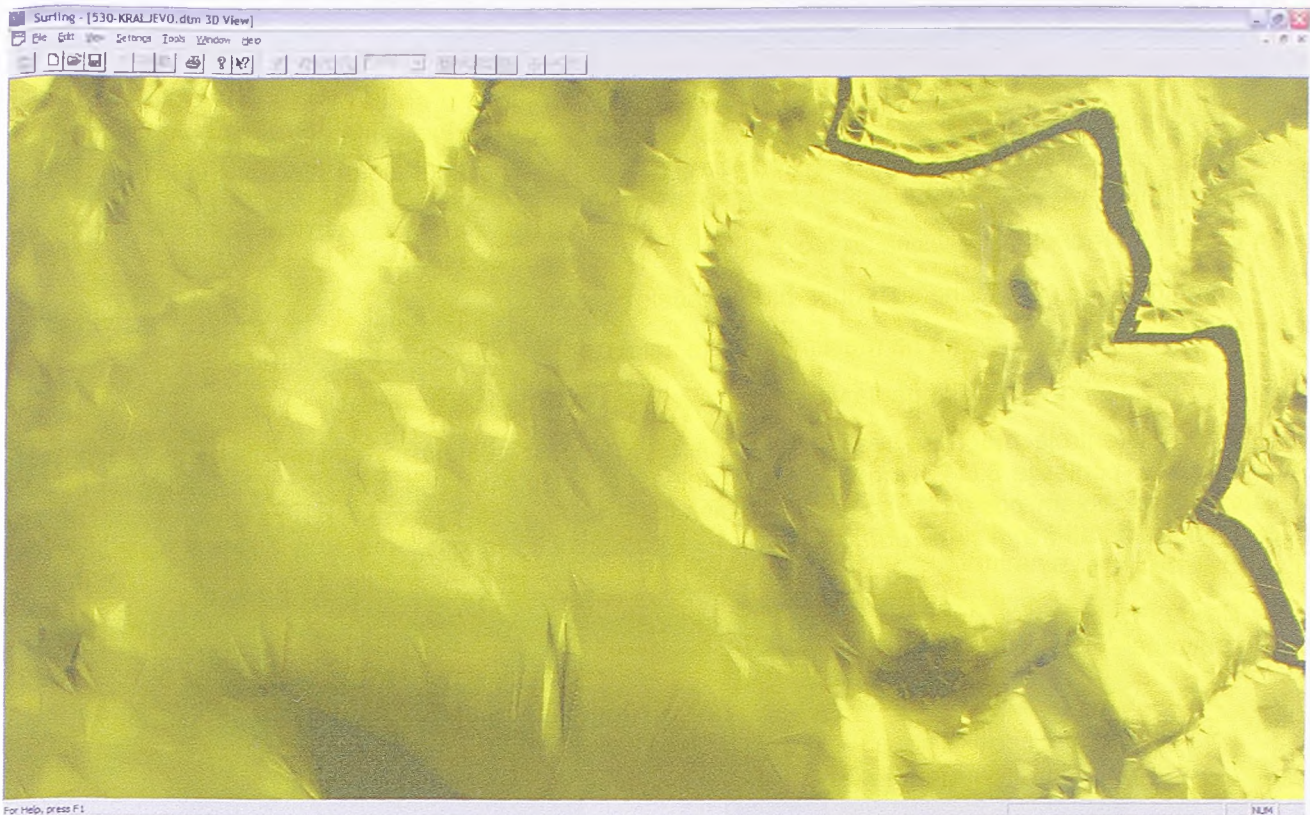
Druga i poslednja vrsta kontrola može se jednostavno realizovati korišćenjem funkcija koje su već implementirane u *Surfng-u*:

- prikaz visinskih razlika između temena trouglova TIN-a koji prelaze zadati prag (poglavlje 4.6.2.2, Slika 4-31);
- prikaz izohipsi konstruisanih na polovini ekvidistancije (Slika 5-25);
- 3D prikaz formirane površi terena (Slika 5-26);
- upoređenje visina kota i trigonometara sa visinama interpolovanim iz DMT-a formiranog samo na osnovu izohipsi (poglavlje 4.6.2.1).



Slika 5-25 : Primer ispoljavanja grešaka u podacima na konstruisanim izohipsama (gore desno - greška u visini izohipse za iznos jedne ekvidistancije, plavo su originalne izohipse digitalizovane sa karte, a crveno su izohipse konstruisane iz DMT-a)





Slika 5-26 : 3D vizuelizacija greške u ulaznim podacima u okruženju Surflng-a (ista greška kao na prethodnoj slici)

Podrazumeva se da verifikaciju treba sprovoditi formiranjem privremenih DMT-ova za manja područja, sistematski i temeljno, bez preskakanja. Sve predviđene kontrole vrlo su efikasne i nakon njihovog izvođenja mala je verovatnoća da u podacima ostanu neotkrivene grube greške. To se posebno odnosi na prvi i poslednji tip kontrola. Poslednji tip kontrola je uglavnom namenjen otkrivanju grubih grešaka u visinama digitalizovanih kota i trigonometara, bilo da su one posledica prvobitnog prikupljanja i kartiranja ovih visina, ili da su nastale u postupku digitalizacije. Naravno, kao kontrolne visine treba koristiti i visine dobijene iz svih drugih izvora (tačke geodetskih osnova, visine i DMT-ovi iz drugih projekata, i slično)

Posebno problematična mesta za verifikaciju podataka digitalizovanih sa TK25 predstavljaju područja gde je izražena karstna erozija, sa dosta škrapa i vrtača (Slika 5-27). Digitalizacija podataka na ovim područjima dosta je otežana zbog prisustva velikog broja malih zemljišnih oblika koje ne karakteriše sistematičnost. Ovo istovremeno otežava i kasniju verifikaciju ovih podataka i otkrivanje grešaka u njima, tako da kod obrade podataka za ova područja treba biti posebno pažljiv.

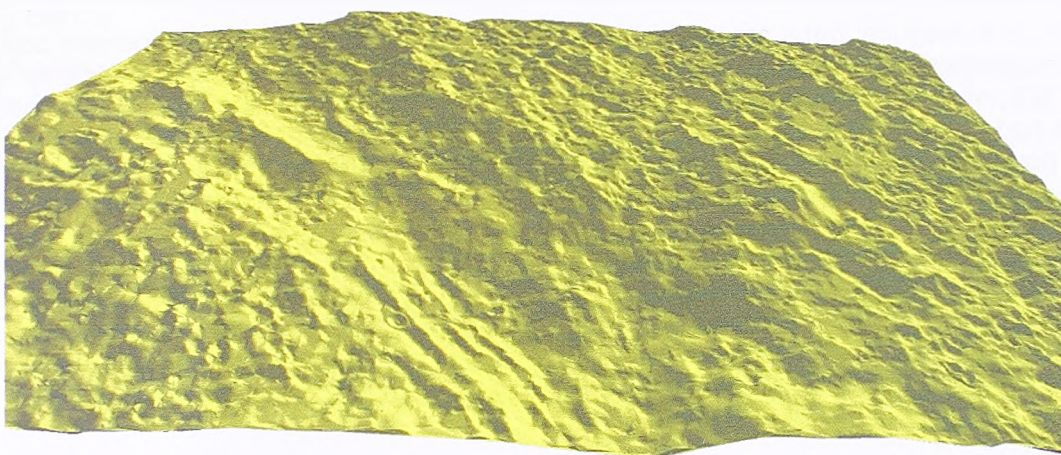
Paralelno sa ovim kontrolama može se sprovoditi i ocena kvaliteta prikupljenih podataka upoređenjem digitalizovanih visina ili visina interpolovanih iz privremeno kreiranog DMT-a sa tačnijim visinama iz drugih izvora. Za ovo se takođe vrlo uspešno mogu koristiti procedure implementirane u okviru Surflng-a (poglavlje 4.6.2.1).

Nakon otklanjanja grubih grešaka u prikupljenim podacima treba pristupiti kontroli rasporeda visina po posmatranom području. Na mestima gde nema dovoljno podataka treba obezbediti dovoljan broj dodatnih tačaka sa visinama. Slično važi i za područja pod velikim vodenim površinama za koja treba obezbediti korektno predstavljanje horizontalne površi terena na zadatoj koti. Količina dodatnih tačaka zavisi i od predviđene metode interpolacije (formiranja) DMT-a, ali generalno sve metode zahtevaju dovoljnu gustinu i ravnomeran raspored tačaka, posebno na nekim kritičnim delovima terena (Slika 5-22). Eksperimenti sprovedeni u okviru ovog istraživanja nesumnjivo su potvrdili da postoje mesta koja su kritična za sve poznate metode interpolacije (poglavlje 4.7.1). Dodatni podaci se mogu obezbediti manuelnom digitalizacijom tačaka (2D ili 3D) ili automatskim procedurama. Za ove potrebe mogu se koristiti sledeće procedure implementirane u Surflng-u:

- prikaz mesta (trouglova) gde se javljaju velika odstupanja između Bézier-ovih trouganih zakrpa i trougaonih faceta (poglavlje 4.6.2.3);



- ubacivanje novih tačaka u područjima gde se javljaju velika odstupanja između kubnih Bézier-ovih trouganih zakrpa i trougaonih faceta i na mestima gde je raspored tačaka generalno nepovoljan (poglavlje 4.5.3, opcija sa zadavanjem parametra *RTSDV*).



Slika 5-27 : Primer terena sa izrazito složenim reljefom, što predstavlja veliki problem kod digitalizacije i verifikacije podataka

Nakon kontrole i eventualne korekcije rezultata dobijenih automatskim procedurama, u sledećem koraku treba odrediti i visine svih prelomnih tačaka linija hidrografije. Naravno, korišćenje ovih linija za formiranje DMT-a ima smisla samo ako je geometrija ovih linija usaglašena sa digitalizovanim izohipsama. Određivanje visina treba izvesti interpolacijom iz DMT-a formiranog na osnovu svih ostalih prikupljenih podataka.

Sledi sprovođenje procedura koje imaju za cilj unapređenje podataka koji se u najvećoj meri sastoje od izohipsi. Ovo su već opisane procedure za automatsku detekciju i ekstrakciju strukturnih linija terena (poglavlja 3.4.2 i 4.5.2). Za ove svrhe preporučuje se korišćenje procedura razvijenih u okviru ovog istraživanja i implementiranih u *SurfIng*-u (poglavlje 4.5.2). S obzirom na uočena ograničenja i nedostatke softvera, potrebno je pridržavati se sledećih preporuka:

- ekstrakciju strukturnih linija obavljati po manjim celinama (jedan list TK25 karte);
- kod procesiranja svake celine koristiti podatke koji se odnose na veće područje (obezbediti dovoljan preklap između susednih celina) da bi se obezbedilo dobro slaganje ekstraktovanog sadržaja;
- koristiti algoritam koji se zasniva na korišćenju Voronoi dijagrama i principa skeleta i kore (VS algoritam, poglavlje 4.5.2.1.1), sa korekcijom visina korišćenjem linearne interpolacije od preseka sa izohipsama (opcija LIH, poglavlje 4.5.2.1.2);



- izvršiti odsecanje (engl. *clipping*) ekstraktovanog sadržaja koji pada van granica zahvaćenog područja (koristiti linije koje predstavljaju ivice listova TK25 karata);
- izvršiti objedinjavanje detektovanih strukturnih linija terena sa ostalim prikupljenim sadržajem;
- izvršiti manuelnu kontrolu i korekciju ekstraktovanog sadržaja u smislu topologije, geometrije i značaja linija za modeliranje površi terena.

Nakon formiranja mreže strukturnih i prelomnih linija terena treba izvršiti definitivnu kontrolu sadržaja, a posebno slaganje digitalizovanih izohipsi, hidrografije i strukturnih linija dobijenih automatskim procedurama. Takođe treba proveriti kvalitet rekonstrukcije površi terena na kritičnim mestima. Za ovo koristiti vizuelne metode kontrole:

- pregled izohipsi konstruisanih na polovini ekvidistancije;
- pregled izabranih profila terena;
- pregled 3D prikaz modela terena.

Nakon definitivne verifikacije prikupljenih podataka treba izvršiti empirijsko i eksperimentalno određivanje optimalnih parametara interpolacije za karakteristične tipove terena. Ova operacija može se izvoditi i u okviru faze formiranja finalnog DMT-a. Za neke izabrane metode interpolacije obim ovih poslova može biti veoma značajan (geostatističke metode, varijacione metode), dok je za neke on krajnje trivijalan (metod konačnih razlika sa uslovom odvodnjavanja, TIN i Bézier-ove trougaone zakrpe). Kao i kod kontrole sadržaja, treba koristiti sve raspoložive vizuelne i analitičke metode kontrole kvaliteta rekonstruisane površi terena (poglavlja 3.5.2 i 4.6).

Ukoliko je to moguće, treba predvideti i verifikaciju prikupljenih podataka korišćenjem postojećih ili novih aerofotogrametrijskih snimaka. Tu se pre svega misli na standardni fotomaterijal koji se koristi za ažuriranje TK25, ali u obzir dolaze i svi drugi raspoloživi snimci. Ovu verifikaciju treba sprovesti na dva načina. Oba podrazumevaju korišćenje digitalnih fotogrametrijskih sistema. Prvi način je superimpozicija prikupljenih podataka i izvedenih DMT produkata (izohipse, pravilni grid) u okviru fotogrametrijskog 3D modela. Drugi je izrada kontrolnog DMT-a korišćenjem automatske ekstrakcije DMT-a iz snimaka i njegovo naknadno korigovanje i dopuna na digitalnoj fotogrametrijskoj stanici. Na osnovu ovog DMT-a može se izvršiti verifikacija podataka dobijenih digitalizacijom TK25 podloga i oceniti njihov kvalitet. Posebno je važna provera rezultata dobijenih automatskim procedurama, tj. slaganje rekonstruisane površi terena na mestima gde se javljaju strukturne linije terena. Na ovaj način mogu se proveriti i po potrebi korigovati algoritmi i parametri procesiranja korišćeni za detekciju i ekstrakciju strukturnih linija terena, kao i ostale operacije zaključno sa interpolacijom (rekonstrukcijom) površi terena na osnovu digitalizovanih i obrađenih podataka.

## 5.8 Inicijalno ažuriranje podataka

Procedure koje treba sprovesti u okviru ove faze imaju za cilj otklanjanje grešaka koje nisu posledica primarnog i sekundarnog prikupljanja podataka, već su posledica promena na terenu nastalih od trenutka primarnog kartiranja podataka. U tom smislu posebno treba obraditi sva područja gde se javljaju otvoreni površinski kopovi, područja gde su građena veštačka jezera, brane, aerodromi i drugi veliki građevinski objekti, i uopšte sva mesta gde je došlo do značajnih promena na površi terena.

Za ove potrebe treba koristiti fotogrametrijsku metodu dopune sadržaja ili preuzimanje podataka iz postojećih izvora novijeg datuma.

Fotogrametrijsku dopunu sadržaja treba izvesti korišćenjem aerofotogrametrijskih ili satelitskih snimaka (*SPOT*, *IKONOS*, *QuickBird*). Tom prilikom treba razmotriti i mogućnost kartiranja strukturnih i prelomnih linija terena korišćenjem raspoloživog fotomaterijala. Svakako da tada treba obaviti i generalnu verifikaciju prikupljenih podataka za celokupno područje pokriveno raspoloživim fotomaterijalom.

Kada je reč o preuzimanju podataka iz postojećih izvora ovde se pre svega misli na postojeću ODK i na projekte izrade ortofoto podloga. Ne ulazeći detaljno u razmatranje ovih procedura, treba samo napomenuti da kod preuzimanja ovih podataka treba obezbediti i njihovo generalisanje s obzirom na sadržaj i tačnost DMT-a formiranog na osnovu TK25 podloga.

## 5.9 Formiranje finalnog DMT-a, arhiviranje i održavanje podataka

Poslednja faza kod formiranja nacionalnog DMT-a je sama interpolacija DMT-a, tj. formiranje odgovarajućeg modela površi terena u digitalnom obliku i njegovo organizovanje u odgovarajuću strukturu podataka pogodnu za dalju eksploataciju i održavanje.

Ovde je na raspolaganju nekoliko mogućih pristupa:

- formiranje DMT-a sa odgovarajućom strukturom podataka (grid, TIN, ili hibridni) bez daljeg održavanja prikupljenih podataka u sirovom obliku (izohipse, visinske tačke i linije terena);
- formiranje DMT-a sa paralelnim održavanjem primarnih (izvornih) podataka na osnovu kojih je on formiran;
- arhiviranje i održavanje primarnih (i posebno obrađenih podataka), dok se DMT formira po potrebi i u hodu (*Peng 2004, Hochstoger 1996*).

Prvi pristup je najjednostavniji, jer se održava samo formirani DMT koji je istovremeno i pogodan za eksploataciju. Problem je u tome što se definitivno prelazi na DMT, dok prikupljeni podaci vremenom zastarevaju. Svi propusti tokom formiranja DMT-a, tj. greške interpolacije teško se mogu naknadno eliminisati.

Drugi pristup omogućava očuvanje tačnosti izvornih podataka, ali se tada povećavaju zahtevi u pogledu memorijskog prostora potrebnog za arhiviranje podataka. Pored toga, znatno se komplikuju procedure za rukovanje i ažuriranje podataka, jer treba obezbediti sinhronizaciju izvornih podataka i formiranog DMT-a.

Treći pristup zahteva sofisticirane postupke i softver za organizaciju i rukovanje podacima da bi se obezbedila neophodna funkcionalnost i performanse. Sve analize se izvode nad DMT-om koji se formira on-line i koji se praktično nikada i ne arhivira u okviru baze podataka. Prednost pristupa je jednostavno održavanje i ažuriranje podataka, ali i mogućnost da se konstantno popravljaju pravila i numerički postupci za rekonstrukciju površi terena na osnovu najažurnijih podataka.

U nastavku će biti razmotrene procedure za formiranje DMT-a, kao i procedure za arhiviranje i održavanje podataka, vodeći računa o specifičnostima svakog od pomenutih pristupa. S obzirom da su različiti postupci za formiranje DMT-a (metode interpolacije, organizacija podataka, prednosti i mane) detaljno objašnjeni u poglavlju 3, ovde će se pažnja više usmeriti na specifičnosti vezane za konkretnu teritoriju SCG. Biće razmatrana potencijalna softverska rešenja i zahtevi u pogledu memorijskog prostora s obzirom na prikupljenu količinu podataka i karakteristike područja.

### 5.9.1 Formiranje DMT-a

Formiranje DMT-a na osnovu prikupljenih i obrađenih podataka može se izvesti korišćenjem tri osnovne strukture podataka (poglavlje 3.1):

- grid,
- TIN i
- hibridna struktura podataka.

Prednosti i mane svakog od pomenutih pristupa, kao i načini organizovanja podataka i postupci formiranja DMT-ova za svaki od njih detaljno su obrađeni u poglavljima 3.1, 3.2 i 3.3. Ovde se samo razmatraju specifičnosti formiranja DMT-a za celokupnu državnu teritoriju SCG. Te specifičnosti se ogledaju u: izuzetno velikom broju visina (100-200 miliona, u zavisnosti od izabranog pristupa), vrsti i kvalitetu podataka na osnovu kojih se taj DMT formira, karakteristikama samog područja i opštima uslovima za realizaciju celog posla.

Zajedničko za sva tri pristupa je što treba omogućiti formiranje DMT-a uz korišćenje i pravilno respektovanje svih raspoloživih podataka. U obradu svakako treba uključiti i podatke iz drugih izvora. Pri tome je potrebno kod svake od metoda izvršiti i odgovarajuće filtriranje podataka s obzirom na slučajne greške u podacima, tj. na tačnost podataka.



### 5.9.1.1 Grid DMT

Kada je reč o grid DMT-u jedna od osnovnih stvari koja određuje ovakav DMT je veličina ćelije grida. Izbor optimalne rezolucije grida može se izabrati za neko područje vrlo jednostavno i pouzdano korišćenjem razvijenih softverskih alata po sledećem algoritmu:

- a) formirati TIN DMT na osnovu svih primarnih DMT podataka;
- b) na osnovu dobijenog DMT-a interpolovati uniformni grid sa pretpostavljenom rezolucijom;
- c) konvertovati grid u datoteku sa rasutim tačkama;
- d) formirati novi TIN DMT korišćenjem tačaka grida iz formirane datoteke;
- e) uporediti visine tačaka iz skupa primarnih DMT podataka sa visinama interpolovanim u tim tačkama iz TIN DMT-a formiranog na osnovu grida (koristiti funkciju opisanu u poglavljima 4.6.2.1 i 5.3.3.2 sa generisanjem detaljnih izveštaja kao što su Izveštaj E-1 do Izveštaj E-33);
- f) analizirati dobijene srednje kvadratne greške, minimalne i maksimalne vrednosti odstupanja i doneti odluku o smanjenju ili povećanju rezolucije (veličine ćelije) grida – u tom slučaju ponoviti proceduru od tačke b).

S obzirom na tipove terena koji su karakteristični za teritoriju SCG i visinsku tačnost podataka sa TK25, može se reći da optimalna veličina ćelije grida iznosi od desetak metara u planinskim područjima Crne Gore, pa do više stotina metara u ravninama Vojvodine. Za ostatak teritorije optimalne vrednosti kreću se u rasponu od 25 do 100m. Ovo je potvrđeno i eksperimentalno. Prema tome, ako bi se formirao DMT sa uniformnim gridom sledi da bi najlogičnije bilo da to bude grid sa korakom od 25m. Na taj način, žrtvovala se nešto od kvaliteta DMT-a u najsloženijim tipovima terena (postavlja se pitanje i kolika je stvarna tačnost visinske predstave terena u tim područjima), ali se neće ugroziti tačnost postojećih podataka na najvećem delu državne teritorije. Površina teritorije SCG iznosi oko 103000km<sup>2</sup>. Sa veličinom ćelije grida od 25x25=625m<sup>2</sup> proizilazi da bi tada ukupan broj visina za pokrivanje celokupne državne teritorije bio oko 165 miliona.

Ovo je mnogo povoljnije u poređenju sa oko 124 miliona visina tačaka izohipsi, kota i trigonometara dobijenih postupcima digitalizacije TK25. Iako je broj visina tačaka grida povećan za oko 33%, uštede su veoma velike. Naime, komplikovana topologija izohipsi i neophodnost čuvanja sve tri koordinate za svaku tačku izohipse čini da je za ove podatke potrebno obezbediti mnogo više prostora na disku. Ti memorijski zahtevi iznose oko 4Gb ako se koristi *ESRI Shape* format ili geo baza u *Microsoft Access-u* (poglavlje 5.7.4.1), a ako bi se koristio *DWG* format zapisa za ove podatke bilo bi dovoljno oko 1.5Gb na disku.

Polazi se od pretpostavke da se podacima grida može efikasno rukovati korišćenjem standardnih tehnika za rad sa digitalnim slikama. Za memorisanje svake visine kod rastera treba odvojiti 16 bita, tj. 2 bajta. Na taj način je omogućeno čuvanje visina sa decimetarskom tačnošću. U tom slučaju dobija se da je za 165 miliona visina potrebno odvojiti oko 315Mb, ako se ne koriste formati zapisa sa kompresijom podataka. Ako se još uzme u obzir pravougaona struktura rasterskih fajlova može se reći da ti zahtevi mogu ići i do 400Mb. Sa korišćenjem kompresije rasterskih podataka bez gubitka tačnosti (LZW, PNG, RLE, ili neki drugi) ovi zahtevi se dodatno mogu smanjiti na ispod 100Mb. Ako se za sve rasterske slike formiraju odgovarajuće piramide slika za brže procesiranje, i predvidi njihovo smeštanje u okviru napredne baze podataka ove brojke treba dodatno pomnožiti sa 1.5 do 2 puta. Napokon, dolazi se do zaključka da u najgorem slučaju ne treba očekivati više od 650Mb podataka, dok u najpovoljnijoj varijanti to može da iznosi i 100-200Mb. U poređenju sa 1.5, odnosno 4Gb, koliko je potrebno za izohipse (*DWG* ili *Shape*), vidi se da se ostvaruju vrlo značajne uštede. Naravno, kada se govori o podacima u formi izohipsi i rasutim tačkama treba imati na umu da se oni ne mogu direktno koristiti za DMT analize, već na osnovu njih tek treba formirati DMT. Iz ovog se vidi da ni *DEM SCG* koji bi imao rezoluciju od 10m ne bi bio veći problem za arhiviranje (približno od 1 do 4Gb).

Kod ovog pristupa najlogičnije bi bilo da se formiranje ovakvog grid DMT-a obavi deljenjem državne teritorije na manje pravougaone jedinice. Ovde će se dati jedan mogući način izbora tih jedinica i formiranja rasterskih datoteka. Dimenzije pravougaonih jedinica treba izabrati tako da budu izražene kao  $n \cdot 25^{32} \text{ m} = n \cdot 800\text{m}$ , ili nešto slično. Na taj način omogućeno je formiranje piramida slika za svaku pravougaonu jedinicu, pri čemu će ove slike sukcesivno imati korak grida od 25m, 50m, 100m, 200m, 400m, 800m, itd. u zavisnosti od izabranog broja *n*. Ako se za broj *n* izabere vrednost 8, dobija se dimenzija rasterskih fajlova za svaku jedinicu od 6400x6400m, ili 256x256 ćelija, tj. 65536 visina po jednom rasterskom fajlu u najfinijoj rezoluciji od 25m. Posao izrade piramide rasterskih slika može se poveriti i nekom standardnom softveru koji je predviđen za manipulaciju rasterskim slikama. Najbolji efekti

postizu se smeštanjem rasterskih datoteka na neki od servera baze podataka sa naprednim mogućnostima za rukovanje rasterskim slikama (deljenje slika, formiranje piramida, brza selekcija i učitavanje).

Interpolacija rastera može se jednostavno obaviti korišćenjem metoda interpolacije razvijenih u okviru ovog rada i *Surfling* softvera. Pri tome, detekcija i ugradnja strukturnih linija terena nije neophodna, već samo treba voditi računa o problematičnim mestima, tj. koristiti opcije *MaxSDV* i *RTSDV* kod formiranja TIN DMT-a. Podrazumeva se korišćenje kubnih Bézier-ovih trouganih zakrpa. Druga opcija je korišćenje standardnih GIS alata (*Geomedia* ili *ArcGIS*) i standardnih ili specijalizovanih metoda interpolacije. Preporučuje se korišćenje varijacionih metoda tj. radijalnih baznih funkcija sa multikvadratnom funkcijom. Može se koristiti i metod konačnih razlika sa uslovom odvodnjavanja (Topo To Raster funkcija *ArcGIS*-a, ANUDEM algoritam), s tim da tu treba voditi računa o mogućim greškama kod interpolacije (poglavlje 4.7.1). Podrazumeva se da svakako treba iskoristiti sve raspoložive podatke koji su do tada prikupljeni i verifikovani (izohipse, kote i trigonometri, dodatne visinske tačke u posebnim područjima, strukturne linije terena, hidrografija, i sl.).

Primeri ovakvog pristupa mogu se naći i u literaturi. Jedan od novijih je formiranje preciznog DEM-a za teritoriju nemačke države Baden-Württemberg (*Hilbring 2004*). Prikazan je postupak organizovanja i napredne 3D vizualizacije podataka koji pokrivaju teritoriju od 35752km<sup>2</sup>, sa rezolucijom DEM-a od 1 i 5m (LiDAR podaci).

Prednosti ovog pristupa sa formiranjem jednostavnog grid DMT-a su očigledne. Pored memorijskih ušteta, dobija se mnogo i na jednostavnosti korišćenja podataka. Postoji veliki broj softverskih alata za rukovanje i analizu rasterskih podataka sa podrškom brojnim formatima zapisa, uključujući tu i podršku rukovanju ovim slikama u okviru velikih baza podataka. Vrlo se jednostavno mogu izvoditi operacije resamplinga, isecanja, spajanja, operacije rasterske algebre (razlika dva rastera, skaliranje, i sl.), i druge operacije. Vizuelizacija podataka je takođe vrlo jednostavna i efikasna. Sve ovo je posebno značajno i sa aspekta distribucije i eksploatacije podataka od strane krajnjih korisnika. Prema tome, skoro je izvesno da na osnovu prikupljenih i verifikovanih podataka treba formirati grid DMT. Naravno, potrebno je razraditi detalje kao što su: dimenzije i broj datoteka, formati zapisa, koordinatni sistem i slično. Procena autora je da su ovo manje ili više trivijalni problemi i da se oni mogu relativno jednostavno rešiti kada za to dođe trenutak.

### 5.9.1.2 TIN DMT

Formiranje TIN DMT-a za celokupnu državnu teritoriju SCG na osnovu podataka izohipsi podrazumeva TIN od preko 100 miliona temena i preko 200 miliona trouglova. Samo formiranje TIN DMT-a može se izvesti direktnim korišćenjem podataka digitalizacije (izohipse, strukturne linije i pojedinačne visinske tačke), ili podacima dobijenim pretprocesiranjem izohipsi (visine interpolovane iz DMT-a dobijenog na osnovu izohipsi, strukturne linije i pojedinačne visinske tačke). Korišćenjem drugog pristupa broj tačaka TIN DMT-a može se redukovati. Ovaj pristup je značajan i zbog toga što se njime podaci mogu pripremiti tako da se obezbedi manje-više pravilna struktura podataka (visine u gridu sa promenljivom ili uniformnom veličinom ćelije grida), a samim tim i jednostavnije i efikasnije rukovanje podacima.

Interpolacija visina za tačke u pravilnoj mreži može se izvesti korišćenjem istih softverskih alata koji su predviđeni i za formiranje grid DMT-a. Nakon toga, broj ovih tačaka može se redukovati na optimalan nivo, s obzirom na tip terena i tačnost podataka, tj. tačnost DMT-a. Za ovo se uspešno mogu iskoristiti procedure i softver razvijeni u okviru ovog istraživanja i implementirani u okviru *Surfling*-a (poglavlje 4.5.4). Preliminarni testovi sugerišu da se za neke delove državne teritorije (Vojvodina) podaci mogu redukovati i na 5% od prvobitne količine. Za većinu područja taj procenat iznosi 30-50%, ali ima i područja gde redukcija ne daje nikakve efekte (tereni u Crnoj Gori). Ukupna procenjena redukcija iznosi oko 30%, tako da se može očekivati dobro predstavljanje površi terena za celokupnu teritoriju SCG i sa 90 miliona visina, umesto sa 124 miliona, koliko iznosi broj prikupljenih tačaka izohipsi.

Čak i kad bi se količina postojećih podataka redukovala odgovarajućim procedurama (redukcija broja tačaka na izohipsama, prelazak na grid promenljive veličine po gore navedenoj proceduri) i dalje se mora računati na 80 do 100 miliona temena TIN-a (visina).

U literaturi se može naći prikaz projekta koji ima za cilj formiranje sistema koji bi bio u stanju da rukuje TIN DMT-om sastavljenim i do 300 miliona tačaka. Radi se o projektu formiranja DMT-a za teritoriju Katalonije, Španija. Predviđeno je formiranje DMT-a za površinu od 32000km<sup>2</sup>, a glavni cilj je



korišćenje ovog modela za generisanje izohipsi kartografskog kvaliteta u okviru produkcije karata razmere 1:5000, kao i za ortofotoprodukciju (Ruiz 2000). Prethodni TIN model Katalonije sastojao se od 75 miliona tačaka, ali ni tada nije formiran model za celokupnu teritoriju. Za formiranje TIN-a izabran je inkrementalni algoritam sa insertovanjem tačaka, jer on omogućava dinamičko formiranje TIN-a i njegove naknadne korekcije (poglavlje 3.3.1.1). Za efikasno lociranje trougla TIN-a u koji pada nova tačka koristi se indeksiranje tačaka po principu kvadratnog stabla. Za postizanje efikasnije i pouzdanije obrade podataka implementirana su i druga rešenja kao što su:

- grupisanje podataka po prostornom kriterijumu (karta, fotogrametrijski model i sl.);
- korišćenje adaptivne precizne aritmetike po Shewchuk-u (poglavlje 3.3.1.1);
- smeštanje podataka u komercijalnu objektno orijentisanu bazu O<sub>2</sub>;
- kombinacija TIN i grid modela, i sl.

Uočeni su i opisani problemi i teškoće u realizaciji ovog posla, a posebno memorijski problemi kod izvođenja samog algoritma za formiranje TIN-a. Korišćen je TIN model koji se bazira na dvostruko povezanoj listi stranica TIN-a, što iziskuje memorijski prostor od oko  $4 \cdot 18 \cdot V$  bajta samo za topologiju TIN-a, gde je  $V$  broj temena TIN-a. Ako se na ovo dodaju i neophodni atributi koje treba voditi za temena, stranice i trouglove TIN-a, kao i prostor za smeštanje kordinata temena dolazi se do vrednosti od oko  $100 \cdot V$  bajta za celokupan TIN DMT.

Ako bi se pomenuti memorijski zahtevi primenili na podatke koji se odnose na teritoriju SCG dobija se da za DMT treba izdvojiti oko 10Gb memorijskog prostora. Jasno je da to podrazumeva posebne tehnike rukovanja memorijom kod formiranja TIN-a, uz obavezno korišćenje spoljnih memorijskih jedinica (diskovi). Na ovo treba dodati i zahteve vezane za efikasno indeksiranje ovako velike količine podataka i njihovo eventualno smeštanje u okviru standardnog RDBMS-a. Sve u svemu, radi se o memorijskim zahtevima koji su znatno veći nego kada je reč o grid DMT-u, čak i kada bi se radio grid DMT sa korakom grida od 10m. Ako se na ovo doda znatno složenija realizacija postupka formiranja TIN DMT-a, kao i složenije procedure za njegovu kasniju analizu, može se zaključiti da se radi o vrlo teškom, iako ne i neostvarivom zadatku.

Jedno od mogućih rešenja za prevazilaženje gore opisanih problema na formiranju TIN-a može biti deljenje zahvaćene teritorije na manje celine. Za svaku prostornu jedinicu - celinu formirao bi se poseban TIN, a bilo bi obezbeđeno i međusobno nastavljjanje susednih TIN-ova u kontinuitetu. Prostorne jedinice za koje bi se formirali TIN modeli mogu da budu područja koje pokriva 1, 4, 8 ili maksimalno 16 listova TK25. Pri formiranju TIN-ova treba koristiti prošireni skup podataka (za 10-20% preko granice jedne prostorne jedinice) da bi se obezbedio odgovarajući kontinuitet i slaganje susednih TIN-ova na zajedničkim granicama. Nakon formiranja TIN-a za jednu prostornu jedinicu na osnovu proširenog skupa podataka treba obrisati sve trouglove čija temena ne padaju u područje posmatrane celine. Između ostalog, treba predvideti i procedure za:

- odgovarajuće indeksiranje podataka;
- međusobno povezivanje trouglova susednih TIN-ova;
- posebno računanje normala i izvoda na granicama TIN-a;
- kompletnu organizaciju ovakvog DMT-a u okviru jedinstvene baze podataka.

Primitivnija varijanta predloženog rešenja može biti formiranje nezavisnih TIN-ova za predložene prostorne jedinice i njihovo učitavanje i korišćenje u radnom okruženju jednog projekta. Ovakvo rešenje nacionalnog DMT-a može se relativno jednostavno realizovati korišćenjem ArcGIS softvera, a moglo bi se implementirati i u okviru MapSoft-a. Naravno, prilagođavanje postojećih funkcija za analizu DMT-a bi zahtevalo izvesno vreme i resurse.

Zbog gore opisanih problema u ovom trenutku se ne preporučuje formiranje integrisanog TIN DMT-a za teritoriju SCG. Naravno, primena TIN modela podataka za rukovanje nacionalnim DMT-om je i dalje aktuelna, s tim da je stav autora da to treba rešiti drugačije. Ove mogućnosti su razmatrane u poglavlju 5.9.2.

### 5.9.1.3 Hibridni DMT

Hibridni DMT predstavlja kombinaciju pravilne mreže visina i karakterističnih elemenata terena (karakteristične tačke, strukturne i prelomne linije, površine sa posebnim značenjem i sl.). Ova kombinacija može biti rešena kombinovanjem grid i TIN strukture ili na način kako je to urađeno kod modela podataka podržanog u SCOP-u (poglavlje 5.6.2, *INPHO 2004a*).

Kada je reč o formiranju nacionalnog DMT-a na osnovu podataka digitalizacije postojećih TK25 podloga ovakvo rešenje podrazumeva interpolaciju visina u pravilnoj mreži tačaka sa uniformnom ili promenljivom veličinom grida.

Implementacija ovakvog DMT-a, a posebno kada je reč o pokrivanju celokupne državne teritorije, veoma je složena. Ovo zahteva specijalne procedure kako za procesiranje, tako i za naknadne analize i korišćenje DMT-a. Sem SCOP-a, na tržištu skoro da nema široko rasprostranjenih softverskih paketa koji podržavaju ovakav hibridni DMT. Zbog svega navedenog, ako se izabere ovakva struktura podataka nacionalnog DMT-a, logično bi bilo očekivati da se upravo ovaj softver iskoristi kao osnovni alat za realizaciju ovakvog DMT-a. Ovaj alat poseduje sve neophodne funkcije za efikasno i kvalitetno formiranje, arhiviranje, održavanje i korišćenje ovakvog DMT-a. Poseban kvalitet ovog softvera kada je reč o konkretnom projektu izrade nacionalnog DMT-a na osnovu podataka sa TK25 podloga ogleda se u sledećem:

- osnovna koncepcija softvera osmišljena je sa ciljem efikasnog rukovanja modelima terena sa više miliona, pa i stotina miliona tačaka, sve do 1 milijarde visina;
- podržano je specijalno pretprocesiranje podataka koji su dobijeni digitalizacijom izohipsi sa postojećih podloga;
- osnovna metoda interpolacije SCOP-a, linearna predikcija po metodi najmanjih kvadrata (kolokacija, kriging), implementirana je tako da se striktno poštuju strukturne i prelomne linije terena, a predviđeno je i filtriranje podataka s obzirom na različite kategorije podataka u pogledu tačnosti visina;
- softver omogućava tesnu vezu sa TopDM softverom i pratećom bazom podataka za smeštanje svih relevantnih informacija za nacionalni DMT (primarni podaci i izvedeni produkti);
- na raspolaganju je veliki broj softverskih modula i dodataka koji praktično pokrivaju sve moguće oblasti primene DMT-a;
- podržan je veliki broj standardnih formata datoteka za ulazne podatke i rezultate obrade.

SCOP je rezultat višedecenijskog istraživanja na polju digitalnog modeliranja terena i praktična implementacija dobro osmišljene metodologije i tehnoloških postupaka za formiranje i rukovanje nacionalnim DMT-om. Zato ovde neće biti detaljnije razmatrane procedure formiranja hibridnog DMT-a. Treba samo konstatovati da bi izbor ovog softvera i na njemu bazirane metodologije bio opravdano i pouzdano rešenje za realizaciju nacionalnog DMT-a. U svakom slučaju, nema opravdanja da se kreće sa sopstvenim razvojem u ovom pravcu.

## 5.9.2 Arhiviranje i održavanje podataka

Nakon prikupljanja, obrade i verifikacije podataka DMT-a neophodno je arhivirati te podatke na način koji će obezbediti njihovo efikasno korišćenje i održavanje. Kao što je to već rečeno u uvodnom delu poglavlja 5.9, moguća su tri pristupa. Prvi podrazumeva definitivni prelazak na podatke uređene u DMT sa TIN, grid ili hibridnom strukturom i njegovo održavanje. Kod drugog pristupa vrši se održavanje primarnih podataka sa istovremenim ili povremenim ažuriranjem izvedenog DMT-a. Poslednji, najmoderniji pristup podrazumeva čuvanje originalnih, prikupljenih DMT podataka, a DMT se formira po potrebi (*Peng 2004, Hochstoger 1996*).

Arhiviranje i održavanje podataka nacionalnog DMT-a koji bi se realizovao formiranjem grid DMT-a sa korišćenjem datoteka u rasterskim formatima (poglavlje 5.9.1.1) može se izvesti na dva načina. Prvi podrazumeva arhiviranje i održavanje ažurnim primarnih podataka na osnovu kojih je formiran grid DMT. To su izohipse, strukturne i prelomne linije i pojedinačne visinske tačke. Nakon ažuriranja podataka na nekom području potrebno je ažurirati i odgovarajuće rastere u bazi podataka grid DMT-a. Procedure za



realizaciju ovakvog pristupa relativno su jednostavne, samo treba voditi računa o sinhronizaciji podataka. Drugi pristup bazira se na direktnom ažuriranju grid DMT-a, dok se primarni podaci uopšte ne koriste. Ovaj pristup je jednostavniji i zahteva manje resursa. Cena koja se pri tome plaća je da primarni podaci dobijeni digitalizacijom TK25 vremenom postaju zastareli i sa ograničenom upotrebljivošću.

Kod TIN DMT-a može se relativno jednostavno obezbediti veza i sinhronizacija između primarnih podataka i samog DMT-a. Time je i implementacija procedura za ažuriranje nacionalnog DMT-a prilično pojednostavljena. Samo ažuriranje i rukovanje podacima je nešto jednostavnije ako se TIN DMT formira na osnovu prethodno interpolovanih visina, umesto da se koriste izohipse. U tom slučaju, podrazumeva se i održavanje (ažuriranje) interpolovanih visina umesto izohipsi.

Ažuriranje podataka za slučaj hibridnog DMT-a po svojim karakteristikama nalazi se negde između ažuriranja DMT-a sa grid strukturom i ažuriranja DMT-a sa TIN strukturom. Može se reći da ono najbliže odgovara ažuriranju TIN DMT-a kod koga su primarni podaci obrađeni tako što se prešlo sa nepravilne na pravilnu strukturu podataka (na primer sa izohipsi na uniformni ili promenljivi grid).

S obzirom da su struktura i organizacija TIN, grid ili hibridnog DMT-a, kao i procedure za rukovanje ovim modelima detaljno predstavljene u prethodnim poglavljima, ovde će se posebna pažnja posvetiti pristupu koji podrazumeva arhiviranje i održavanje primarnih DMT podataka, dok se DMT uopšte ne arhivira već se formira po potrebi.

Prednost ovog pristupa je što se u najvećem delu mogu koristiti standardne GIS softverske funkcije i alati, bez specifičnosti vezanih za DMT podatke. Zato se on može jednostavno realizovati korišćenjem standardnih GIS okruženja (*ArcGIS*, *Geomedia*, *MapSoft* i drugi). Ti alati već imaju razvijene funkcije za efikasno rukovanje velikim količinama prostornih podataka. Ta efikasnost se postiže odgovarajućim prostornim indeksiranjem podataka, ali i njihovim raslojavanjem prema tematskom sadržaju. Originalni DMT podaci, njihova topologija, geometrija i prateći atributi mogu se čuvati u standardnim prostornim bazama podataka. Ovo obezbeđuje, pored efikasnosti upita, i jednostavno kombinovanje sa drugim podacima, olakšava njihovu zajedničku obradu i analizu i eliminiše dupliranje podataka.

Ideja na kojoj se zasniva ovaj pristup je da se TIN (eventualno grid) DMT formira svaki put kada je to potrebno. To može da se desi u toku vizuelizacije površi terena, prikaza izohipsi, kod iscrtavanja profila terena, računanja kubatura i kod drugih analiza. Polazi se od pretpostavke da je detaljnost TIN DMT-a koji treba formirati često povezana sa veličinom područja koje je predmet analize. Na primer, ako se vrši prikaz DMT-a za celokupnu teritoriju SCG na ekranu monitora, sasvim je nepotrebno da se koristi DMT sa više od milion tačaka, jer se na ekranu i ne može prikazati više od 1-2 miliona različitih piksela. U najčešćem slučaju dovoljno je nekoliko desetina hiljada ili par stotina hiljada tačaka za formiranje DMT-a koji će odgovarati ovim zahtevima. Isto tako, ako se računa profil terena, interesantni su samo podaci koji leže u jednom ograničenom pojasu levo i desno od linije profila, pa se i tu dobija da od podataka koji se odnose na čitavu državnu teritoriju treba koristiti samo mali deo.

Da bi se postiglo efikasno on-line formiranje TIN-a potrebno je obezbediti brze algoritme za triangulaciju i izbor minimalne, tj. optimalne količine relevantnih podataka s obzirom na zahtev za obradu. Algoritmi za triangulaciju danas ne predstavljaju veći problem. Uz standardan računarski hardver može se postići brzina od nekoliko sekundi za formiranje TIN-a od više desetina hiljada tačaka. Veći problem predstavlja izbor optimalne količine podataka na osnovu kojih treba formirati TIN DMT. Ovo se može postići korišćenjem standardnih GIS prostornih upita, ali uz uslov da se podaci prethodno pripreme na odgovarajući način. Priprema se sastoji u tome da se svi podaci na osnovu kojih se formira DMT indeksiraju, tj. rasloje prema svom značaju za rekonstrukciju površi terena na nivoe (slojeve). Ovo je slično formiranju piramide slika kod manipulacije rasterskim podacima. Na nivou sa najvećom detaljnošću (najniži sloj) nalaze se svi podaci, dok se na najvišem sloju nalaze samo najvažniji podaci, tj. podaci za najgeneralniji prikaz terena.

Kada je reč o pojedinačnim visinskim tačkama ovo indeksiranje podataka može se realizovati relativno jednostavno, bez obzira da li se radi o tačkama nepravilno raspoređenim po terenu ili o tačkama pravilnog grida. Za ovo se mogu koristiti algoritmi koji su prikazani u poglavlju 3.5.1. Kada je reč o podacima dobijenim digitalizacijom izohipsi stvar se komplikuje zbog topologije izohipsi. U tom slučaju, rešenje predstavlja formiranje guste, pravilne mreže visinskih tačaka i redukcija broja tačaka na optimalan nivo. Za ovakvo procesiranje podataka mogu se koristiti i jednostavniji algoritmi i softverski alati kao što su oni razvijeni u okviru ovog istraživanja (poglavlje 4.5.4). Raslojavanje, tj. indeksiranje preostalih tačaka treba vršiti prema položaju koji konkretna tačka ima u gridu i prema doprinosu koji ona ima za predstavljanje površi terena. Najjednostavniji način je da se sve tačke grida koje su preostale nakon redukcije rasloje prema tome na kom nivou grida leže (u smislu koraka grida, Slika 4-23). U slučaju formiranja DMT-a koji je predmet ovog istraživanja predlaže se formiranje 6 nivoa. Tabela 5-7 sadrži

vrednosti rastojanja između susednih tačaka za svaki nivo, kao i procenjeni broj tačaka. Redukcija broja tačaka na optimalan nivo nije uzeta u obzir.

Nivo	Rastojanje	Broj tačaka
1	25	164,800,000
2	50	41,200,000
3	100	10,000,000
4	200	2,575,000
5	400	643,750
6	800	160,940

Tabela 5-7 : Broj tačaka pravilnog grida po nivoima; u broju tačaka za neki niži nivo sadržane su i sve tačke iz višeg nivoa (najviši nivo je nivo 6, a najniži nivo 1)

Podrazumeva se da kod izrade modela terena korištenjem tačaka iz nivoa  $n$  treba koristiti i sve tačke iz viših nivoa  $n+1$ ,  $n+2$ , itd., pa zato poslednja kolona sadrži zbir svih tačaka iz posmatranog nivoa i svih tačaka iz viših nivoa. Iz prethodne tabele vidi se da kod kreiranja DMT-a za celokupnu teritoriju SCG treba očekivati TIN sa 165 miliona tačaka ako se koriste sve raspoložive visine i TIN od 160940 tačaka ako se koriste samo tačke iz najvišeg nivoa 6.

Ukupan broj digitalizovanih kota i trigonometara iznosi oko 130 hiljada (Tabela C-2). Ove tačke treba uključiti kod izrade DMT-ova, bez obzira na izabrani nivo.

Znatno veći problem predstavlja raslojavanje strukturnih linija terena i njihova eventualna generalizacija. Generalizacijom linija iz nižih slojeva (nivoa) dobijaju se nove linije koje treba da čine sadržaj viših slojeva. Treba voditi računa da se kod obrade ne dupliraju linije, tj. da se ne uključi i posmatrana linija i jedna ili više njenih generalizovanih verzija. Generalizacija strukturnih i prelomnih linija terena izvodi se tako što se biraju strukturne linije koje su značajne za datu razmeru, pojednostavljuje se njihova geometrija, izmeštaju se, naglašavaju i međusobno kombinuju. Na osnovu generalizovane strukture može se rekonstruisati ciljni DMT. Problem generalizacije strukturnih i prelomnih linija terena prevazilazi okvire ovog rada i on ovde neće biti detaljnije razmatran. U svakom slučaju, ovde treba računati sa značajnim utroškom manuelnog rada na pripremi ovih podataka. Reference za literaturu koja se bavi ovom problematikom, kao i više detalja vezanih za koncept čuvanja i održavanja primarnih podataka, dok se TIN formira po potrebi u on-line režimu može se naći u radu Peng 2004a.

Predloženi koncept čuvanja i održavanja primarnih podataka DMT-a i formiranja DMT-a po potrebi može se sasvim uspešno realizovati korišćenjem *MapSoft*-a i *Surflng*-a. Procenjeni memorijski zahtevi za arhiviranje podataka za celokupnu teritoriju SCG iznose 22Gb ako se ne vrši redukcija tačaka grida od 25m, i 12Gb sa redukcijom suvišnih tačaka grida. Postoje i značajne rezerve i mogućnost da se ovi memorijski zahtevi smanje na ispod 8Gb.

## 5.10 Verifikacija predložene metodologije

Predložena metodologija i razvijeni softverski alati već se intenzivno koriste u Vojnogeografskom institutu na realizaciji projekta formiranja DMT-a na osnovu podataka digitalizacije TK25 podloga. Korišćenjem *DigiScan*-a utvrđene su i otklonjene deformacije skeniranih podloga za sve RO situacije i kolorne karte TK25, a izvršeno je i georeferenciranje ovih podloga. Digitalizovane su i sve izohipse sa RO visinske predstave. Izvršena je kontrola i korekcija spajanja izohipsi na granicama listova karata, kao i generalna obrada prikupljenog vektorskog sadržaja (poglavlje 5.7.4.1). Korišćenjem *MapSoft*-a izvršena je digitalizacija kota i trigonometara za celokupnu teritoriju. Formiran je zaseban *MapSoft* projekat za svako područje koja pokriva jedna topografska karta razmere 1:100000, tj. područje koje pokriva  $4 \times 4 = 16$  listova TK25 (70 projekata, Tabela C-2, poglavlje C.3, dodatak C). Podaci koji se odnose na kote, trigonometre i izohipse učitani su u odgovarajuće projekte. U toku je verifikacija prikupljenih podataka korišćenjem softverskih alata opisanih u poglavlju 4.6 i procedura opisanih u poglavlju 5.7.4.2, kao i vektorizacija hidrografije.

Realizovan je i eksperimentalni projekat izrade DMT-a za test područje Kruševac sa prikupljanjem DMT podataka na digitalnoj fotogrametrijskoj stanici *Image Station SSK*, firme *Z/I Imaging*. Ovo područje pokriva jedna vojnotopografska karta razmere 1:50000, tj.  $2 \times 2 = 4$  TK25 karte. Cilj je bio da se proverí efikasnost prikupljanja DMT podataka kombinacijom softverskih procedura za automatsku ekstrakciju DMT-a i procedura manuelnog merenja po selektivnom samplingu. Pored toga, dobijeni su i podaci za



upoređenje sa podacima prikupljenim sa postojećih TK25 karata. Za realizaciju projekta korišćen je isti fotomaterijal koji se koristi i za ažuriranje postojećih TK25 karata. Reč je o snimcima dobijenim aerofotogrametrijskim snimanjem u razmeri 1:26000. Obradeno je ukupno 44 fotogrametrijska modela. Prosečno vreme po modelu iznosilo je oko 75 minuta. U proseku je bilo potrebno oko 30 minuta za pripremu modela za automatsko merenje DMT-a. Ova priprema obuhvata merenje strukturnih i prelomnih linija i isključivanje područja u kojima softver ne treba da meri visine. Nakon automatskog merenja koje je trajalo u proseku 5 minuta, rađena je kontrola i dopuna merenja. Ova dopuna je iznosila od 20 do 60 minuta u zavisnosti od terena (složenost, izgrađenost i vegetacija), a u proseku oko 40 minuta. Slika E-4 u poglavlju E.2.3 dodatka E sadrži prikaz rezultata obrade. Ne računajući vreme potrebno za snimanje i druge operacije (skeniranje, unutrašnja orijentacija, merenje veznih i orijentacionih tačaka, aerotriangulacija), za merenje DMT-a za područje koje pokriva jedna karta TK25 potrebno je oko 14 časova. Ovo je bilo interesantno, jer pokazuje da je za merenje kompletnog DMT-a za područje države potrebno nešto manje od 1500 radnih dana koristeći samo jedno radno mesto. Iako je izabran prosečan tip terena, ipak se može pretpostaviti da bi to vreme bilo i nešto kraće, jer se u Vojvodini mogu postići značajne uštede, a i samo merenje DMT-a rađeno je detaljnije nego što se to zahteva kod izrade TK25.

Pored ove verifikacije predložene metodologije u realnim, proizvodnim uslovima, izvedeno je i više obimnih eksperimenata da bi se predložena metodologija proverila u smislu funkcionalnosti i očekivanih rezultata. Ideja je bila da eksperimenti posluže u dve svrhe. Prva je da se izvrši ocena kvaliteta konačnog DMT-a koji bi se dobio primenom predložene metodologije (DMT25). To podrazumeva korišćenje podataka digitalizovanih sa TK25 i njihovu obradu korišćenjem razvijenih numeričkih postupaka i softvera. Prema tome, jasno je da će kvalitet tog DMT-a biti uslovljen, kako kvalitetom samih podataka, tako i kvalitetom primenjenih postupaka i softvera za rekonstrukciju površi terena. Na taj način bi se verifikovala i predložena metodologija u smislu očekivanih rezultata. Druga svrha eksperimenata je da se proverii funkcionalnost kompletne metodologije i razvijenih postupaka i softvera, a posebno s obzirom na specifičnosti obrade velike količine podataka.

Ovi eksperimenti su trebali da sumiraju rezultate koji su parcijalno dobijeni kroz prethodno realizovane eksperimente. Reč je o eksperimentima sprovedenim i opisanim u poglavljima 4.7 i 5.3.3.2. U poglavlju 4.7 testirani su numerički postupci i softver za rekonstrukciju površi terena korišćenjem posebno izabраних test područja. Tu je površ terena koja je formirana na osnovu podataka prikupljenih merenjima na digitalnoj fotogrametrijskoj radnoj stanici tretirana kao apsolutno tačna površ. Upoređenjem sa rekonstruisanim visinama dobijene su istinite vrednosti grešaka preko kojih je bilo moguće oceniti kvalitet postupaka za rekonstrukciju površi terena. U poglavlju 5.3.3.2 korišćene su visine tačaka digitalizovanih sa TK25. Te visine uključuju i greške primarnog i sekundarnog prikupljanja podataka, tako da je cilj upoređenje ovih visina sa visinama interpolovanim iz DMT-ova veće tačnosti bio da se dobije ocena tačnosti visina sa TK25. Međutim, na taj način ne može se oceniti kvalitet DMT-a koji bi se dobio na osnovu podataka digitalizovanih sa TK25. Ovaj kvalitet je uslovljen kvalitetom podataka u širem smislu (tačnost visina, ali i raspored, gustina i vrsta podataka), kao i kvalitetom metode interpolacije, tj. postupaka za rekonstrukciju površi terena.

Ideja na kojoj su zasnovani eksperimenti predviđeni za verifikaciju predložene metodologije je da se izvrši upoređenje visina dobijenih interpolacijom iz DMT25 i tačnijih visina dobijenih iz drugih izvora. Na taj način, dobija se zbirna ocena kvaliteta podataka i kvaliteta postupaka i softvera za rekonstrukciju površi terena. Dodatna prednost kod ovih eksperimenata je što se ovde ne uvode i greške modeliranja površi terena kod kontrolnih podataka, kao što je to slučaj sa eksperimentima prikazanim u poglavlju 5.3.3.2. Izuzetak je jedino test područje Beograd 2003, gde su na pogodno izabranim kontrolnim tačkama upoređivane visine interpolovane iz DMT25 sa visinama interpolovanim iz DMT5.

Druga prednost ovih eksperimenata je u tome što je bilo moguće uključivanje i drugih kontrolnih podataka kao što su tačke poligonskih mreža. S obzirom da je za svako test područje formiran DMT25, bilo je moguće izvršiti upoređenje poznatih visina poligonskih tačaka sa visinama interpolovanim iz tako formiranih DMT-ova. Ovo su ujedno i najtačniji podaci za kontrolu, pa je i ocena kvaliteta DMT25 dobijena na ovaj način znatno objektivnija i pouzdanija.

Rezultati eksperimenta prikazani su u dodatku E. Metodologija, postupci i softverski alati koji su korišćeni za realizaciju eksperimenta praktično su identični onim koji su korišćeni za eksperimente prikazane u poglavlju 5.3.3.2. Korišćen je i isti način prezentacije rezultata:

- preko detaljnih izveštaja (Izveštaj E-1 do Izveštaj E-33);
- grafički - sa vrednostima razlika visina u vidu simbola (krug) različite boje i veličine (Slika E-3, Slika E-5, Slika E-7, Slika E-9, Slika E-11, Slika E-12 do Slika E-19);

- tabelarno - preko izabranih statističkih pokazatelja dobijenih obradom rezultata upoređenja visina za različite vrste kontrolnih podataka i test područja (Tabela E-1, Tabela E-4, Tabela E-5, Tabela E-6 i Tabela E-16 do Tabela E-18);
- tabelarno - preko sažetog prikaza raspodele srednjih kvadratnih grešaka i standardnih devijacija prema nagibima terena (po test područjima i izbirno, Tabela E-7 do Tabela E-15).

Za veći deo izabranih test područja dat je i prikaz rezultata ekstrakcije strukturnih linija terena (Slika E-2 a, Slika E-3 c, Slika E-6 a i c, Slika E-8 a i c, Slika E-10 a, Slika E-11 a, Slika E-12 a). Dodatno je izvršeno i upoređenje visina poligonskih tačaka sa visinama interpolovanih iz DMT5 modela formiranih za potrebe realizacije eksperimenta opisanih u poglavlju 5.3.3.2. Cilj je bio da se dođe do ocene tačnosti ovih modela. Na taj način, rezultati dobijeni u poglavlju 5.3.3.2 mogu se bolje tumačiti i analizirati.

S obzirom na to da se radi o istom pristupu i alatima, ovde se metodologija realizacije eksperimenata i način predstavljanja rezultata neće detaljno opisivati, jer je to već dato u poglavlju 5.3.3.2. Biće samo ukazano na neke specifičnosti koje su vezane za realizaciju ovih eksperimenata. Naravno, podrazumeva se da će se dati odgovarajuća analiza rezultata i zaključci koji se na osnovu nje mogu usvojiti.

Za svako test područje urađeno je formiranje više varijanti DMT25 korišćenjem različitih parametara procesiranja. Cilj je bio da se proverí uticaj koji imaju izabrani parametri na kvalitet DMT-a. Prikaz korišćenih oznaka za ove parametre dat je na početku dodatka E, strana E-1. Kao i u eksperimentima opisanim u poglavlju 5.3.3.2, upoređenje visina je rađeno odvojeno za različite kategorije kontrolnih visina:

- visine visinskih tačaka;
- visine tačaka visinskih linija (strukturne i prelomne linije terena);
- visine tačaka izohipsi;
- visine tačaka poligonske mreže (PM).

Visine za prve tri kategorije su dalje klasirane prema tome da li dolaze iz projekata ortofotoprodukcije u razmeri 1:5000 (DOF5), projekata izrade digitalne topografske karte razmere 1:5000 (DTK5) ili su dobijeni digitalizacijom sa ODK5.

Detaljni izveštaji su dati samo za izabrana upoređenja visina. Sažeti rezultati za ova upoređenja obeleženi su narandžastom bojom (Tabela E-1).

Za realizaciju eksperimenata korišćeni su isti podaci i test područja kao i za eksperimente izvedene u poglavlju 5.3.3.2 (Slika C-2, poglavlje C.4, dodatak C). Dodatni podaci koji su korišćeni odnose se na:

- tačke poligonskih mreža grada Beograda i Kruševca;
- test područje Beograd 2003 (podaci iz više projekata ortofotoprodukcije).

Prikaz rasporeda korišćenih tačaka poligonskih mreža grada Beograda, kao i vremenskog perioda u kome su one određene dat je u poglavlju E.1, dodatka E (Slika E-1). Kontrolne visine koje se odnose na test područje Beograd 2003 prikupljene su za potrebe realizacije više projekata ortofotoprodukcije u razmeri 1:5000 (DOF5). Ovi projekti pokrivaju šire područje grada Beograda i područje opština Smederevo, Pančevo, Lazarevac i Lajkovac (Slika C-2, poglavlje C.4, dodatak C).

Treba istaći da se radi o izuzetno velikoj količini podataka. Površina test područja Beograd 2003 iznosi preko 6000km<sup>2</sup>, dok površina svih ostalih test područja iznosi oko 3300km<sup>2</sup>. Za formiranje DMT25 koji se odnosi na test područje Beograd 2003 korišćeno je preko 6 miliona visina tačaka izohipsi, kota i trigonometara sa TK25, dok za sve ostale projekte broj tih visina iznosi preko 1.8 miliona. Formiranje DMT5 test područja Beograd 2003 urađeno je na osnovu 7.3 miliona visina tačaka i 300 hiljada tačaka strukturnih linija. Na ovaj način izvršena je i temeljna verifikacija razvijenih postupaka i softvera u smislu rukovanja i obrade velikom količinom visinskih informacija.

Upoređenje visina je izvršeno na osnovu izuzetno velikog broja kontrolnih visina koji iznosi preko 4.5 miliona (Tabela 5-8). Ovako veliki broj visina garancija je da su sasvim sigurno obuhvaćene sve moguće greške i nedostaci DMT-ova formiranih po predloženoj metodologiji. Istovremeno, ovo je znatno otežalo procedure za pojedinačnu eliminaciju grubih grešaka i eventualnu kategorizaciju grešaka i po drugim kriterijumima, pored kategorizacije koja je urađena s obzirom na različite nagibe terena. Naime, sasvim je izvesno da u tolikoj količini podataka ima i onih koji se odnose na delove terena na kojima je došlo do velikih promena. Sem za slučaj test područja Beograd 2003, zajedno su obrađivani podaci koji se odnose na različite delove terena (izgrađen, pod šumom, čist) što otežava donošenje zaključaka u



smislu ocene uticaja pojedinih izvora grešaka. U svakom slučaju, na kraju se ipak dobija jedna zbirna ocena kvaliteta konačnog DMT-a što je možda i najvažnije.

Tip kontrolne visine	Broj visina	Test područje
Visinska tačka iz DOF5	897191	Kruševac, Novi Pazar, Valjevo 1 i 2, Pančevo, Čačak, Barajevo, Lazarevac, Sopot i Vrčin
Tačka strukturne ili prelomne linije terena	117538	Kruševac, Novi Pazar, Valjevo 1 i 2, Pančevo i Čačak
Tačka izohipse sa ODK5	1806266	Barajevo, Lazarevac, Sopot, Vrčin i Pančevo
Visinska tačaka iz DTK5 projekta	167558	Beograd DTK5 (centar i Borča, Kumodraž, Zemun, Ostružnica)
Visinska tačka premera 1:1000	1540445	Kragujevac
Tačka poligonske mreže	9143	Barajevo, Lazarevac, Sopot, Vrčin i Kruševac
Tačka poligonske mreže	29143	Beograd DTK5 (centar i Borča, Kumodraž, Zemun, Ostružnica)
Kota, trigonometar ili kontrolna tačka	18971	Beograd 2003
<b>Ukupno:</b>	<b>4586255</b>	

Tabela 5-8 : Prikaz broja kontrolnih visina

Kao i kod analize koja je sprovedena u poglavlju 5.3.3.2, ovde se neće analizirati pojedinačni rezultati dobijeni za svako pojedinačno test područje, jer su svi detalji vezani za realizovane eksperimente pregledno dati u dodatku E. Daće se samo generalni zaključci:

- algoritam za detekciju i ekstrakciju strukturnih linija korišćenjem Voronoi dijagrama i principa skeleta i kore (VS) pokazao se definitivno kao najkvalitetniji; u kombinaciji sa algoritmom za forsiranje zaravnjenosti na mestima gde se kubna Bézier-ova zakrpa i površ trougaone facete razlikuju za više od 1 do 5m (parametar *RTSDV*) i eliminacijom detektovanih strukturnih linija na mestima gde je ta razlika veća od 10m (parametar *MaxSDV*) dobijaju se natačniji i najpouzdaniji rezultati; ovo definitivno korisniku olakšava izbor optimalnih parametara obrade, jer se praktično isti parametri, sa par izuzetaka, mogu koristiti za sve projekte;
- korišćenje kubne interpolacije sa detekcijom i ugradnjom strukturnih linija terena umesto linearne interpolacije smanjuje iznos srednjih kvadratnih grešaka i do 10% , tj. za oko 0.5m (Valjevo 1, Valjevo 2, Tabela E-1); međutim, mnogo je značajnije to što se korišćenjem kubne interpolacije bez detekcije i ugradnje strukturnih linija javljaju vrlo velika odstupanja za većinu projekata; razlike u srednjim greškama idu i do 20%; primeri su upoređenja visina tačaka poligonske mreže za Barajevo, Lazarevac i Kruševac, upoređenje visina za visinske tačke DOF5 za Lazarevac, Sopot i druga upoređenja (Tabela E-1);
- nakon otkrivanja i ugradnje strukturnih linija terena u DMT, kubna i linearna interpolacija daju vrlo slične rezultate; ovo je potvrda rezultata dobijenih u prethodnim eksperimentima (poglavlje 4.7);
- kao što su to pokazali i prethodni eksperimenti, otkrivanje strukturnih linija i njihova ugradnja u DMT zahteva dosta procesorskog vremena; za slučaj kada se obrađuju podaci koji se odnose na više listova TK25 (4 i više listova, sa više stotina hiljada tačaka) proračun može da potraje i više minuta, a u nekim slučajevima proračun se ne završava uspešno (najčešće posledica grešaka u podacima); ovi problemi mogu se rešiti povećanjem tačnosti proračuna uvođenjem "egzaktne aritmetike" i optimizacijom algoritama, naročito onih koji rade po sekvencijalnom principu; poslednja konstatacija naročito se odnosi na algoritam profinjavanja TIN-a, koji neopravdano troši znatan procenat ukupnog vremena potrebnog za formiranje TIN-a;
- za neka test područja dobijene su velike razlike visina na pojedinim delovima terena (Kruševac, Slika E-5, Novi Pazar, Slika E-7, Čačak Slika E-9); mogući uzrok za ove razlike mogu biti greške merenja u područjima obraslim gustom i visokom šumom;
- upoređenjem visina za test područje Beograd DTK5 (centar, Borča, Kumodraž, Zemun i Ostružnica) koje karakteriše vrlo kvalitetan DMT5 iz DTK5 projekta došlo se do par vrlo korisnih

zaključaka; primećeno je izuzetno dobro slaganje DMT25 i DMT5; srednje kvadratne greške kreću se u intervalu od 1.5 do 2.1m (Tabela E-4); izuzetak je jedino test područje Kumodraž gde ova greška iznosi 2.9m; ovo je posledica očiglednih promena na terenu (područje Rakovice, Slika E-15); nakon eliminacije grubih grešaka, vrednost srednje kvadratne greške i za ovo područje iznosi oko 2m; maksimalne vrednosti odstupanja kreću se od 10 do 20m; veliki broj ovih grešaka je posledica različite prirode ovih DMT5 i DMT25; razlike se javljaju uglavnom na obalama reka, duž kanala i saobraćajnica (Slika E-13 do Slika E-15); ovo je potvrđeno i upoređenjem visina interpolovanih iz ovih DMT-ova sa visinama tačaka poligonskih mreža (Slika E-16 do Slika E-18, Slika E-19); upoređenje visina interpolovanih iz DMT25 i visina tačaka poligonskih mreža (Tabela E-5) pokazalo je da se tačnost DMT25 kreće u intervalu od 1.2m (Kruševac) pa do 2.7m (Vrčin) što su izuzetno dobre vrednosti.

- otkriven je značajan broj grubih grešaka u visinama poligonskih tačaka – najčešće je to posledica zamene cifara 1 i 4, 8 i 3, 9 i 5, 1 i 7 i sl; ovo pokazuje da je korišćenje razvijenih alata za upoređenje visinskih podataka koji dolaze iz različitih izvora efikasno i korisno za otkrivanje grubih grešaka; ostaje otvoreno pitanje koliko je ovih grešaka manjeg iznosa i dalje ostalo neotkriveno;
- značajan deo visina poligonskih tačaka Barajevo, Sopot, Vrčin i Kumodraž očigledno se odnosi na ukopane belege; to se može zaključiti na osnovu prosečne greške dobijene iz upoređenja ovih visina sa visinama interpolovanim iz DMT5 i DMT25; ova greška je po pravilu pozitivna i iznosi oko 0.3m (Tabela E-5 i Tabela E-6);
- upoređenjem visina interpolovanih iz DMT5 (ODK5 i DTK5 projekti) i visina tačaka poligonskih mreža dobija se da se srednja kvadratna greška visina (RMSE) kreće u rasponu 1.0 – 1.2m (Tabela E-6); izuzetak su test područje Vrčin gde ova vrednost iznosi 1.8m i Kruševac sa 1.6m; kada je reč o Kruševcu ovo je rezultat očiglednog sistematskog uticaja, jer prosečna greška iznosi oko -1.0m; objašnjenje može biti to što je DMT5 za područje Kruševca rađen na osnovu aerofotogrametrijskog snimanja u razmeri 1:26000 i da su za orijentaciju korišćene raskrsnice i slični detalji koje karakteriše velika greška identifikacije;
- sažeti prikaz rezultata upoređenja visina sa raspodelom prema nagibu terena koji je predstavljen tabelama u poglavlju E.6 dodatka E omogućio je donošenje sledećih zaključaka:
  - prosečna tačnost DMT5 dobijenog iz DOF5 projekata kreće se u rasponu od 1.3m do 2.1m; rezultati su donekle opterećeni očiglednim sistematskim greškama za test područje Kruševac (Tabela 2-1);
  - prosečna tačnost DMT5 dobijenog iz DTK5 projekata kreće se u rasponu od 1.0m do 2.2m (Tabela E-8);
  - greške dobijene iz upoređenja visina interpolovanih iz DMT25 i visina iz DOF5 projekata pokazuju ujednačen trend porasta ovih grešaka s obzirom na nagib terena; greške se kreću u intervalu od 2.1 do 9.1m; podaci po projektima su relativno neujednačenog kvaliteta (Tabela E-9 i Tabela E-10);
  - slaganje visina dobijenih digitalizacijom izohipsi sa ODK5 karata i visina interpolovanih iz DMT25 je bolje nego visina iz DOF5 i DMT25; ovo se posebno odnosi na strmije delove terena; ove greške kreću se u rasponu od 2.3 do 6.8m (Tabela E-11);
  - greške dobijene iz upoređenja visina interpolovanih iz DMT25 i visina iz DTK5 projekata pokazuju ujednačen trend porasta ovih grešaka s obzirom na nagib terena; greške se kreću u intervalu od 1.6 do 4.2m, s tim da se podaci odnose na umereno jednostavan teren bez velikih nagiba (35° maksimalno, uglavnom do 15°, Tabela E-12);
  - greške dobijene iz upoređenja visina interpolovanih iz DMT25 i visina iz topografskog premera razmere 1:1000 Kragujevca pokazuju ujednačen trend porasta ovih grešaka s obzirom na nagib terena; greške se kreću u intervalu od 1.6 do 5.4m, s tim da se podaci odnose na umereno jednostavan teren bez velikih nagiba (40° maksimalno, uglavnom do 20°, Tabela E-13);
  - prosečne srednje kvadratne greške DMT25 dobijene iz upoređenja sa visinama tačaka poligonske mreže za test područja Barajevo, Lazarevac, Sopot, Vrčin i Kruševac pokazuju ujednačen trend porasta s obzirom na nagib terena; greške se kreću u intervalu od 1.6 do 3.8m i odnose se na teren sa nagibima do 20° (Tabela E-14);
  - prosečne srednje kvadratne greške DMT25 dobijene iz upoređenja sa visinama tačaka poligonske mreže za test područja koja pripadaju projektima DTK5 produkcije (test



područja Beograd centar, Borča, Kumodraž, Zemun i Ostružnica) pokazuju ujednačen trend porasta s obzirom na nagib terena; greške se kreću u intervalu od 2.0 do 4.7m i odnose se na teren sa nagibima do 25° (Tabela E-15);

- iz upoređenja velikog broja visina za test područje Beograd 2003 (šire područje grada Beograda, i područja opština Smederevo, Pančevo, Lazarevac i Lajkovac) dobijene su prosečne srednje kvadratne greške od 1.5m, 1.8m i 2.0m za trigonometre, kote i izabrane kontrolne tačke (Tabela E-16 do Tabela E-18); srednje kvadratne greške za različite nagibe terena pokazuju ujednačen porast; one iznose:
  - 1.2 do 1.9m za čist teren, do 20° nagiba;
  - 1.6 do 2.1m za izgrađen teren, do 20° nagiba;
  - 1.9 do 4.0m za teren pod šumom, do 20° nagiba;
  - za terene pod šumom i sa nagibom preko 20° srednja kvadratna greška iznosi 6.2m;
- pojava velikih odstupanja koja su očigledno rezultat grubih grešaka u prikupljanju podataka ili rezultat promena na terenu ukazuje na neophodnost verifikacije podataka dobijenih iz podataka digitalizacije postojećih TK25 podloga.

Treba naglasiti da su dobijene veće vrednosti srednjih kvadratnih grešaka na osnovu upoređenja visina digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DTM5 dobijenih iz DOF5 projekata (Tabela C-4), nego odgovarajućih vrednosti sračunatih iz upoređenja visina interpolovanih iz DTM25 i visina prikupljenih u okviru DOF5 projekata za ista test područja (Tabela E-9). Ove vrednosti iznose 4.3m za prvo i 3.1m za drugo upoređenje. Ovo je neočekivano, jer bi bilo logično pretpostaviti da je greška modeliranja površi terena na osnovu izohipsi sa ekvidistancijom od 10m veća od odgovarajuće greške modeliranja terena na osnovu podataka iz fotogrametrijskih merenja snimaka razmere 1:14500. Ova pretpostavka je posebno opravdana ako se zna da su fotogrametrijska merenja rađena po selektivnom i sistematskom samplingu sa merenjem svih karakterističnih tačaka i strukturnih i prelomnih linija terena. Objašnjenje može biti u tome da su ove razlike posledica neslaganja visina na objektima koji ne leže u ravni terena (mostovi, nadvožnjaci, kanali i sl.). Ovi objekti su prisutni u modelu DTM5, ali ne i u podacima TK25 i modelu DTM25. Ovo delimično potvrđuju i rezultati koji su dobijeni upoređenjem visina tačaka strukturnih i prelomnih linija iz DOF5 projekata sa visinama interpolovanim iz DMT25 (Tabela E-10). Dobijena je prosečna srednja kvadratna greška od 4.6m, što je znatno više od 3.1m, koliko je dobijeno iz upoređenja visina za visinske tačke iz DOF5.

Za kraj ove analize treba konstatovati da su dobijeni rezultati u granicama očekivanja. Ako se pretpostavi da su visine poligonskih tačaka najmerodavnije, može se zaključiti da **tačnost DMT25 modela za umerene terene u proseku iznosi od 1.8m do 4.3m, za terene nagiba do 5° i terene nagiba do 25°, respektivno**. Ovo se dosta dobro slaže sa vrednostima koje su dobijene upoređenjem sa visinama pojedinačnih tačaka izmerenim u okviru premera 1:1000 (**1.6 i 3.5m**). Slična je situacija i sa vrednostima dobijenim iz upoređenja DTM25 visina i visina tačaka iz DTK5 projekata (**1.6 i 4.2m**). Ako se ove vrednosti uporede sa vrednostima koje su dobijene iz proračuna očekivane tačnosti (Tabela 5-4) koje iznose 1.5 i 4.5m, vidi se da je postignuta sasvim zadovoljavajuća tačnost, čak i ako se zanemari greška rekonstrukcije površi na osnovu izohipsi. Ova greška rekonstrukcije bi mogla da ima vrednost od 0.7-1.0m (Tabela B-4 i Tabela B-16), s tim da je za pomenute projekte ona verovatno nešto niža, jer se radi o pretežno ravnim terenima. I vrednosti koje su dobijene na osnovu ostalih projekata ukazuju na to da **maksimalna vrednost srednje kvadratne greške DMT25 koja se može očekivati ne bi smela da prelazi vrednost od 9m, s tim da je ona u proseku oko 2-3m. Ove vrednosti su verovatno i bolje, posebno ako se uzme u obzir da one uključuju i greške koje su prisutne u kontrolnim podacima i koje sigurno nisu zanemarljive**. Analiza je pokazala da postoji velika verovatnoća da je tačnost kontrolnih visina dobijenih iz DOF5 i ODK5 projekata nešto niža, posebno u planinskim i šumskim područjima. Zbog toga vrednosti dobijene iz upoređenja sa ovim podacima treba više posmatrati kao kontrolu slaganja TK25 podataka sa podacima iz drugih izvora, nego kao njegovu stvarnu ocenu tačnosti.

Ako se vrednosti koje su dobijene za ocenu tačnosti DMT-a formiranog na osnovu podataka digitalizacije postojećih TK25 podloga uporede sa vrednostima koje se mogu očekivati primenom nekih drugih metoda za ekonomično formiranje nacionalnog DMT-a (ERS 1/2 ili SRTM misija), vidi se da je ovakav pristup u potpunosti opravdan. Potvrđen je i visok kvalitet razvijenih postupaka i softvera za podršku primeni predložene metodologije za formiranje nacionalnog DMT-a.

## 5.11 Zaključna razmatranja

U okviru ovog poglavlja razmatrana je metodologija formiranja nacionalnog DMT-a. Pošlo se od pretpostavke da se to može uspešno izvesti korišćenjem podataka sa postojećih podloga.

Proračun visinske tačnosti podataka sa TK25 pokazao je da treba očekivati da srednja kvadratna greška digitalizovanih visina bude u rasponu od 1.5m za ravničarske terene, pa do 8.3m za terene nagiba od 45°. Eksperimentalna ocena tačnosti sa korišćenjem velike količine prikupljenih podataka ovo je i potvrdila. Na osnovu pouzdanih kontrolnih visina (poligonska mreža, topografski premer 1:1000 i digitalno kartiranje razmere 1:5000) dobijene su vrednosti od 1.6 do 6.1m za terene nagiba do 40° i bez visokih i gustih šuma.

Analiza svetskih iskustava pokazala je da su pojedine države pokrenule velike projekte izrade nacionalnih DMT baza podataka tako što se podaci prikupljaju aero snimanjem sa primenom InSAR i LiDAR-a tehnologija. Realizovani su, ili u toku, slični projekti sa korišćenjem podataka dobijenih u okviru satelitskih misija. Zaključeno je da prvi pristup nije realan kada je reč o primenama kod nas. Pored toga, potvrđena je pretpostavka da su podaci sa TK25 podloga kvalitetniji od odgovarajućih podataka iz satelitskih misija. Stoga je predložena metodologija koja se zasniva na digitalizaciji podataka visinske predstave terena sa postojećih TK25 podloga.

Predložena metodologija detaljno je opisana kroz prikaz odgovarajućih procedura i tehnoloških postupaka. Ukazano je na posebno osetljiva mesta u tehnološkom lancu prikupljanja, obrade i verifikacije podataka. Jedno od takvih mesta je otklanjanje deformacija i georeferenciranje TK25 podloga. Problem se odnosi na rad sa RO visinske predstave i hidrografije. Za ove podloge ne postoji dovoljan broj referentnih tačaka za utvrđivanje i otklanjanje deformacija i za pouzdano georeferenciranje podloga. Procenjeno je da uticaj ovih grešaka na modeliranje terena iznosi od 0.5m u ravnim terenima, do 5.2m za terene nagiba od 45°. Ovo svakako nije zanemarljivo ako se uzme u obzir da korespondentne greške primarnog prikupljanja iznose 1.5 i 6.5m. Predložena su i odgovarajuća rešenja koja se svode na korišćenje skeniranih kolornih TK25 karata za "navlačenje" skeniranog (eventualno vektorskog) sadržaja sa RO hidrografije i visinske predstave.

Razmatrana su moguća softverska rešenja za podršku predloženoj metodologiji. Procenjeno je da numerički postupci i softverski alati koji su razvijeni u okviru ovog istraživanja mogu imati značajnu ulogu u realizaciji postupaka predviđenih predloženom metodologijom.

Detaljno su opisane procedure za digitalizaciju (vektorizaciju) sadržaja sa TK25 koji je relevantan za formiranje nacionalnog DMT-a, kao i procedure za primarnu obradu i verifikaciju prikupljenog sadržaja. S obzirom na tehnologiju korišćenu za prvobitno kartiranje visinske predstave TK25 (analogna fotogrametrijska restitucija, rešavanje orijentacije modela bez aerotriangulacije bloka, itd.), probleme vezane za utvrđivanje i otklanjanje deformacija i georeferenciranje podloga, ažurnost visinske predstave na TK25 (uglavnom se odnosi na stanje do 1965. godine), tačnost visinske predstave terena u područjima obraslim gustom i visokom šumom, itd. jasno je da problem primarne obrade i verifikacije podataka ima izuzetan značaj i da određuje dalju sudbinu DMT-a formiranog po predloženoj metodologiji. Zato je u okviru ovog poglavlja najveća pažnja posvećena upravo procedurama i alatima za verifikaciju i podizanje kvaliteta podataka na osnovu kojih će biti formiran taj DMT. Ova razmatranja u velikoj meri se oslanjaju na prethodno izloženu materiju. Reč je prikazu razvoja postupaka za verifikaciju DMT podataka (poglavlje 4.6) i analizi softverskih alata koji se ovde mogu primeniti (poglavlje 5.6).

Problem organizovanja podataka u formi DMT baze podataka nije trivijalan, ali može se relativno jednostavno rešiti interpolacijom grid DMT-a dovoljne gustine i formiranjem datoteka u standardnim rasterskim formatima (GeoTIFF, PNG i drugi). S obzirom na stepen razvoja današnjeg hardvera i softvera, obrada i rukovanje rasterskim datotekama sa nekoliko stotina miliona i više piksela nisu nikakav problem. Preporučuje se da to bude DEM sa rezolucijom od 25m. Za obradu ovih datoteka mogu se koristiti brojni softverski alati za GIS i digitalnu obradu slika. Korišćenje ovih datoteka je i najjednostavniji i najefikasniji način za distribuciju podataka nacionalnog DMT-a do krajnjih korisnika. Naravno, potrebno je razraditi detalje kao što su: dimenzije i broj datoteka, formati zapisa, koordinatni sistem i slično, ali je procena da to može jednostavno da se uradi i neposredno pre nego što se pristupi samoj realizaciji tog posla.

Predloženo je da se arhiviraju i održavaju primarni podaci DMT25. Ovakav pristup je posebno opravdan s obzirom na to da u početnom periodu eksploatacije treba očekivati i realizaciju procedura za postepeno podizanje kvaliteta ovih podataka. Ove procedure najlakše se mogu realizovati ako se radi sa primarnim podacima DMT-a. Procenjuje se da bi u cilju efikasne manipulacije podacima DMT-a trebalo preći sa podataka u formi izohipsi na podatke u formi rasutih tačaka, sa manje ili više pravilnom



strukturuom. Formiranje i održavanje ovakve baze podataka može se uspešno realizovati korišćenjem postojećih softverskih alata i uz minimalan dodatni razvoj.

Na prvi pogled može izgledati da je u ovom poglavlju mnogo više pažnje posvećeno problemu prikupljanja, obrade i verifikacije DMT podataka sa TK25 podloga, nego samom problemu formiranja nacionalnog DMT-a u smislu organizovanja podataka u odgovarajuću bazu pogodnu za eksploataciju i održavanje podataka. Ovo je sasvim razumljivo ako se ima u vidu značaj prikupljanja i primarne obrade i verifikacije prikupljenih podataka. Stav autora je da to i jeste ključni momenat kod formiranja nacionalnog DMT-a.

Kroz eksperimentalnu verifikaciju podataka prikupljenih sa TK25 podloga, kao i verifikaciju celokupne predložene metodologije potvrđene su prethodne konstatacije u smislu značaja obrade i verifikacije podataka. Sve analize rezultata potvrdile su prisustvo značajnog broja grubih grešaka u podacima, bilo da su one posledica primarnog ili sekundarnog prikupljanja podataka, ili da su posledica promena koje su u međuvremenu nastale na terenu. Ovo je posebno važno ako se ima u vidu generalni kvalitet podataka visinske predstave na TK25 podlogama koji je nesumnjivo potvrđen kroz niz eksperimenata. Očekivana tačnost finalnog DMT-a kreće se u rasponu od 1.6 do 9m, s tim da se maksimalne greške očekuju samo za terene obrasle gustom i visokom šumom, kao i za izuzetno strme planinske terene.

## 6 ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

U okviru ovog istraživanja koncipirana je metodologija i razrađeni su tehnološki postupci kojima se na jedan optimalan način može realizovati DMT za teritoriju države. Za potrebe razvoja analizirane su sve savremene metode i tehnike rada za masovno prikupljanje DMT podataka. Dat je prikaz tehnologije i trenutne mogućnosti u pogledu kvaliteta prikupljenih podataka, efikasnosti i ekonomičnosti. Izvršena je i detaljna analiza najnovijih tehnika i numeričkih postupaka za rekonstrukciju površi terena na osnovu prikupljenih podataka. Posebno su obrađeni postupci za korišćenje podataka koji se u najvećem delu sastoje od izohipsi.

Razvijeni su složeni numerički postupci i originalna softverska rešenja za podršku predloženoj metodologiji. Istovremeno, realizacijom obimnih eksperimenata ta rešenja su verifikovana i uočena su slaba mesta na kojima treba dalje raditi. Obradom velike količine realnih podataka došlo se do objektivne ocene kvaliteta DMT-a koji se može dobiti primenom predložene metodologije. Korišćeni su podaci dobijeni digitalizacijom postojećih topografskih karata razmere 1:25000, a obrada je u celosti izvedena korišćenjem razvijenih numeričkih postupaka i softvera. Na taj način, izvršena je i vrlo detaljna provera razvijenih rešenja.

U poglavlju 4.7 izloženi su vrlo važni zaključci koji se doneti na osnovu rezultata eksperimentalne verifikacije razvijenih numeričkih postupaka za rekonstrukciju površi terena na osnovu izohipsi. Dati su i zaključci vezani za primenljivost standardnih metoda interpolacije za ove namene. U poglavljima 5.3.3.2 i 5.10 dati su vrlo značajni zaključci koji se odnose na kvalitet DMT podataka, ne samo onih raspoloživih na topografskoj karti 1:25000, nego i podataka na Osnovnoj državnoj karti i podataka koji su prikupljeni u okviru projekata ortofotprodukcije i digitalnog kartiranja. Zaključci koji su dati na kraju svakog od pomenutih poglavlja po svome značaju svakako zaslužuju da budu deo ovih zaključnih razmatranja. Oni se ovde ne navode da bi se izbeglo nepotrebno ponavljanje.

U ovom poglavlju data su generalna zapažanja i zaključci vezani za rezultate ostvarene kroz razvoj i primenu numeričkih postupaka i softvera. Data su i zapažanja koja se odnose na razvoj i implementaciju metodologije i tehnoloških postupaka za formiranje nacionalnog DMT-a i njegov kvalitet. Veći deo ove materije izložen je i u poglavljima 4.8 i 5.11.

Istraživanje je rezultiralo i nizom otvorenih pitanja na koje tek treba dati odgovore. Ostvareni rezultati predstavljaju solidnu osnovu za dalja istraživanja u ovoj oblasti.

### 6.1 Razvoj numeričkih postupaka i softvera

Realizacijom obimnih eksperimenata i brojnim praktičnim primenama softvera razvijenog u okviru ovog istraživanja pokazano je da se korišćenjem TIN DMT-a i odgovarajućih numeričkih postupaka može realizovati softversko rešenje koje je univerzalno s obzirom na poreklo i format ulaznih podataka. Istovremeno, može se postići da se isti softverski alati koriste i za efikasnu on-line verifikaciju podataka u fazi prikupljanja i primarne obrade, ali i za kvalitetnu rekonstrukciju površi terena, tj. formiranje DMT-a na osnovu tih podataka.

Kroz istraživanje je potvrđen izuzetan značaj koji proračun normala ima za korektnu rekonstrukciju površi terena. Ako se zanemare manji problemi koji se odnose na slučajne greške u podacima, može se reći da su numerički postupci koji su razvijeni i implementirani u okviru softvera *Surfling* sasvim zadovoljavajući. Eksperimentalnom proverom razvijenih numeričkih postupaka i softvera utvrđeno je da se korišćenjem TIN-a i Bézier-ovih trougaonih zakrpa, uz postupke kvalitetnog proračuna normala na



površ terena i postupke detekcije i ugradnje strukturnih linija terena, može i na osnovu izohipsi obezbediti visok kvalitet rekonstruisane površi terena. Dobijeni rezultati ukazuju da se na ovaj način postižu, bar kada je u pitanju tačnost visina iz DMT-a, bolji rezultati nego oni dobijeni sa standardnim metodama interpolacije implementiranim u okviru komercijalnih softverskih paketa. Ova konstatacija posebno se odnosi na mesta gde se javljaju strukturne linije i lokalni ekstremumi površi terena. Potvrđena je velika fleksibilnost TIN modela podataka za lokalnu analizu površi i efikasno rešavanje potencijalnih problema. Za razliku od većine drugih metoda omogućeno je jednostavno korišćenje svih vrsta ulaznih podataka (tačke, linije, površine), ali i jednostavna modifikacija algoritama za specijalne slučajeve.

Kod eksperimenata sprovedenih sa ciljem testiranja pojedinih metoda za rekonstrukciju površi terena dobijeni su interesantni rezultati. Utvrđeno je da su najkritičnija mesta za rekonstrukciju površi terena na osnovu izohipsi velike doline koje su oivičene strmim padinama. Na ovim mestima horizontalno rastojanje na karti između izohipsi znatno je veće nego u planinskim područjima, pa to u kombinaciji sa velikim nagibima terena na ivicama doline često dovodi do pogrešnih rezultata. Ovaj problem je primećen praktično kod svih testiranih metoda, a naročito je izražen kod metoda sa splajn funkcijama (splajn sa tenzijom, regularizovani splajn, Bézier-ove trougaone zakrpe, i dr.).

Za rešenje ovog problema kod postupaka modeliranja terena primenom TIN-a i Bézier-ovih trougaonih zakrpa razvijeno je i implementirano posebno rešenje. Ono se zasniva na ograničavanju primene Bézier-ovih trougaonih zakrpa samo na mesta gde ove površinske zakrpe odstupaju od trougaonih faceta TIN-a za iznos koji je manji od zadate vrednosti. Preporučuje se zadavanje vrednosti od jedne ekvidistancije. Na taj način, modeliranjem Bézier-ovim trougaonim zakrpama postiže se verna rekonstrukcija terena u delovima gde se javljaju posebne morfološke forme terena, dok se u delovima sa nedovoljnom gustinom podataka površ restriktivno modelira trougaonim facetama. Ovaj pristup treba kombinovati sa razvijenim funkcijama za verifikaciju podataka koje omogućavaju efikasno i pouzdano otkrivanje ovakvih slabih mesta sa nedovoljnom količinom podataka. Za takva mesta preporučuje se dodavanje novih visinskih podataka, ili opciono, da softver automatski ubaci nove tačke u model površi i tako spreči pojavu neželjenih oscilacija površi. U svakom slučaju, praktično se eliminiše mogućnost pojave velikih grešaka kod rekonstrukcije površi terena, što je i potvrđeno brojnim eksperimentima sa simuliranim i realnim podacima.

Razvijeni numerički postupci i softverski alati korišćeni su za obradu izuzetne količine visinskih podataka. Formirani su modeli i od nekoliko miliona visina. Nisu uočeni ozbiljniji problemi u obradi ovako velike količine podataka. Istovremeno, predloženi koncept čuvanja prikupljenih podataka u okviru relacionih baza podataka i formiranje DMT-a za manje celine i po potrebi, praktično eliminiše ograničenja u pogledu količine podataka koji se mogu obrađivati. Svi razvijeni alati integrisani su u okruženje *MapSoft*-a tako da se može ostvariti vrlo efikasna obrada i analiza visinskih podataka dobijenih iz svih raspoloživih izvora, bez praktičnih ograničenja u pogledu količine podataka.

## 6.2 Metodologija i tehnološki postupci

Potvrđena je jedna od polaznih hipoteza ovog istraživanja i konstatovano je da u ovom trenutku najracionalnije rešenje predstavlja digitalizacija postojećih podloga. Analiza trenutno raspoloživih metoda i postojećih izvora podataka je potvrdila da je ovakav pristup formiranju nacionalnog DMT-a najekonomičniji i najefikasniji, a da se istovremeno može realizovati DMT relativno visoke tačnosti.

Proračun visinske tačnosti podataka sa TK25 pokazao je da treba očekivati da srednja kvadratna greška digitalizovanih visina bude u rasponu od 1.5m za ravničarske terene, pa do 8.3m za terene nagiba od 45°. Eksperimentalna ocena tačnosti sa korišćenjem velike količine prikupljenih podataka je ovo i potvrdila. Na osnovu pouzdanih kontrolnih visina (poligonska mreža, topografski premer 1:1000 i digitalno kartiranje razmere 1:5000) dobijene su vrednosti od 1.6 do 6.1m za terene nagiba do 40°. I proračunata i eksperimentalna tačnost podrazumevaju teren bez visokih i gustih šuma.

Uočen je problem u obradi RO visinske predstave i hidrografije. Za ove podloge ne postoji dovoljan broj referentnih tačaka za utvrđivanje i otklanjanje deformacija, kao i za pouzdano georeferenciranje podloga. Obrada većeg broja podloga TK25 pokazala je da ovo može rezultirati značajnim snižavanjem položajne tačnosti digitalizovanih podataka. Procenjeno je da uticaj ovih grešaka na modeliranje terena iznosi od 0.5m u ravnim terenima, pa do 5.2m za terene nagiba od 45°. Ovo svakako nije zanemarljivo ako se uzme u obzir da visinska tačnost tačaka izohipsi dobijenih u fazi primarnog prikupljanja iznosi 1.5 do 6.5m. Predložena su i odgovarajuća rešenja koja se svode na korišćenje skeniranih kolornih TK25 karata za "navlačenje" skeniranog ili vektorskog sadržaja sa RO hidrografije i visinske predstave.

S obzirom na tehnologiju korišćenu za prvobitno kartiranje visinske predstave, probleme vezane za utvrđivanje i otklanjanje deformacija i georeferenciranje podloga, ažurnost visinske predstave na TK25, tačnost visinske predstave terena u područjima obraslim gustom i visokom šumom, kao i izuzetno veliku količinu podataka, posebna pažnja posvećena je primarnoj obradi i verifikaciji podataka sa TK25 podloga. Kroz eksperimentalnu verifikaciju podataka koji su već prikupljeni sa TK25 podloga, kao i verifikaciju celokupne predložene metodologije, potvrđen je značaj obrade i verifikacije podataka. Sve analize rezultata potvrdile su prisustvo značajnog broja grubih grešaka u podacima, bilo da su one posledica primarnog ili sekundarnog prikupljanja podataka, ili da su posledica promena koje su u međuvremenu nastale na terenu. Predložena su odgovarajuća metodološka rešenja za okrivanje i eliminaciju tih grešaka, a razvijeni su i odgovarajući softverski alati za podršku.

Predloženo je da se arhiviraju i održavaju primarni podaci DMT25, s napomenom da bi podatke sa izohipsama trebalo zameniti dovoljno gustom mrežom tačaka u manje ili više pravilnom rasporedu. Podrazumeva se i arhiviranje i održavanje strukturnih i prelomnih linija terena. Ovakav pristup je posebno opravdan s obzirom na to da u početnom periodu eksploatacije treba očekivati i primenu procedura za postepeno podizanje kvaliteta ovih podataka. Formiranje i održavanje ovakve baze podataka može se uspešno realizovati korišćenjem postojećih softverskih alata i uz minimalan dodatni razvoj. Pored toga, predlaže se i interpolacija grid DMT-a i formiranje datoteka u standardnim rasterskim formatima. Preporučuje se da to bude grid rezolucije od 25m, a da se interpolacija visina obavi korišćenjem metoda i softvera razvijenim u okviru ovog rada.

Očekivana tačnost finalnog DMT-a koja je dobijena na osnovu velikog broja obimnih eksperimenata kreće se u rasponu od 1.6 do 9m, s tim da se maksimalne greške očekuju samo za terene obrasle gustom i visokom šumom, kao i za izuzetno strme planinske terene. Za umereno složene terene nagiba do 25° treba očekivati tačnost koja se kreće od 1.6m do 4m.

### 6.3 Smernice za dalja istraživanja

Na kraju ovog rada može se zaključiti da, iako je dosta toga urađeno i time stvorene realne pretpostavke za formiranje nacionalnog DMT-a, ipak ima još pitanja i problema za koje treba dati prave odgovore i rešenja. Neka od njih su:

- filtriranje podataka u fazi formiranja DMT-a posebno je važno kod proračuna normala površi i splajnovanja trougaonim površinskim zakrpama; u tom smislu treba razviti i istestirati numeričke procedure i algoritme za filtriranje podataka primenom geostatističkih metoda i lokalnim procesiranjem podataka sa korišćenjem topologije TIN-a; razmotriti mogućnost primene globalnih metoda optimizacije sa minimalizacijom zakrivljenosti površi, a posebno s obzirom na obradu velike količine podataka;
- implementirati modeliranje površi terena sa TIN DMT-om i splajnovanjem kubnim Bézierovim trougaonim zakrpama sa  $C^1$  kontinualnošću; implementirati nekoliko publikovanih algoritama sa podelom osnovnog trougla mreže na mini-trouglove po Clough-Tocher šemi i algoritam sa ograničenjem interpolovane površi na zadati interval, a potom ispitati njihove karakteristike s obzirom na modeliranje površi terena; posebno ispitati mogućnost korišćenja postupka modeliranja sa ograničenjem interpolovane površi na zadati interval za ulazne podatke u formi izohipsi;
- kod algoritama za automatsko otkrivanje strukturnih linija terena uvesti fina poboljšanja; nakon određivanja približne geometrije strukturnih linija terena nekim od razvijenih algoritama treba korigovati pozicije strukturnih linija terena s obzirom na nejednak pad terena sa leve i desne strane strukturne linije; posebno je interesantna opcija uvođenja ove modifikacije kod algoritma zasnovanog na Voronoi dijagramu i principu kore i skeleta; razviti procedure za automatsku klasifikaciju detektovanih strukturnih linija s obzirom na njihov značaj za modeliranje površi terena;
- dodatno istražiti problematiku redukcije suvišnih podataka i generalizacije podataka korišćenjem tehnika decimacije i profinjenja; ispitati mogućnost primene postojećih softverskih alata i mogućnost razvoja novih;
- ispitati mogućnost razvoja algoritma za inkrementalno formiranje i ažuriranje DMT-a sa čuvanjem podataka DMT-a u georelacionoj bazi podataka; u tom smislu treba modifikovati algoritam za



formiranje TIN-a tako da se podaci TIN-a sve vreme čuvaju u bazi podataka; razmotriti implementaciju postupaka zasnovanih na korišćenju komercijalnih softvera za rukovanje relacionim bazama podataka (RDBMS menadžeri);

- ispitati mogućnost implementacije postupaka za rukovanje primarnim podacima DMT-a sa formiranjem TIN DMT-a po potrebi, u on-line režimu rada; uporediti ove postupke sa postupcima za inkrementalno formiranje TIN DMT-a u slučaju obrade velike količine DMT podataka od nekoliko desetina miliona visina.

## BIBLIOGRAFIJA

### a. Knjige, časopisi i radovi sa naučnih skupova

1. Adnađević, D. / Kadelburg, Z. (1991) : "**Matematička analiza II**", Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd 1991. 1-308.
2. Akima, H. (1974) : "**A method of bivariate interpolation and smooth surface fitting based on local procedures**", *Communications of the ACM*, Vol. 17., No.1, 18-20.
3. Akima, H. (1978) : "**A Method of Bivariate Interpolation and Smooth Surface Fitting for Irregularly Distributed Data Points**", *ACM Transactions on Mathematical Software*, Vol4., No.2, 148-159.
4. Anđelić, M. (1990) : "**Geomorfologija**", Vojnogeografski institut, Beograd, 1-276.
5. Amenta, N. / Bern, M. / Eppstein, D. (1998) : "**The Crust and the  $\beta$ -Skeleton: Combinatorial Curve Reconstruction**", *Graphical Models and Image processing*, 60/2, No.2, March 1998, 125-135.
6. Amenta, N. / Bern, M. / Kamvysselis, M. (1998)a : "**A New Voronoi-Based Surface Reconstruction Algorithm**", *SIGGRAPH 98*, 415-421, (w29).
7. Amenta, N. / Bern, M. (1999) : "**Surface Reconstruction by Voronoi Filtering**", *Discrete and Computational Geometry*, 22, 481-504.
8. Amenta, N. / Choi, S. / Kolluri, R. (2001) : "**The Power Crust, Unions of Balls and Medial Axis Transform**", *International Journal of Computational Geometry and its Applications*.
9. Aumann, G. / Ebner, H. / Tang, L. (1990) : "**Automatic Derivation of Skeleton Lines from Digitized Contours**", *presented paper, ISPRS Proceedings of the Symposium Tsukuba, Commission IV, Vol. 28., Part 4, 330-337.*
10. Aumann, G. / Eder, K. / Pfannenstien, A. / Würländer, R. (1992) : "**Primary data Analysis and Preparation for DTM Generation**", *presented paper, ISPRS 17th Congress, Washington, Commission IV, Vol. 29., Part B4, 850-856.*
11. Axelsson, P. (2000) : "**DEM Generation From Laser Scanner Data Using Adaptive TIN Models**", *presented paper, ISPRS 19th Congress, Amsterdam, Commission IV, Vol. 33., Part B4, 110-117.*
12. Balce, A.E. (1986) : "**Determination of Optimum Sampling Interval in Grid Sampling of Digital Elevation Models for Large-Scale Application**", *presented paper, ISPRS Proceedings of the Symposium Rovaniemi (1986), Commission III, Vol. 26.-3/1, 40-54.*
13. Bamler, R. (1999) : "**The SRTM Mission: A World-Wide 30m Resolution DEM from SAR Interferometry in 11 Days**", *paper in Photogrammetric Week '99, edited by Dieter Fritsch and Rudolf Spiller, Wichmann Verlag, Hüthig GmbH, Heidelberg, 145-154.*
14. Barnhill, R.E. / Farin, G. (1981) : "**C' Quintic Interpolation Over Triangles - Two Explicit Representations**", *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 17, 1763-1778.
15. Bill, R. / Steidler, F. (1986) : "**Progressive Sampling Using Triangular Intermeshing - An Efficient Photogrammetric DTM Data Acquisition Method**", *presented paper, ISPRS Proceedings of the Symposium Rovaniemi, Commission III, Vol. 26.-3/1, 69-78.*
16. Bowyer, A. (1981) : "**Computing Dirichlet tessellations**", *The computer Journal*, Vol.24, No.2, 162-166.
17. Brenner, C. (2000) : "**Towards FullyAutomatic Generation of City Models**", *presented paper, ISPRS 19th Congress, Amsterdam, Commission III, Vol. 33., Part B3, 85-92.*
18. Briese, C. / Kraus, K. (2003) : "**Laser-Geländemodelle: Zusammenspiel von Filterung und Datenreduktion**", *Eckhardt Seyfert (Hrsg.), 23. Wissenschaftlich-Technischen Jahrestagung der DGPF,*



- Bochum, Deutschland, Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, Band 12, September 2003, 125-134.
19. Briese, C. (2004) : *"Three-dimensional Modelling of Breaklines from Airborne Laser Scanner Data"*, presented paper, ISPRS 20th Congress, Istanbul, Commission III, WG III/3.
  20. Brügelmann, R. (2000) : *"Automatic Breakline Detection From Airborne Laser Range Data"*, presented paper, ISPRS 19th Congress, Amsterdam, Commission III, Vol. 33., Part B3, 109-116.
  21. Cebecauer, T. / Hofierka, T. / Šuri, M. (2002) : *"Processing digital terrain models by regularized spline with tension: tuning interpolation parameters for different input datasets"*, presented paper, Proceedings of the Open Source GIS - GRASS users conference 2002 - Trento.
  22. Cho, W. / Maekawa, T. / Patrikalakis, N.M. / Peraire, (1997) : *"Topologically Reliable Approximation of Trimmed Polynomial Surface patches"*, Graphical Models and Image Processing.
  23. Clarke, A.L. / Gruen, A. / Loon, J.C. (1982) : *"A Contour Specific Interpolation Algorithm for DEM Generation"*, presented paper, ISPRS Proceedings of the Symposium "Mathematical Models, Accuracy Aspects and Quality Control", Otaniemi, Commission III, Vol. 24-3, 68-81.
  24. Cvijetinović, Ž. (1995) : *"Konceptualno rešenje postupka prikupljanja i obrade digitalnih podataka visinske predstave terena u okviru državnog premera"*, magistarski rad, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 1-130.
  25. Cvijetinović, Ž. / Mihajlović, D. (1996) : *"Interactive DTM Data Aquisition and Verification on Computer Supported Analog Stereo Plotters"*, presented paper, ISPRS 18th Congress, Vienna, Commission IV, WG 4, Vol. 31., 244-249.
  26. Cvijetinović, Ž. / Joksić, D. / Vojinović, M. (2004) : *"Remote Sensing Data for Building and Updating Country Wide DTM"*, presented paper, First Mediterranean Conference on Earth Observation – Remote Sensing (MECEO), Belgrade, 69-76.
  27. Cvijetinović, Ž. / Vojinović, M. / Mitrović, M. (2004)a : *"Advanced 3D Visualization of Large Landscape Datasets"*, presented paper, First Mediterranean Conference on Earth Observation – Remote Sensing (MECEO), Belgrade, 189-196.
  28. Cvijetinović, Ž. / Tomić, S. / Vojinović, M. (2004) b : *"Production of Country Wide DTM for Serbia and Montenegro"*, presented paper, ISPRS 20th Congress, Istanbul, Commission IV, WG IV/7.
  29. Crawford, C. / Bayarri, S. / Petrović, D. (2003) : *"Fast 3D Visualization of Large Image Datasets in a GIS"*, In: Earth observation magazine, Vol. 12, No. 9, December 2003.
  30. Crombaghs, M.J.E. / Brügelmann, R. / de Min, E.J. (2000) : *"On the Adjustment of Overlapping Strips of Laseraltimeter Height Data"*, presented paper, ISPRS 19th Congress, Amsterdam, Commission III, Vol. 33., Part B3, 230-237.
  31. Dakowicz, M. / Gold, C.M. (2002) : *"Visualizing Terrain Models from Contours - Plausible Ridge, Valley and Slope Estimation"*. In Proceedings of the International Workshop On Visualization and Animation of Landscape, Kunming, China.
  32. Dakowicz, M. / Gold, C.M. (2002)a : *"Extracting Meaningful Slopes from Terrain Contours"*, In Proceedings : Computational Science - ICCS 2002, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 2331, (Ed.: Sloot, P.M.A., Tan, C.J.K., Dongarra, J.J. and Hoekstra, A.G.), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Amsterdam, The Netherlands, 144-153
  33. Damoiseaux, T. (2000) : *"Topographic Map Generation in High Mountainous Areas by Means of InSAR Data"*, presented paper, ISPRS 19th Congress, Amsterdam, Commission III, Vol. 33., Part B1, 54-61.
  34. Danovaro, E. / Floriani, L.D. / Magillo, P. / Mesmoudi, M.M. / Puppo, E. (2003) : *"Morphology-Driven Simplification and Multiresolution Modeling of Terrains"*, GIS'03, November 2003, New Orleans, Louisiana, USA.
  35. De Boor C. / Höllig, K. / Sabin, M. (1987) : *"High Accuracy Geometric Hermite Interpolation"*, Computer Aided geometric Design, No.4 (4), December 1987, 269-278.
  36. Desbrun, M. / Meyer, M. / Schröder, P / Barr, A.H. (2000) : *"Anisotropic Feature-Preserving Denoising of Height Fields and Bivariate Data"*, In Graphic Interface '2000 Conference Proceedings, 145-152.
  37. Desbrun, M. / Meyer, M. / Schröder, P / Barr, A.H (1999) : *"Implicit Fairing of Irregular Meshes using Diffusion and Curvature Flow"*, In SIGGRAPH 99 Conference proceedings, August 1999, 317-324.
  38. Delgado, J. / Cardenal, J. / Gómez, A. (2000) : *"On the use of the Geostatistical Estimation Techniques to the Generation, Debugging and Analysis of Digital Surface Models"*, presented paper, ISPRS 19th Congress, Amsterdam, Commission II, WG IC-15, Vol. 33., Part B4, 206-213.
  39. Douglas, D. / Peucker, T. (1973) : *"Algorithm for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature"*, Canadian Cartographer Vol10, No.2, 112-122.

40. Dowman, I. (2004) : *"Integration of LiDAR and IfSAR for Mapping"*, presented paper, ISPRS 20th Congress, Istanbul, Commission II, WG II/2.
41. Duchaineau, M. / Wolinsky, M. / Sigeti, D.E. / Miller, M.C. / Aldrich, C. / Mineev-Weinstein, M.B. (1997) : *"Roaming terrain: Real-time optimally adapting meshes"*. In: *Proceedings Visualization 97, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, California, 81-88.*
42. Dupéret, A. (1999) : *"DTM Edition in IGN France – An Operational Process to Generate Contour Lines"*, *Photogrammetric Week '99, Wichmann Verlag, Heidelberg, 1999, 211-219.*
43. Dwyer, R.A. (1987) : *"A Faster Divide-and-Conquer Algorithm for Constructing Delaunay Triangulations"*, *Algorithmica, Vol. 2, No. 2, 137-151.*
44. Ebner, H. / Hofmann-Wellenhof, B. / Reiss, P. / Steidler, F. (1980) : *"HIFI – A Minicomputer Program Package for Height Interpolation by Finite Elements"*, presented paper, ISPRS 14th Congress, Hamburg, Commission IV, Vol. 23., Part B4, 202-215.
45. Ebner, H. / Reinhardt, W. / Hößler, R. (1988) : *"Generation, Management and Utilization of High Fidelity Digital Terrain Models"*, presented paper, ISPRS 16th Congress, Kyoto, Commission I-VII, Supplement, Vol. 27., Part B11, III556-III566.
46. ESRI (2004) : *"ArcGIS Desktop Help"*, *Interactive help.*
47. Farin, G. (1993) : *"Curves and Surfaces in Computer Aided Geometric Design. A Practical Guide"*, 3rd edition, Academic Press Inc., New York.
48. Favey, E. / Pateraki, M. / Baltsavias, E.P. / Bauder, A. / Bösch, H. (2000) : *"Surface Modelling for Alpine Glacier Monitoring by Airborne Laser Scanning and Digital Photogrammetry"*, presented paper, ISPRS 19th Congress, Amsterdam, Commission IV, Vol. 33., Part B4, 269-277.
49. Floriani, L. / Marzano, P. / Puppo, E. (1994) : *"Hierarchical terrain models: survey and formalization"*, *Proceedings ACM Symposium on Applied Computing (SAC), March 1994.*
50. Fortune, S. (1987) : *"A Sweepline Algorithm for Voronoi Diagrams"*, *Algorithmica, Vol. 2, No. 2, 153-174.*
51. Franke, R. (1982) : *"Smooth Interpolation of Scattered Data by Local Thin Plate Splines"*, *Journal of Computation and Mathematics with Applications, Vol. 8, No. 4, 237-281.*
52. Franke, R. / Neilson, X. (1984) : *"Smooth Interpolation of Large Sets of Scattered Data"*, *International Journal for Numerical Methods in Engineering, 15, 1691-1704.*
53. Fraser, C.S. / Dare, P.M. / Yamakawa, T. (2004) : *"Digital Surface Modelling from SPOT 5 HRS Imagery Using The Affine projective Model"*, presented paper, ISPRS 20th Congress, Istanbul, Commission I, WG I/2.
54. Frederiksen, P. / Jacobi, O. / Kubik, K. (1984) : *" Accuracy Prediction for Digital Elevation Models "*, presented paper, ISPRS 15th Congress, Rio De Janeiro, Commission III Vol. 25., Part A3a, 246-255.
55. Frederiksen, P. / Jacobi, O. / Kubik, K. (1986) : *"Optimal Sample Spacing in Digital Elevation Models"*, presented paper, ISPRS Proceedings of the Symposium Rovaniemi, Commission III, Vol. 26.-3/1, 252-259.
56. Frederiksen, P. (1992) : *"Updating Elevation Data Bases – Merging Old and New Data"*, presented paper, ISPRS 17th Congress, Washington, Commission IV, Vol. 29., Part B4, 526-530.
57. Frederiksen, P. / Grum, J. / Joergensen, L.T. (2004) : *"Strategies for Updating a National 3-D Topographic Database and Related Geoinformation"*, presented paper, ISPRS 20th Congress, Istanbul, Commission II, WG II/4.
58. Fritsch, D. (1988) : *"Some Experience with the Determination of the Optimum Sampling Density"*, presented paper, ISPRS 16th Congress, Kyoto, Commissions I-VIII – Supplement, Vol. 27., Part B11, III493 – III504.
59. Fritsch, D. / Kada, M. (2004) : *"Visualization Using game Engines"*, presented paper, ISPRS 20th Congress, Istanbul, Commission V, WG V/6.
60. Fukue, K. / Kuroda, Y. / Shimoda, H. / Sakata, T. (1990) : *"Simple DEM Generation Method From a Contour Image"*, presented paper, ISPRS Proceedings of the Symposium Tsukuba, Commission IV, Vol. 28., Part 4, 347-355.
61. Garcia, M. A. (1995) : *"Local Approximation and Interpolation of 3D Triangular Meshes of Arbitrary Topology"*, *International Conference on Computational Graphics and Visualization Techniques, Alvor, Portugal, December 11-15, 1995, 143-152.*
62. Garland, M. / Heckbert, P.S. (1995) : *"Fast Polygonal Approximation of Terrains and Height Fields"*, *Technical Report CMU-CS-95-181, Computer Science Dept., Carnegie Mellon University, (w40).*
63. Gerstner, T. (1999) : *"Multiresolution Visualisation and Compression of Global Topographic Data"*, *Technical Report 29, Department for Applied Mathematics, University of Bonn, Germany, 1-24.*



64. Gold, C.M. (1999) : **"Crust and anticrust : a one-step boundary and skeleton extraction algorithm"**, in *Proceedings of the ACM Conference on Computational Geometry, Miami, Florida, 189-196, (w31)*.
65. Gold, C.M. / Dakowicz, M. (2000) : **"Terrain Modelling Based on Contours and Slopes"**, In: *Advances in Spatial Data Handling. Proceedings, 10th International Symposium on Spatial Data Handling, (Ed.: Richardson, D. and Van Oosterom, P.), Springer-Verlag Berlin, (w31)*.
66. Gold, C.M. / Dakowicz, M. (2002) : **"Terrain Modelling Based on Contours and Slopes"**, presented paper, *Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications, Ottawa, (w31)*.
67. Gruen, A. / Fricker, P. (2000) : **"The Swiss National Report for Photogrammetry and Remote Sensing, 1996-2000"**, report prepared for the Swiss Society of Photogrammetry, Image Analysis and Remote Sensing.
68. Guibas, L.J. / Stolfi, J. (1985) : **"Primitives for the Manipulation of General Subdivisions and the Computation of Voronoi Diagrams"**, *ACM Transactions on Graphics Vol. 4, No. 2, 74-123*.
69. Gülch, E. (2000) : **"Digital Systems for Automated Cartographic Feature Extraction"**, presented paper, *ISPRS 19th Congress, Amsterdam, Commission II, Vol 23., Part B2, 241-256*.
70. Hardy, R.L. (1984) : **"Kriging, Collocation, and Biharmonic Models for Application in the Earth Sciences (What's the Difference?)"**, presented paper, *44th Annual ACSM Meeting, Washington, D.C., 363-372*.
71. Hardy, R.L. (1990) : **"Theory and applications of the multiquadric-biharmonic method"**, *Journal of Computation and Mathematics with Applications, Vol. 19, 163-208*.
72. Helvacı, C. / Bayram, B. (2004) : **"Semi Automatic Digitizing of Contours from 1:25000 Scaled Maps"**, presented paper, *ISPRS 20th Congress, Istanbul, Commission III, WG III/4*.
73. Heipke, C. / Koch, A. / Lohmann, P. (2002) : **"Analysis of SRTM DTM – Methodology and Practical Results"**, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Commission III, Vol. 34, Part 4, Ottawa, 470-475*.
74. Heitzinger, D. / Kager, H. (2001) : **"High Quality DTMs from Contourlines by knowledge-based classification of problem regions"**, *ISPRS Proceedings of the International Symposium on "GIS – Between Visions and Applications", Commission IV, Stuttgart*.
75. Hilbring, D. (2004) : **"Integration of High Resolution Digital Elevation Models in 3D-GIS-Applications of the Environmental Information System of Baden-Württemberg"**, presented paper, *ISPRS 20th Congress, Istanbul, Commission IV, WG IV/6*.
76. Hochstöger, F. (1996) : **"Software for Managing Country-Wide Digital Elevation Data"**, *ISPRS 18th Congress, Vienna, Commission II, Working Group 3, Vol. 31*.
77. Hoppe, H., 1998 : **"Smooth view-dependent level-of-detail control and its application to terrain rendering"**, *IEEE Visualization 1998, October 1998, 35-42*.
78. Hormann, K. / Spinello, S. / Schröder, P. (2003) : **"C<sup>1</sup>-continuous Terrain Reconstruction from Sparse Contours"**, *Visual Modelling and Visualisation, Munich, 2003*.
79. Hovenbitzer, M. (2004) : **"The Digital Elevation Model 1:25000 (DEM25) for the Federal Republic of Germany"**.
80. Huising, E.J. / Gomes Pereira, L.M. (1998) : **"Errors and accuracy estimates of laser data acquired by various laser scanning systems for topographic applications"**, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 53., No 5, 245-261*.
81. Hutchinson, M.F. (1988) : **"Calculation of hydrologically sound digital elevation models"**, *Proceedings of the Third International Symposium on Spatial Data Handling, August 17-19, Sydney. International Geographical Union, Columbus, Ohio, 117-133*.
82. Hutchinson, M.F. (1989) : **"A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits"**, *Journal of Hydrology 106, 211-232*.
83. Hutchinson, M.F. (1996) : **"A locally adaptive approach to the interpolation of digital elevation mode"**, *Proceedings of the Third International Conference Integrating GIS and Environmental Modelling, Santa Fe, New Mexico, University of California, Santa Barbara, national Center for Geographic Information and Analysis*.
84. Hyypä, J. / Hyypä, H. / Ruppert, G. (2000) : **"Automatic Derivation of Features Related to Forest Stand Attributes Using Laser Scanner"**, presented paper, *ISPRS 16th Congress, Kyoto, Commission III Vol. 27., Part 9, 421-428*.
85. Hyypä, J. / Pyysalo, U. / Hyypä, H. / Samberg, A. (2000)a : **"Elevation Accuracy of Laser Scanning-Derived Digital Terrain and Target Models in Forest Environment"**, No. 1 *Proceedings of EARSeL-SIG-Workshop LIDAR, Dresden, FRG, June 16-17, 2000, 140-147*.

86. Inaba, K. / Aumann, G. / Ebner, H. (1988) : "**DTM Generation from Digital Contour Data using Aspect Information**", presented paper, ISPRS 16th Congress, Kyoto, Commission I-VII, Supplement, Vol. 27., Part B9, III 101-III110.
87. INPHO (2004) : "**GVE User Manual**", On-line documentation, Inpho GmbH, (w43).
88. INPHO (2004a) : "**SCOP++ Manual**", On-line documentation, Inpho GmbH, (w43).
89. INPHO (2004b) : "**Top DM Manual**", On-line documentation, Inpho GmbH, (w43).
90. Intergraph (2004) : "**Geomedia Grid**", Interactive help.
91. Kaczynski, R. / Majde A. / Ewiak, I. (2004) : "**Accuracy of DTM and Ortho Generated from IKONOS Stereo Images**", presented paper, ISPRS 20th Congress, Istanbul, Commission IV, WG IV/6.
92. Kamada, K. / Katsuta, K. / Yagi, S. (1990) : "**Automatic Digitization of 1:25 000 Scale Topographical Maps**", presented paper, ISPRS Proceedings of the Symposium Tsukuba, Commission IV, Vol. 28., Part 4, 86-94.
93. Kocak, G. / Büyüksalih, G. / Jacobsen, K. (2004) : "**Analysis of Digital Elevation Models Determined by High Resolution Space Images**", presented paper, ISPRS 20th Congress, Istanbul, Commission IV, WG IV/7.
94. Kobbelt, L. / Vorsatz, J. / Seidel, H.P. (1999) : "**Multiresolution Hierarchies on Unstructured Triangle Meshes**", Computational Geometry: Theory and Applications 14.
95. Kobbelt, L. / Campagna, S. / Seidel, H.P. (1998) : "**A General Framework for Mesh Decimation**", Proceedings of Graphics Interface, 43-50
96. Kong, V.P. / Ong, B.H. / Saw, K.H. (2004) : "**Range Restricted Interpolation Using Cubic Bézier Triangles**", WSCG'2004, February 2-6, 2004, Plzen, Czech Republic, (w35).
97. Kraus, K. (1982) : "**Photogrammetrie, Band 1: Grundlagen und Standardverfahren**", Ferdinand Dummlers Verlag, Bonn.
98. Kraus, K. (1984) : "**Photogrammetrie, Band 2: Theorie und Praxis der Auswertesysteme**", Ferdinand Dummlers Verlag, Bonn.
99. Kraus, K. / Pfeifer, N. (1998) : "**Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data**", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 53., No 4, 193-203.
100. Kraus, K. / Rieger, W. (1999) : "**Interpolation of High Quality Ground Models from Laser Scanner Data in Forested Areas**", Photogrammetric Week '99, Wichmann Verlag, Stuttgart, 221-231.
101. Kraus, K. / Pfeifer, N. (2001) : "**Advanced DTM Generation from LIDAR data**", International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIV-3/W4, Annapolis, Maryland, USA.
102. Kraus, K. / Briese, C. / Attwenger, M. / Pfeifer, N. (2004) : "**Quality Measures for Digital Terrain Models**", presented paper, ISPRS 20th Congress, Istanbul, Commission II, WG II/2.
103. Lawson, C.L. (1977) : "**Software for C<sup>1</sup> Surface interpolation**", Mathematical Software III (editor Rice, J.R), Academic press, New York, 161-194.
104. Leberl, F. / Thurgood, J. (2004) : "**The Promise of Softcopy Photogrammetry Revisited**", presented paper, ISPRS 20th Congress, Istanbul.
105. Lee, D.T. / Schachter, B.J. (1980) : "**Two Algorithms for Constructing a Delaunay Triangulation**", International Journal of Computer and Information Sciences, 9, 219-242.
106. LH Systems (2001) : "**SOCET SET – Overview and New Features and Functionality (Version 4.3.1)**", Product Information, LH Systems.
107. Lindstrom, P. / Koller, D. / Ribarsky, W. / Hodges, L.F. / Faust, N. / Turner, G.A. (1996) : "**Real-time, continuous level of detail rendering of height fields**", In: Proceeding SIGGRAPH 96, ACM SIGGRAPH, 109-118.
108. Lindstrom, P. / Pascucci, V. (2002) : "**Terrain Simplification Simplified: A General Framework for View-Dependent Out-of-Core Visualization**", IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 8(3), July-September 2002, 239-254.
109. Li, Z. (1994) : "**A Comparative Study of The Accuracy of Digital Terrain Models (DTMs) Based on Various Data Models**", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 49, No 1, 2-11.
110. Li, X. / Tennant, K. / Lawrence, G. (2004) : "**Three-Dimensional Mapping With Airborne IFSAR Based STAR Technology – Intermap's Experiences**", presented paper, ISPRS 20th Congress, Istanbul, Commission III, WG III/3.
111. Lipkovski, A (1992) : "**Linearna algebra i analitička geometrija**", Naučna knjiga, Beograd, 1-238.



112. Lohmann, P. / Koch, A. / Schaeffer, M. (2000) : *"Approaches to The Filtering of Laser Scanner data"*, presented paper, ISPRS 19th Congress, Amsterdam, Commission III, Vol. 23., Part B3, 540-547.
113. Loop, C. (1987) : *"Smooth subdivision surfaces based on triangles"*, Master's thesis, University of Utah, Department of Mathematics.
114. Mann, S. / Loop C. / Lounsbery M. / Meyers, D. / Painter, J. / DeRose, T. / Sloan, K (1992) : *"A Survey of Parametric Scattered Data Fitting Using Triangular Interpolants"*, in G. Farin, ed, *Curve and Surface Design*, SIAM, 145-172, (w38).
115. Mann, S. (1998) : *"Cubic Precision Clough-Tocher Interpolation"*, Technical Report CS-98-15, Computer Science Department, University of Waterloo, (w42), (w38, )1-11.
116. Mann, S. (2000) : *"Continuity Adjustments to Triangular Bézier Patches that Retain Polynomial Precision"*, Technical Report CS-2000-01, Computer Science Department, University of Waterloo, Ontario, N2L, 3G1, January 2000, (w20), 1-22.
117. Mann, S. (2001) : *"Adjusting Control Points to Achieve Continuity"*, Computer Science Department, University of Waterloo, Ontario, N2L, 3G1, January 2001, 1-17, (w38).
118. Mao, Z. / Ma, Z. Zhao, M. (2005) : *"A Subdivision Scheme Based on Vertex Normals for Triangular Patches"*, WSCG SHORT papers, WSCG'2005, January 31 – February 4, 2005, Plzen, Czech Republic, (w35).
119. Masaharu, H. / Hasegawa, H. (2000) : *"Three-Dimensional City Modeling From Laser Scanner Data by Extracting Building Polygons Using Region Segmentation Method"*, presented paper, ISPRS 19th Congress, Amsterdam, Commission III, Vol. 23., Part B3, 556-562.
120. McGlone, J.C. / Mikhail, E.M. / Bethel, J. (2004) : *"Manual of Photogrammetry"*, Fifth Edition, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, ISBN 1-57083-071-1 Bethesda, Mariland, USA, 1-1151.
121. Mercer, B. (2001) : *"Combining LIDAR and IfSAR: What can you expect"*, paper in Photogrammetric Week '01, edited by Dieter Fritsch and Rudolf Spiller, Herbert Wichmann Verlag, Hüthig GmbH & Co. KG, Heidelberg, 227-237.
122. Mercer, B. / Thornton, S. / Tennant K. (1998) : *"Operational DEM Production from Airborne Interferometry and from RADARSAT Stereo Technologies"*, presented paper, ASPRS-RTI Annual Conference, Tampa, Florida.
123. Meyer, M. / Desbrun, M. / Schröder, Barr, A.H. (2002) : *"Discrete Differential-Geometry Operators for Triangulated 2-Manifolds"*, Visualization and mathematics Proceedings, May 2002.
124. Meyer, M. / Eriksson, M. / Maggio, R.C. (2001) : *"Gradient Estimation from Irregularly Spaced Data Sets"*, Mathematical Geology, Vol. 33, No. 6, 2001, 693-717.
125. Michalis, P. / Dowman, I. (2004) : *"A Rogorous Model and DEM Generation for SPOT5 - HRS"*, presented paper, ISPRS 20th Congress, Istanbul, Commission I.
126. Mihajlović, D. (1985) : *"Obuhvatanje grešaka geodetske osnove kod fotogrametrijskog blokizravnjanja interpolacijom po metodi najmanjih kvadrata"*, magistarski rad, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu.
127. Milovanović, V. (1981) : *"Opšta kartografija"*, univerzitetski udžbenik, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Institut za geodeziju, 1-189.
128. Mitášová, H. / Mitáš, L. (1993) : *"Interpolation by Regularized Spline with Tension : I. Theory and Implementation"*, published in Mathematical Geology, Vol. 25, No. 6, 641-655, (w28).
129. Mitášová, H. / Hofierka, J. (1993)a : *"Interpolation by Regularized Spline with Tension : II. Application to Terrain Modeling and Surface Geometry Analysis"*, published in Mathematical Geology, Vol. 25, No. 6, 657-669, (w28).
130. Mitáš, L. / Mitášová, H. / (1999) : *"Spatial Interpolation"*, In: Longley, P. / Goodchild, M.F. / Maguire, D.J. / Rhind, D.W., editors, *Geographical Information Systems : Principles, Techniques, management and Applications*, Wiley, 481-492, (w28).
131. Moeller, M. (2000) : *"Applications of Very High Resolution Digital Airborne Scanner Data"*, presented paper, ISPRS 19th Congress, Amsterdam, Commission III, Vol. 23., Part B4, 663-669.
132. Morgan, M. / Tempfli, K. (2000) : *"Automatic Building Extraction From Airborne Laser Scanning Data"*, presented paper, ISPRS 19th Congress, Amsterdam, Commission III, Vol. 23., Part B3, 616-623.
133. Moritz, H. / Sünkel, H. (1978) : *"Approximation Methods in Geodesy"*. Herbert Wichmann Verlag Karlsruhe.
134. Morley, J.G. / Walker, A.H. / Muller, J.P.A.L. / Kitmitto, K. / Mitchell, K.L. / Chugani, K. / Smith, A. / Barnes, J. / Cross, P.A. / Dowman, I.J. (2000) : *"LANDMAP: Creating a DEM of the British Isles by SAR Interferometry"*, presented paper, ISPRS 19th Congress, Amsterdam, Commission IV, WG IC/15, Vol 23., Part B4, 686-693.

135. Müller, R. / Reinartz, P. / Lehner, M. / Schroeder, M. (2004) : "Comparison of the Accuracy of DEM from SPOT HRS Two-Fold Stereo Data and HRS/HRG Three-Fold Stereo Data in Barcelona Test Site", presented paper, ISPRS 20th Congress, Istanbul, Commission I, WG I/2.
136. Padrón, E.J. / Amor, M. / Doallo, R. (2002) : "A Meshing Scheme for Real Time Surface Subdivision", WSCG'2002, Plzen, Czech Republic, (w35).
137. Pajarola, R. (2002) : "Overview of Quadtree-based Terrain Triangulation and Visualization", UCI-ICS Technical Report No. 02-01, Department of Information & Computer Science, University of California, Irvine, January 2002, 1-16.
138. Peng, W. / Pilouk, M. / Tempfli, K. (1996) : "Generalizing Relief Representation Using Digitized Contours", presented paper, ISPRS 18th Congress, Vienna, Commission IV, Vol. 21., Part B4, 649-654.
139. Peng, W. / Petrović, D. / Crawford, C. (2004) : "Handling Large Terrain Data in GIS", presented paper, ISPRS 20th Congress, Istanbul, Commission IV, WG IV/4.
140. Petzold, B. / Axelsson, P. (2000) : "Results of the OEEPE WG on Laser Data Acquisition", presented paper, ISPRS 19th Congress, Amsterdam, Commission III, Vol 23., Part B3, 718-723.
141. Petzold, B. / Knabenschuh, M. (1999) : "Data post-processing of Laser Scan Data for countrywide DTM production", paper in Photogrammetric Week '99, edited by Dieter Fritsch and Rudolf Spiller, Wichmann Verlag, Hüthig GmbH, Heidelberg, 233-240.
142. Pfeifer, N. / Stadler, P. / Briese, C. (2001) : "Derivation of Digital Terrain Models in The SCOP++ Environment", presented paper, OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Digital Elevation Models, Stockholm.
143. Pfeifer, N. (2002) : "3D Terrain Models on the Basis of a Triangulation", PhD Thesis, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technischen Universität Wien, 1-127.
144. Pilouk, M. / Tempfli, K. (1992) : "A Digital Image Processing Approach to Creating DTMs from Digitized Contours", presented paper, ISPRS 17th Congress, Washington, Commission IV, Vol. 29., Part B4, 956-961.
145. Poidomani, C.G. / Costantini, D. / Pasquali, P. / Jaeger, P. (2000) : "National-Scale DEM Generation Using ERS Tandem Data in Alpine Regions", Gothenburg.
146. Poli, D. / Li, Z. / Gruen, A. (2004) : "SPOT-5/HRS Stereo Images Orientation and Automated DSM Generation", presented paper, ISPRS 20th Congress, Istanbul, TS HRS(2) – DEM Generation from SPOT-5 HRS Data.
147. Prodanović, D. (1999) : "Unapređenje metoda primene hidroinformatike u analizi oticanja sa urbanih površina", doktorska disertacija, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 1-196.
148. Reinhardt, W. (1988) : "On Line Generation and Verification of Digital Terrain Models", presented paper, ISPRS 16th Congress, Kyoto, Commission I- VII, Supplement, Vol. 27., Part 11, III546-III555.
149. Reiter, J.C. (1996) : "Textured Surface Modeling Using Bézier Triangles", MSc thesis, Graduate Department of Computer Science, University of Toronto, 1-113.
150. Rieger, W. (1992) : "Hydrologische Anwendungen des digitalen Geländemodelles", Dissertationen, Wien.
151. Rieger, W. (1992)a : "Automated River Line and Catchment Area Extraction from DEM Data", presented paper, ISPRS 17th Congress, Washington, Commission IV, Vol. 29., Part B4, 642-649.
152. Rottensteiner, F. / Kager, H. / Briese, C. / Karl Kraus, K. (2002) : "Lidar Activities at The Viennese Institute of Photogrammetry and Remote Sensing", Proceedings of the 3rd International LIDAR Workshop, "Mapping Geo-Surficial Processes Using Laser Altimetry", Ohio State University, Columbus, OH.
153. Rudovski, V. (2004) : "Synthesis of Studies Relating to HRS DTM Production", presented paper, ISPRS 20th Congress, Istanbul, Commission I.
154. Ruppert, J. (1995) : "A Delaunay Refinement Algorithm for Quality 2-Dimensional Mesh Generation", Journal of Algorithms, 18, 548-585.
155. Ruiz, A. (2000) : "A Country Wide TIN Elevations Database", presented paper, ISPRS 19th Congress, Amsterdam, Commission III, Vol 33., Part B3, 785-791.
156. Saleh, R. / Jaffar, M. (2000) : "Economics of Image Acquisition Alternatives for Digital Photogrammetric Production", presented paper, ISPRS 19th Congress, Amsterdam, Commission II, WG II/7, Vol 33., Part B2, 309-315.
157. Saleh, R. (2000)a : "The Cost and Benefits of Softcopy Photogrammetric Production", presented paper, ISPRS 19th Congress, Amsterdam, Commission II, WG II/5, Vol 33., Part B2, 476-481.
158. Sato, H. / Onozawa, A. / Kitazawa, H. (1999) : "Mesh Surface Simplification Based on Constrained Energy", WSCG'1999, Plzen, Czech Republic, (w35).



159. Sauerbier, M. (2004) : **"Accuracy of Automated Aerotriangulation and DTM Generation for Low Textured Imagery"**, presented paper, ISPRS 20th Congress, Istanbul, Commission II, WG II/IV.
160. Schleyer, A. (2001) : **"Das Laserscan-DGM von Baden-Württemberg"**, paper in Photogrammetric Week '01, edited by Dieter Fritsch and Rudolf Spiller, Herbert Wichmann Verlag, Hüthig GmbH & Co. KG, Heidelberg, 227-237.
161. Schneider, B. (1998) : **"Geomorphologically Sound Reconstruction of Digital Terrain Surfaces from Contours"**, Proceedings 8th Symposium on Spatial Data Handling, Vancouver.
162. Schneider, B. (1995) : **"Adaptive Interpolation of Digital Terrain Models"**, Proceedings of the 17th International Cartographic Conference, Barcelona, Vol. 2, pp. 2206-2210.
163. SCOP (1991) : **"Programmsystem SCOP zur Erstellung, Wartung und Anwendung Digitaler Geländemodelle"**, Produktinformation, Technische Universität Wien, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Wien.
164. Sekulović, M. (1984) : **"Metod konačnih elemenata"**, IRO "Građevinska knjiga", Beograd.
165. Shewchuk, J. (1996) : **"Triangle: Engineering a 2d quality mesh generator and delaunay triangulator"**, In Proceedings of the First Workshop on Applied Computational Geometry, ACM, Philadelphia, Pennsylvania, 124-133.
166. Shewchuk, J. (1997) : **"Delaunay Refinement Mesh Generation"**, PhD Thesis, School of Computer Science, Computer Science Department, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, 1-207.
167. Shewchuk, J. (2001) : **"Delaunay Refinement Algorithms for Triangular Mesh Generation"**, Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of California at Berkeley, 1-54.
168. Shiping, S. (2000) : **"DEM Generation Using ERS-1/2 Interferometric SAR Data"**, presented paper, ISPRS 19th Congress, Amsterdam, Commission IV, WG IV/2, Vol 33., Part B4, 963-970.
169. Sibson, R. (1978) : **"Locally equiangular triangulations"**, The Computer Journal, Vol.21, No.3., 243-245.
170. Sigle, M. (1984) : **"A Digital Elevation Model for the State of Baden-Württemberg"**, presented paper, ISPRS 15th Congress, Rio de Janeiro, Commission III, Vol 25., Part A3b, 1016-1023.
171. Soergel, U. / Thoennessen, U. / Gross, H. / Stilla, U. (2000) : **"Segmentation of Interferometric SAR Data for Building Detection"**, presented paper, ISPRS 19th Congress, Amsterdam, Commission III, Vol 33., Part B1, 329-335.
172. Spinello, S. / Guitton, P. (2004) : **"Contour Line Recognition From Scanned Topographic Maps"**, Journal of WSCG, No.1-3, ISSN 1231-6972, WSCG'2004, February 2-6, 2004, Plzen, Czech Republic, (w35).
173. Steinle, E. / Vögtle, T. (2000) : **"Effects of Different Laser Scanning Modes on The Result of Building Recognition and Reconstruction"**, presented paper, ISPRS 19th Congress, Amsterdam, Commission III, Vol 33., Part B3, 858-865.
174. Sties, M. / Krüger, S. / Mercer, J.B. / Schnick, S. (2000) : **"Comparison of Digital Elevation Data from Airborne Laser and Interferometric SAR Systems"**, presented paper, ISPRS 19th Congress, Amsterdam, Commission III, Vol 33., Part B3, 866-873.
175. Stojanović, S. (2004) : **"Ocena kvaliteta DMT-a dobijenog digitalizacijom vojnotopografske karte 1:25000"**, diplomski rad, Građevinski fakultet, Beograd.
176. Su, P. (1997) : **"Efficient Parallel Algorithms for Closest Point Problems"**, PhD Thesis, Department of Mathematics and Computer Science, Dartmouth College, 1-132.
177. Su, P. / Drysdale, R.L.S. (1995) : **"A Comparison of Sequential Delaunay Triangulation Algorithms"**, Proceedings of the Eleventh Annual Symposium on Computational Geometry, Association for Computing Machinery, 61-70.
178. Šoškić, M. (2001) : **"Upoređenje efikasnosti različitih metoda prikupljanja digitalnih podataka visinske predstave terena sa postojećih podloga"**, diplomski rad, Građevinski fakultet, Beograd.
179. Takagi, M. / Shibasaki, R. (1996) : **"An Interpolation Method for Continental DEM Generation Using Small Scale Contour Maps"**, ISPRS 18th Congress, Vienna, Commission IV, Working Group 4, Vol. 31. Part B4, 847-852.
180. Tang, L. (1991) : **"Einsatz der Rasterdatenverarbeitung zum Aufbau digitaler Geländemodelle"**, doktorska disertacija, Mitteilungen der geodatischen Institute der Technischen Universität Graz, Folge 73, 1-97.
181. Tang, L. (1992) : **"Automatic Extraction of Specific Geomorphological Elements from Contours"**, Geo-Information-Systeme, Wichmann, Vol 5, No.3, Karlsruhe, 20-26.

182. Tang, L. (1992)a : **"Raster Algorithms for Surface Modelling"**, presented paper, ISPRS 17th Congress, Washington, Commission III, Vol. 29., Part B3, 566-573.
183. Thibault, D. / Gold, C.M. (2000) : **"Terrain Reconstruction from Contours by Skeleton Construction"**, *Geoinformatica*, 4, 349-373.
184. Tighe, M.L. (2000) : **"Topographic Line Map Production Using High Resolution Airborne Interferometric SAR"**, presented paper, ISPRS 19th Congress, Amsterdam, Commission III, Vol 33., Part B4, 602-609.
185. Tuladhar, A.M. / Makarovic, B. (1988) : **"Digital Terrain Models (DTM) from Contour Lines Upgraded by Photogrammetric Selective Sampling"**, presented paper, ISPRS 16th Congress, Kyoto, Commission IV, Vol 27., Part B8, 94-103.
186. Vosselman, G. (2000) : **"Slope Based Filtering of Laser Altimetry Data"**, presented paper, ISPRS 19th Congress, Amsterdam, Commission III, WG III/2, Vol 33., Part B3, 935-942.
187. Weng, Q. (2001) : **"Quantifying Uncertainty of Digital Elevation Models Derived from Topographic Maps"**, *Advances in Spatial Data Handling*, edited by D. Richardson and P. Van Oosterom, Springer-Verlag, New York, 403-418.
188. Wang, T. (2004) : **"Formalization and Applications of Topological Relation of Contour Lines"**, presented paper, ISPRS 20th Congress, Istanbul, Commission IV.
189. Werner, M. (2001) : **"Status of the SRTM data processing: when will the world-wide 30m DTM data be available?"**, paper in *Photogrammetric Week '01*, edited by Dieter Fritsch and Rudolf Spiller, Herbert Wichmann Verlag, Hüthig GmbH & Co. KG, Heidelberg, 159-165.
190. Wiggenhagen, M. (2000) : **"Development of Real-time Visualization Tools for the Quality Control of Digital Terrain Models and Orthoimages"**, presented paper, ISPRS 19th Congress, Amsterdam, Commission III, Vol. 33., Part B3, 987-993.
191. Wood, J. (1996) : **"The Geomorphological Characterisation of Digital Elevation Models"**, Ph.D. Thesis, Department of Geography, University of Leicester, UK.
192. Wu, C.H. / William Mackaness (1992) : **"Automatic Contour Labeling for Scanned Topographic Maps"**, presented paper, ISPRS 17th Congress, Washington, Commission IV, Vol. 29., Part B4, 265-269.
193. Wu, C.H. (1993) : **"Automated Identification of Scanned Contour Information for Digital Elevation Models"**, Ph.D. Thesis, University of Maine, 1-121
194. Yoeli, P. (1986) : **"Computer Executed Production of a Regular Grid of Height Points from Digital Contours"**, *The American Cartographer*, Vol13., No.3, 219-229.
195. Youbing, Z. / Ji, Z. / Jiaoying, S. / Zhigeng, P. (2001) : **"A Fast Algorithm For Large Scale Terrain Walkthrough"**, *CAD/Graphics'2001*, August 22-24, Kunming, International Academic Publishers.
196. Zorin, D. (1997) : **"Subdivision and multiresolution surface representations"**, Master's thesis, University of Caltech.

## b. Internet adrese

- w1 <http://www.iso.ch>
- w2 <http://www.airbomelasemapping.com>
- w3 <http://www.research.ibm.com/journal/sj/353/sectione/verplaetse.html>
- w4 <http://www.optech.on.ca>
- w5 <http://www.laseroptronix.com>
- w6 <http://www.lh-systems.com>
- w7 <http://www.seo.com>
- w8 <http://www.topscan.de>
- w9 <http://www.toposys.com>
- w10 <http://www.topeye.com>
- w11 <http://www.3dillc.com> ili [www.eaglescan.com](http://www.eaglescan.com)
- w12 <http://www.intermap.com/>



- w13 <http://www.intermaptechnologies.com>
- w14 [http://www.ipf.tuwien.ac.at/products/produktinfo/scop/englisch/scop\\_e.html](http://www.ipf.tuwien.ac.at/products/produktinfo/scop/englisch/scop_e.html)
- w15 <http://www.nima.mil/publications/srtmfactsheet.html>
- w16 <http://www.jpl.nasa.gov/srtm/>
- w17 <http://espejos.unesco.org.uy/simplac2002/Ponencias/Geom%E1tica%202002/GE140.doc>
- w18 <http://mac.usgs.gov/mac/isb/pubs/factsheets/fs04000.html>
- w19 <http://edc.usgs.gov/products/elevation/dem.html>
- w20 <ftp://cs-archive.uwaterloo.ca/cs-archive/CS-2000-01>
- w21 <http://cres.anu.edu.au/outputs/anudem.php>
- w22 <http://www.opengl.org>
- w23 <http://msdn.microsoft.com/directx>
- w24 <http://www.vterrain.org>
- w25 <http://www.spaceimaging.com>
- w26 <http://mcmcweb.er.usgs.gov/sdts/>
- w27 <http://edcwww.cr.usgs.gov/doc/edchome/ndcddb/ndcddb.html>
- w28 <http://skagit.meas.ncsu.edu/~helena/gmslab/viz/sinter.html#Surface>
- w29 <http://www.geom.uiuc.edu/~nina/papers/pubs.html>
- w30 <http://www-2.cs.cmu.edu/~jrs/>
- w31 <http://fano.ics.uci.edu/cites/Author/Christopher-M-Gold.html>
- w32 <http://www.voronoi.com/>
- w33 <http://www.esri.com/software/arcgis>
- w34 <http://www.intergraph.com>
- w35 <http://wscg.zcu.cz>
- w36 <http://www.eas.asu.edu/cse/directory/faculty/farin.php>
- w37 <http://eros.eas.asu.edu/~farin/personal/gf.html>
- w38 <http://www.cgl.uwaterloo.ca/~smann/pub.html>
- w39 <http://www.ablesw.com/r2v/>
- w40 <http://graphics.cs.uiuc.edu/~garland/>
- w41 <http://www.disi.unige.it/person/DeflorianiL/>
- w42 <http://cs-archive.waterloo.ca/cs-archive/CS-98-15>
- w43 <http://www.inpho.de>

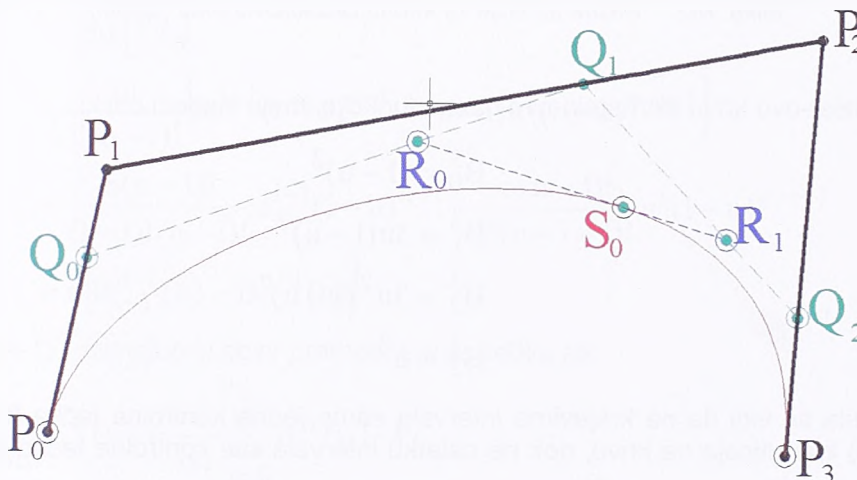
## A. BÉZIEROVE KRIVE I POVRŠI

Bézier-ove površi, uz B-splajn površi i generalizovan oblik ovih dveju površi, takozvane NURBS površi (engl. *NURBS – Non Uniform Rational B-Splines*) intenzivno se koriste za potrebe kompjuterski podržanog geometrijskog projektovanja – *CAGD*. U ovom dodatku su u jednom sažetom obliku izložene teorijske osnove iz ove problematike.

### A.1 Bézier-ove, B-splajn i NURBS krive

#### Bézier-ova kriva

Da bi se lakše shvatila suština predstavljanja površi u obliku Bézier-ovih površi, obično se polazi od analize Bézier-ovih krivih. Ove krive su definisane preko poligona Bézier-ovih kontrolnih tačaka.



Slika A-1 : Kubna Bézier-ova kriva sa kontrolnim poligonom i princip deljenja po de Casteljau algoritmu

Bézier-ova kriva  $n$ -tog stepena je definisana kao:

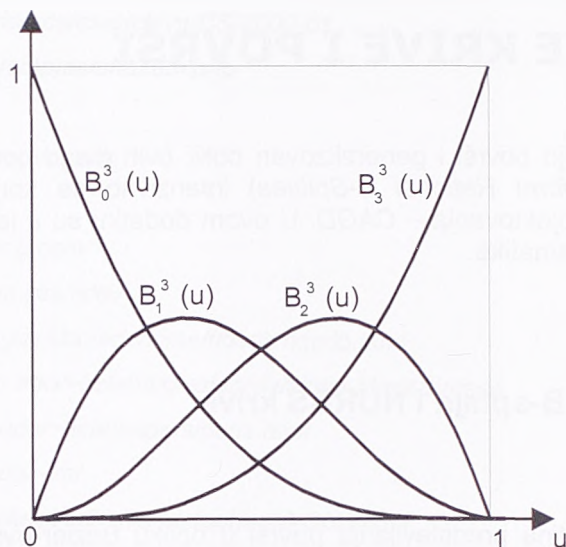
$$C^n(u) = \sum_{i=0}^n B_i^n(u) \cdot P_i \quad 0 \leq u \leq 1, \quad (\text{A-1})$$

gde su  $C^n(u)$  tačke na krivoj sračunate kao vrednosti parametra  $u$  na intervalu  $[0,1]$ ,  $P_i$  su kontrolne tačke u 2D ili 3D euklidskom prostoru, a  $B_i^n$  su bazne funkcije date preko:

$$B_i^n(u) = \binom{n}{i} u^i (1-u)^{n-i} = \frac{n!}{i!(n-i)!} u^i (1-u)^{n-i} \quad (\text{A-2})$$



gde je  $n$  stepen krive, a  $i$  je indeks tačke u listi kontrolnih tačaka. Ove Bézier-ove bazne funkcije se još nazivaju u Bernstein-ove bazne funkcije ili Bernstein-ovi polinomi. Svaka kontrolna tačka ima po jednu ovakvu funkciju i ova funkcija u stvari definiše uticaj te kontrolne tačke na Bézier-ovu krivu. Slika A-2 prikazuje izgled ovih funkcija, tj. uticaj kontrolne tačke za neku poziciju na krivoj u intervalu  $[0,1]$ , gde je  $P_0=C(0)$  i  $P_1=C(1)$ .



Slika A-2 : Bazne funkcije za kubnu Bézier-ovu krivu (splajn)

Za kubnu Bézier-ovu krivu Bernstein-ove bazne funkcije imaju sledeći oblik:

$$\begin{aligned}
 B_0^3 &= (1-u)^3 \\
 B_1^3 &= 3u(1-u)^2 \\
 B_2^3 &= 3u^2(1-u) \\
 B_3^3 &= u^3
 \end{aligned}
 \tag{A-3}$$

Iz ovih formula se vidi da na krajevima intervala samo jedna kontrolna tačka (kontrolna tačka na tom kraju intervala) ima uticaja na krivu, dok na ostatku intervala sve kontrolne tačke imaju veći ili manji uticaj.

Neka od osnovnih svojstava Bézier-ovih baznih funkcija su:

- funkcije su nenegativne, tj.  $B_i^n \geq 0$ , za svako  $i$ ,  $n$  i  $0 \leq u \leq 1$ ;
- $\sum_{i=0}^n B_i^n(u) = 1$ , za svako  $0 \leq u \leq 1$ ;
- $B_0^n(0) = B_n^n(1) = 1$ ; ovo osigurava interpolaciju krive kroz krajnje tačke;
- $B_i^n(u)$  ima tačno jedan maksimum na intervalu  $[0,1]$  i to u tački  $u=i/n$ ;
- svojstvo simetrije: za svako  $n$ , skup polinoma  $B_i^n(u)$  je simetričan s obzirom na  $u=1/2$ ;
- rekurzivna definicija: ovo omogućava jednostavne algoritme za računanje vrednosti Bernstein-ovih polinoma za zadate vrednosti  $u$ .

Neka od osnovnih svojstava Bézier-ovih krivih su:

- kontrolni poligon Bézier-ove krive stepena  $n$  sastoji se od  $n+1$  kontrolne tačke (za  $n=3$ , to su 4 tačke  $P_0, P_1, P_2$  i  $P_3$  - Slika A-1); ovaj poligon predstavlja dobru aproksimaciju krive;
- kriva interpolira početnu i krajnju tačku kontrolnog poligona (tačke  $P_0=C(0)$  i  $P_n=C(1)$ );
- prva i poslednja stranica poligona predstavljaju tangente na krivu u poslednjoj i krajnjoj tački (stranice  $P_0P_1$  i  $P_{n-1}P_n$ );
- kriva se nalazi unutar konveksnog poligona definisanog tačkama kontrolnog poligona (ovo važi i za segmente krive i delove poligona koji kontrolišu taj segment krive);
- nijedna prava linija ne preseca krivu više puta nego što je preseca kontrolni poligon krive; za Bézier-ove krive koje ne leže u jednoj ravni (3D Bézier-ove krive) nijedna ravan ne preseca krivu više puta nego kontrolni poligon krive.

Pored ovih svojstava posebno je interesantan de Casteljau-ov algoritam za određivanje položaja neke tačke na krivoj. Vrednost krive  $C(u)$  za vrednost  $u$ , na intervalu  $[0,1]$  se može dobiti deljenjem segmenata kontrolnog poligona u odnosu  $u:(1-u)$  i dobijanjem novih poligona (Slika A-1). Postupak se rekurzivno ponavlja sa novim poligonima sve dok se poligon ne svede na jedan segment. Njegovim deljenjem takođe u odnosu  $u:(1-u)$  dobija se tražena tačka na krivoj (tačka  $S_0$ , Slika A-1). Interesantno je napomenuti da se ovim postupkom Bézier-ova kriva deli na dve Bézier-ove krive istog stepena. Dužine ovih krivih su u odnosu  $u:(1-u)$ . Njihovi kontrolni poligoni određeni su de Casteljau-ovim algoritmom. Za prikazanu kubnu Bézier-ovu krivu to su poligoni  $(P_0, Q_0, R_0, S_0)$  i  $(S_0, R_1, Q_2, P_3)$  (Slika A-1).

Izvod Bézier-ove krive se može dobiti diferenciranjem formule (A-1). Pre toga, diferencirajmo Bernstein-ovog polinom dat formulom (A-2):

$$\begin{aligned} \frac{d}{du} B_i^n(u) &= \frac{d}{du} \left[ \binom{n}{i} u^i (1-u)^{n-i} \right] \\ &= \frac{n!}{i!(n-i)!} \left[ i u^{i-1} (1-u)^{n-i} - (n-i) u^i (1-u)^{n-i-1} \right] \\ &= \frac{n(n-1)!}{(i-1)!(n-i)!} u^{i-1} (1-u)^{n-i} - \frac{n(n-1)!}{i!(n-i-1)!} u^i (1-u)^{n-i-1} \\ &= n \left[ B_{i-1}^{n-1}(u) - B_i^{n-1}(u) \right] \end{aligned} \quad (A-4)$$

Diferenciranjem (A-1) i uzimajući u obzir prethodni izraz dobija se:

$$\begin{aligned} \frac{d}{du} C^n(u) &= \frac{d}{du} \sum_{i=0}^n B_i^n(u) \cdot P_i \\ &= \sum_{i=0}^n \frac{d}{du} B_i^n(u) \cdot P_i \\ &= n \sum_{i=0}^n \left[ B_{i-1}^{n-1}(u) - B_i^{n-1}(u) \right] \cdot P_i \\ &= n \left[ \sum_{i=0}^n B_{i-1}^{n-1}(u) \cdot P_i - \sum_{i=0}^{n-1} B_i^{n-1}(u) \cdot P_i \right] \\ &= n \left[ \sum_{i=0}^{n-1} B_{i-1}^{n-1}(u) \cdot P_{i+1} - \sum_{i=0}^{n-1} B_i^{n-1}(u) \cdot P_i \right] \\ &= n \sum_{i=0}^{n-1} [P_{i+1} - P_i] \cdot B_i^{n-1}(u), \end{aligned} \quad (A-5)$$



pri čemu je za izraz (\*) korišćena vrednost funkcije  $B_i^n$  po definiciji za  $i \in \{0, \dots, n\}$ .

Prema tome, prvi izvod Bézier-ove krive reda  $n$  je dat formulom:

$$\frac{d}{du} C^n(u) = n \sum_{i=0}^{n-1} [P_{i+1} - P_i] \cdot B_i^{n-1}(u) \quad (A-6)$$

Ovo znači da je izvod Bézier-ove krive takođe Bézier-ova kriva čije su kontrolne tačke date diferenciranjem kontrolnih tačaka polazne krive. Ovaj izvod krive se još naziva i *hodograf* (engl. *hodograph*) (Adnađević 1991).

Može se pokazati da se  $r$ -ti izvod Bézier-ove krive reda  $n$  može napisati u obliku:

$$(C^n)^{(r)}(u) = \frac{n!}{(n-r)!} \sum_{i=0}^{n-r} \Delta^r P_i \cdot B_i^{n-r}(u) \quad (A-7)$$

gde su:

$$\begin{aligned} \Delta P_i &= P_{i+1} - P_i \\ \Delta^2 P_i &= \Delta(\Delta P_i) = \Delta(P_{i+1} - P_i) = P_{i+2} - 2P_{i+1} + P_i \\ &\vdots \\ \Delta^r P_i &= \sum_{k=0}^r (-1)^k \binom{r}{k} P_{i+r-k} \end{aligned} \quad (A-8)$$

Sve što je rečeno odnosi se i na Bézier-ove krive u prostoru, jer se i tada kriva parametarski predstavlja preko parametra  $u$ , samo su kontrolne tačke date u trodimenzionalnom prostoru preko vektora  $(x, y, z)$ .

### B-Splajn krive

Problem sa Bézier-ovom krivom je u tome što je za krivu koja ima komplikovan oblik neophodno korišćenje Bézier-ove krive visokog stepena, ili se mora ići na razbijanje na više pojedinačnih Bézier-ovih krivih koje se nastavljaju u kontinuitetu. B-splajn krive prevazilaze ove probleme. Ove krive su polinomske krive i one predstavljaju generalizaciju Bézier-ovih krivih. Njima je omogućeno modeliranje krivih korišćenjem više segmenata krive sa manjim stepenom polinoma. Pored toga, one su jednostavnije za geometrijsko projektovanje i interaktivan rad. B-splajn kriva stepena  $m$  može biti definisana sa  $n+1$  kontrolnom tačkom  $P_0, P_1, \dots, P_n$ , vektorom čvorova  $\mathbf{U} = \{u_0, u_1, \dots, u_m\}$  i formulom:

$$C^m(u) = \sum_{i=0}^n N_{i,m}(u) \cdot P_i \quad (A-9)$$

gde su  $N_{i,m}(u)$  B-splajn bazne funkcije u vidu polinoma stepena  $m$ . Skup  $\mathbf{U}$  se sastoji od od  $m+1$  neopadajućih realnih brojeva koji dele krivu na manje intervale. Ako su ovi intervali jednaki onda se kriva naziva uniformnom, inače je neuniformna. Za sve B-splajn funkcije se uzima da je interval domena za bazne funkcije  $[0, 1]$ .

$i$ -ta B-splajn bazna funkcija stepena  $p$  ( $N_{i,m}(u)$ ) je definisana rekursivno:

$$\begin{aligned} N_{i,0}(u) &= \begin{cases} 1 & \text{ako je } u_i \leq u \leq u_{i+1} \\ 0 & \text{za ostale vrednosti } u \end{cases} \\ N_{i,p}(u) &= \frac{u - u_i}{u_{i+p} - u_i} N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+p+1} - u}{u_{i+p+1} - u_{i+1}} N_{i+1,p-1}(u) \end{aligned} \quad (A-10)$$

Kao i Bézier-ova i B-splajn kriva ima neka vrlo korisna svojstva od kojih su najvažnija:

- ako je  $n=p$  i  $U=\{0, \dots, 0, 1, \dots, 1\}$  onda kriva  $C^m(u)$  postaje Bézier-ova kriva;
- kriva interpolira krajnje tačke  $P_0$  i  $P_n$ ;
- kriva je sadržana u konveksnom telu formiranom od tačaka kontrolnog poligona;
- lokalna kontrola – pomeranjem kontrolne tačke  $P_i$  menja se oblik krive samo u intervalu  $[u_i, u_{i+p+1})$ ;
- kontrolni poligon verno aproksimira krivu; za razliku od Bézier-ove krive ova aproksimacija može biti bolja ili lošija u zavisnosti od izabranog stepena krive.

### NURBS krive

NURBS kriva stepena  $p$  se definiše kao:

$$C^p(u) = \frac{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) \cdot w_i \cdot P_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) \cdot w_i} \quad 0 \leq u \leq 1, \quad (\text{A-11})$$

gde su, kao i do sada,  $P_i$  kontrolne tačke,  $N_{i,p}(u)$  B-splajn bazne funkcije  $p$ -tog stepena definisane nad neperiodičnim i neuniformnim vektorom čvorova. Veličine  $w_i$  su težine koje su veće od nule za sve  $i$ .

Ako se uvede zamena:

$$R_{i,p}(u) = \frac{N_{i,p}(u) \cdot w_i}{\sum_{j=0}^n N_{j,p}(u) \cdot w_j} \quad (\text{A-12})$$

dobija se drugi oblik NURBS krive  $p$ -tog stepena:

$$C^p(u) = \sum_{i=0}^n R_{i,p} \cdot P_p \quad (\text{A-13})$$

U gornjoj formuli  $R_{i,p}(u)$  su *racionalne bazne funkcije*. One imaju ista svojstva kao i B-splajn bazne funkcije uz dodatak svojstva koje je određeno uvođenjem težina  $w_i$ . Geometrijska svojstva NURBS krivih su vrlo slična svojstvima koje imaju Bézier-ove i B-splajn krive. Pored ostalih, to su: interpolacija krajnjih tačaka, sadržanost krive u konveksnom telu kontrolnog poligona i lokalna kontrola.

## A.2 Bézier-ove, B-splajn i NURBS površi

### Bézier-ova površ

Bézier-ova površ se može definisati preko Bézier-ovih krivih i njihovih kontrolnih poligona na sledeći način. Posmatrajmo mrežu (grid) od  $(n+1) \times (m+1)$  tačaka u 3D prostoru, pri čemu rastojanja tačaka u mreži ne moraju biti jednaka. Svaka kolona, odnosno vrsta mreže tačaka definiše jedan Bézier-ov kontrolni poligon i njemu odgovarajuću Bézier-ovu krivu stepena  $n$ , odnosno  $m$ . Bézier-ova površ koja interpolira 8 ovako definisanih Bézier-ovih krivih se može predstaviti formulom:



$$S(u, v) = \sum_{j=0}^m \sum_{i=0}^n B_i^n(u) \cdot B_j^m(v) \cdot P_{i,j}, \quad 0 \leq u, v \leq 1, \quad (\text{A-14})$$

gde su  $S(u, v)$  tačke na površi sračunate za vrednosti parametara  $u$  i  $v$  koji su u intervalu  $[0, 1]$ ,  $P_{i,j}$  su kontrolne tačke u 3D euklidskom prostoru, a  $B_i^n(u)$  i  $B_j^m(v)$  su bazne funkcije date preko formule (A-2). Ovakve površi se još nazivaju i **tenzor-produkt Bézier-ove zakrpe**.

Bézier-ova površ poseduje mnoga svojstva Bézier-ovih krivih, uključujući i to da ona leži unutar konveksnog tela formiranog od tačaka kontrolnog poligona, da interpolira krajnje tačke kontrolnog poligona (tačke u uglovima kontrolnog grida), itd.

### B-splajn površ

B-splajn površi se dobijaju na sličan način. B-splajn površ stepena  $p \times q$  ima bidirekcionu mrežu kontrolnih tačaka, dva vektora čvorova i predstavlja proizvod dve B-splajn funkcije:

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) \cdot P_{i,j}, \quad (\text{A-15})$$

gde je

$$\begin{aligned} U &= \{0, \dots, 0, u_{p+1}, \dots, u_{r-p-1}, 1, \dots, 1\} & r &= n + p + 1 \\ V &= \{0, \dots, 0, u_{q+1}, \dots, u_{s-q-1}, 1, \dots, 1\} & s &= m + q + 1 \end{aligned} \quad (\text{A-16})$$

### NURBS površ

Analogno, kao i za NURBS krive, definiše se i NURBS površ stepena  $p$  u pravcu  $u$  i stepena  $q$  u pravcu  $v$ , sa mrežom kontrolnih tačaka  $P_{i,j}$ , njihovim težinama  $w_{i,j}$  i dva vektora čvorova:

$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) \cdot w_{i,j} \cdot P_{i,j}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) \cdot w_{i,j}}, \quad 0 \leq u, v \leq 1 \quad (\text{A-17})$$

Ako se, slično kao i kod NURBS krivih, uvede:

$$R_{i,j}(u, v) = \frac{N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) \cdot w_{i,j} \cdot P_{i,j}}{\sum_{k=0}^n \sum_{l=0}^m N_{k,p}(u) N_{l,q}(v) \cdot w_{k,l}}, \quad (\text{A-18})$$

dobija se da je NURBS površ data formulom:

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m R_{i,j}(u, v) \cdot P_{i,j} \quad (\text{A-19})$$

NURBS, kao i B-splajn površi poseduju sva svojstva koja imaju i Bézier-ove površ uz dodatak lokalne kontrole oblika delovanjem na kontrolne tačke i težine (za NURBS površi) i druge korisna svojstva.

Bézier-ove, B-splajn i NURBS tenzor produkt površi, definisane na gore opisani način su pogodne za modeliranje površi korišćenjem pravougaonih kontrolnih mreža. Međutim, one nisu tako efikasne za slučaj modeliranja objekata sa proizvoljnom topologijom.

### A.2.1 Baricentrične koordinate

Trougaoni domen se određuje kao projekcija prostornog trougla na neku ravan. U opštem slučaju to može biti ravan koja lokalno aproksimira teren. Ovo je neophodno raditi kada se radi o 3D triangulaciji, gde je moguće da normale na trouglove budu horizontalne ili usmerene na dole. Za slučaj 2D triangulacije, koja se i razmatra u okviru ovog istraživanja, normale su uvek usmerene na gore, pa ta ravan na koju se trougao projektuje može biti jednostavno  $XOY$ , ili bilo koja druga horizontalna ravan. U svakom slučaju vrednost funkcije  $f$  za neku tačku iz domena  $T$  predstavlja normalno rastojanje od površinske zakrpe do ravni u kojoj se projektuje trougao.

Kod proračuna trougaonih zakrpa zgodno je sa prostornog koordinatnog sistema  $XYZ$  preći na neki nezavisni koordinatni sistem koji je lokalan u odnosu na posmatrani trougao. Baricentrične koordinate su u tom smislu pogodne, jer zavise samo od položaja temena trougla u prostoru.

Koncept baricentričnih koordinata je usko povezan sa linearnom interpolacijom. Neka su  $A$ ,  $B$  i  $C$  tri kolinearne tačke u 3D euklidskom prostoru takve da je:

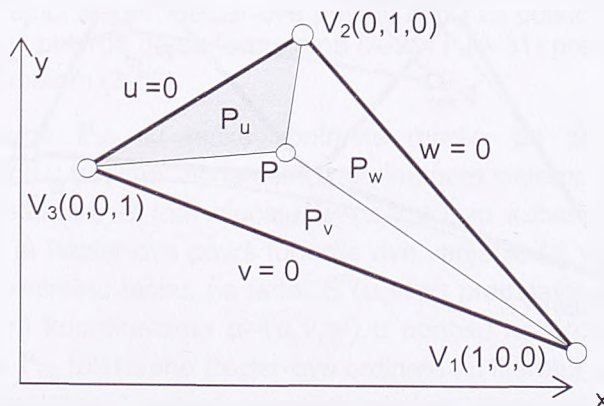
$$C = \alpha A + \beta B, \quad \alpha + \beta = 1 \quad (\text{A-20})$$

Onda se  $\alpha$  i  $\beta$  nazivaju *baricentrične koordinate* tačke  $C$  u odnosu na  $A$  i  $B$ . Takođe,  $C$  je *baricentrična kombinacija* (istovremeno i afina kombinacija) tačaka  $A$  i  $B$ . Baricentrične koordinate se koriste da izraze poziciju tačke  $C$  nezavisno od osnove vektorskog koordinatnog sistema. Baricentrične koordinate tačke  $C$  se ne menjaju kada se  $A$ ,  $B$  i  $C$  podvrgnu istim linearnim transformacijama (pomeranje, rotiranje i skaliranje).

Ovak koncept se može proširiti da bi se opisala pozicija tačke u okviru trougaone površi. Bilo koja  $P$  tačka iz trougaonog domena, tj. trougla  $T$ , može se parametarski predstaviti preko njenih baricentričnih koordinata  $\mathbf{u}=(u, v, w)$  i temena trougla  $V_i(x_i, y_i, z_i)$ :

$$P(u, v, w) \in T = uV_1 + vV_2 + wV_3, \quad u + v + w = 1, \quad |\mathbf{u}| = 1, \quad (\text{A-21})$$

Vrednosti baricentričnih koordinata predstavljaju odnos dela površine u trouglu naspram posmatrane tačke i ukupne površine trougla (površine  $P_u$ ,  $P_v$ , i  $P_w$ , Slika A-3). Zato su vrednosti ovih koordinata nenegativne vrednosti za sve tačke koje padaju unutar trougla  $T$ . Treba voditi računa o tome da su samo dve koordinate nezavisne, zbog uslova u jednačini (A-21) da je zbir ovih koordinata jednak 1. Ako tačka  $P$  pada na neku od stranica trougla, onda joj je jedna baricentrična koordinata 0. Ako tačka  $P$  pada na teme trougla, onda su joj dve baricentrične koordinate 0. Ako tačka  $P$  pada van trougla, onda joj je bar jedna baricentrična koordinata negativna.



Slika A-3 : Baricentrične koordinate trougla



$$\begin{aligned} x &= u \cdot x_1 + v \cdot x_2 + w \cdot x_3 \\ y &= u \cdot y_1 + v \cdot y_2 + w \cdot y_3 \\ 1 &= u + v + w \end{aligned} \tag{A-22}$$

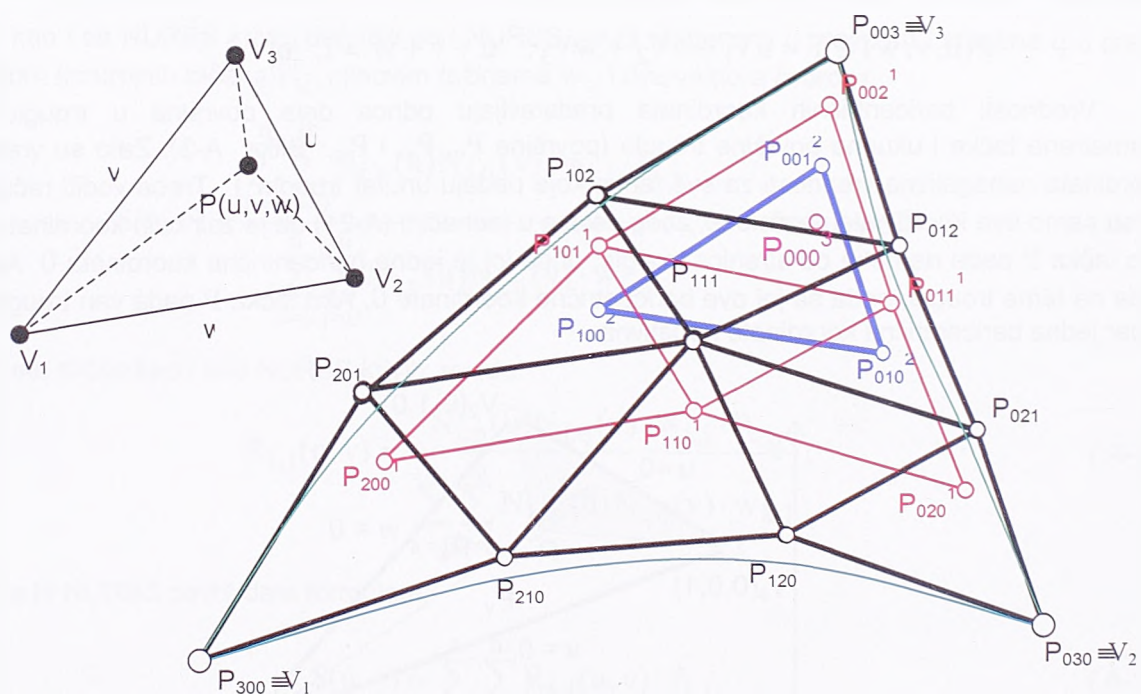
$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \frac{1}{2\Delta} \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ x \\ y \end{bmatrix} \tag{A-23}$$

$$\Delta = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \tag{A-24}$$

$$\begin{aligned} a_i &= x_j y_k - x_k y_j \\ b_i &= y_j - y_k \\ c_i &= x_k - x_j \end{aligned} \tag{A-25}$$

## A.2.2 Bézier-ovi trouglovi

Bézier-ova kontrolna mreža za Bézier-ov trougao stepena  $n$  ima trougaonu strukturu (Slika A-4).



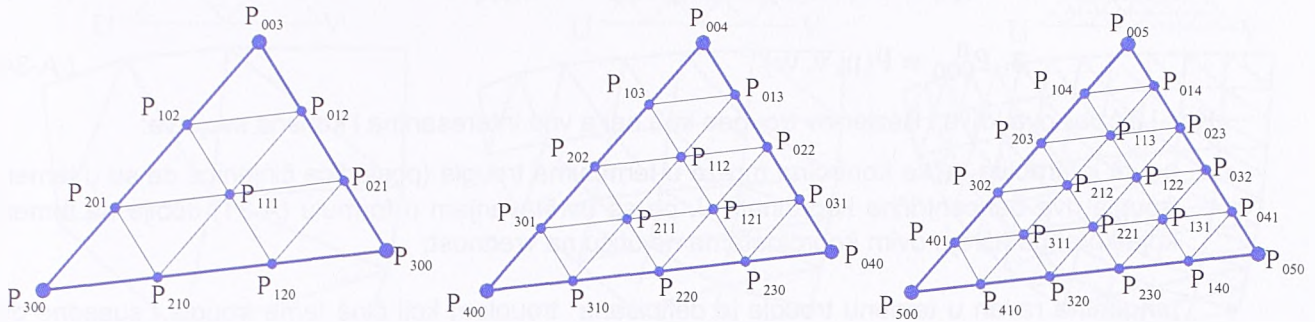
Slika A-4 : Kontrolna mreža za kubni Bézier-ov trougao i grafički prikaz rekurzivnog de Casteljau algoritma za proračun vrednosti površi u tački  $P(u, v, w) =: P_{000}^3$

Kako se može zaključiti sa prethodne slike, za sve tačke  $P_{ijk}$  kontrolnog poligona važi da je:

$$i + j + k = n, \quad |i| = 1, \quad i, j, k \geq 0, \tag{A-26}$$

gde je  $n$  stepen trougaone zakrpe. Ukupan broj kontrolnih tačaka se dobija preko formule:

$$M = \binom{n+2}{2} = \frac{(n+1)(n+2)}{2} \quad (\text{A-27})$$



Slika A-5 : Numeracija i raspored kontrolnih tačaka za Bézier-ove trouglove trećeg, četvrtog i petog stepena

Koristeći parametarsko predstavljanje preko baricentričnih koordinata  $\mathbf{u}=(u,v,w)$  i Bernstein-ovih polinoma, trougaona Bézier-ova površ stepena  $n$  se može predstaviti preko formule:

$$S^n(u, v, w) = \sum_{i+j+k=n} B_{ijk}^n(u, v, w) \cdot \mathbf{P}_{ijk} = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} B_{ijk}^n(u, v, w) \cdot \mathbf{P}_{ijk}, \quad (\text{A-28})$$

gde se Bernstein-ovi polinomi računaju kao:

$$B_{ijk}^n(\mathbf{u}) = B_{ijk}^n(u, v, w) = \frac{n!}{i!j!k!} u^i v^j w^k, \quad (\text{A-29})$$

i važi da je:

$$0 \leq u, v, w \leq 1, \quad u + v + w = 1, \quad i + j + k = n, \quad i, j, k \geq 0 \quad (\text{A-30})$$

Prema tome, Bézier-ova trougaona površ reda  $n$  je data formulom:

$$S^n(u, v, w) = \sum_{i+j+k=n} \frac{n!}{i!j!k!} u^i v^j w^k \cdot \mathbf{P}_{ijk} = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} \frac{n!}{i!j!k!} u^i v^j w^k \cdot \mathbf{P}_{ijk} \quad (\text{A-31})$$

Treba primetiti da je broj kontrolnih tačaka sračunat po formuli (A-27), tj. broj članova u sumi po formuli (A-28) isti za odgovarajući stepen Bézier-ove površi, kao i za polinom istog stepena predstavljen formulom (3-80). To je ujedno i potvrda da se formulama (A-28) i (A-31) predstavlja površ koja je u stvari polinom stepena  $n$  izražen formulom (3-80).

U prethodnim formulama  $\mathbf{P}_{ijk}$  su tačke kontrolne mreže, pa se tako dobija parametarsko predstavljanje Bézier-ove površi u trodimenzionalnom koordinatnom sistemu, tj.  $S^n(u,v,w)$  je skup tačaka sa trodimenzionalnim koordinatama. U tom slučaju  $\mathbf{u}=(u,v,w)$  su koordinate u ravni parametrizacije. Kada se razmatra slučaj gde je Bézier-ova površ funkcija dve varijable  $(x,y)$  onda se umesto  $\mathbf{P}_{ijk}$  koristi vrednost  $z$  koordinate za tu kontrolnu tačku, pa tada  $S^n(u,v,w)$  predstavlja skup vrednosti  $z$  koordinate za tačke zadate baricentričnim koordinatama  $\mathbf{u}=(u,v,w)$  u odnosu na projekciju Bézier-ovog trougla u ravni XOY. U tom slučaju su  $\mathbf{P}_{ijk}$  takozvane Bézier-ove ordinate i u literaturi se obično označavaju malim slovima:  $b_{ijk}$ ,  $c_{ijk}$  i slično.

Slično kao i kod Bézier-ove krive i kod Bézier-ove površi može se primeniti de Casteljau-ov rekurzivni algoritam:



$$1. P_{ijk}^0 = P_{ijk} \quad (A-32)$$

$$2. P_{opq}^r = uP_{o+1,p,q}^{r-1} + vP_{o,p+1,q}^{r-1} + wP_{o,p,q+1}^{r-1}, \quad o + p + q + r = n \quad (A-33)$$

$$3. P_{000}^n \equiv P(u, v, w) \quad (A-34)$$

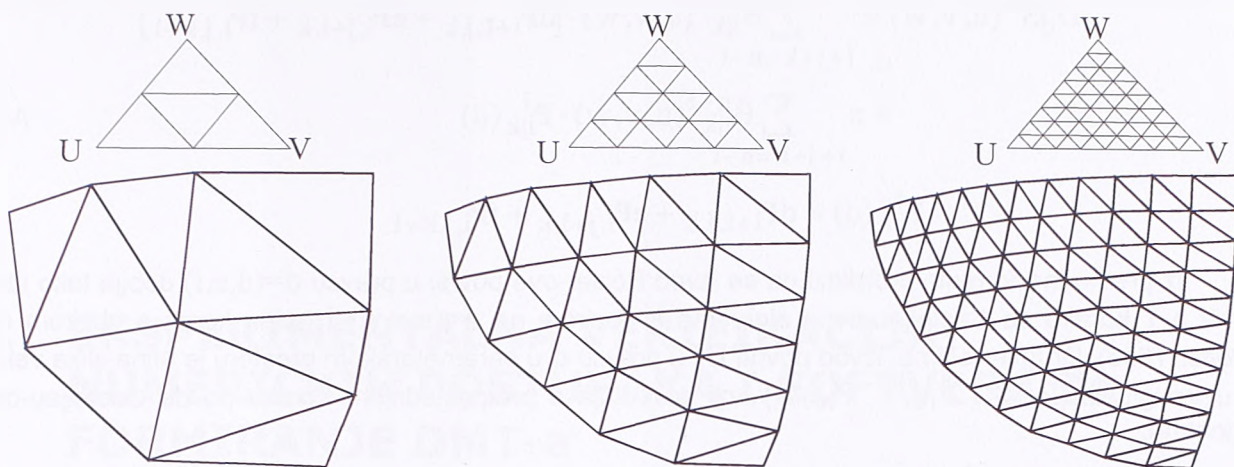
Kao i Bézier-ova kriva i Bézier-ov trougao ima neka vrlo interesantna i korisna svojstva:

- površ interpolira tačke kontrolne mreže u temenima trougla (posledica činjenice da su u temenu trougla dve baricentrične koordinate 0, pa se uvrštavanjem u formulu (A-31) dobija da temena koja korespondiraju ovim koordinatama ne utiču na vrednost;
- tangentna ravan u temenu trougla je definisana trouglom koji čine teme trougla i susedne dve tačke kontrolne mreže (za teme  $P_{n00}$ , to su temena  $P_{n00}$ ,  $P_{n-1,1,0}$  i  $P_{n-1,0,1}$ , analogno i za ostala dva temena  $P_{0n0}$  i  $P_{00n}$ );
- tangentna ravan na površ u tački  $P(u,v,w):=P_{000}^n$  je definisana trouglom  $P_{100}^{n-1}, P_{010}^{n-1}, P_{001}^{n-1}$  dobijenim de Casteljau-ovim algoritmom za konstrukciju površi; ovo svojstvo se može iskoristiti za proračun prvih izvoda površi, odnosno normale na površ u tački  $P(u,v,w)$ ;
- granične krive Bézier-ovog trougla stepena  $n$  su Bézier-ove krive stepena  $n$  (ovo je posledica toga što je za sve tačke na stranici trougla jedna baricentrična koordinata 0, pa se formula (A-81) svodi na formule za Bézier-ovu krivu; kontrolni poligoni ovih krivih su granični poligoni kontrolne mreže Bézier-ovog trougla; ostale tačke mreže se nazivaju *unutrašnje tačke*);
- Bézier-ov trougao stepena  $n$  može biti napisan kao Bézier-ov trougao stepena  $n+1$  sa Bézier-ovim tačkama  $P_{ijk}^*$ ; ovaj postupak se naziva podizanje stepena (engl. *degree elevation*); nove kontrolne tačke se dobijaju po formuli:

$$P_{ijk}^* = \frac{1}{n+1} (iP_{i-1,j,k} + jP_{i,j-1,k} + kP_{i,j,k-1}), \quad i + j + k = n + 1 \quad (A-35)$$

$$S^m(u, v, w) = \sum_{i+j+k=m} B_{ijk}^m(u, v, w) \cdot P_{ijk}^* = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^{m-i} B_{ijk}^m(u, v, w) \cdot P_{ijk}^*, \quad m = n + 1 \quad (A-36)$$

- površ je u potpunosti sadržana u konveksnom telu formiranom od tačaka kontrolnog poligona;
- unutrašnje tačke kontrolnog poligona  $P_{ijk}$ , za koje je  $i, j, k \neq 0$  nemaju uticaja na granične krive, ove krive zavise samo od tačaka na posmatranoj stranici trougla i te tačke čine kontrolni poligon tih krivih;
- polje tangentnih ravni u tačkama graničnih krivih zavise samo od tačaka na granici kontrolne mreže i od tačaka u sledećem redu mreže (ovo je detaljno razrađeno na strani 99);
- izvod površi  $D_d$  u pravcu  $\mathbf{d}=(d,e,f)$  u parametarskom prostoru je afina slika vektora  $\mathbf{d}$  u trouglu  $\Delta (P_{100}^{n-1}, P_{100}^{n-1}, P_{100}^{n-1})$  koji se dobija u pretposlednjem koraku po de Casteljau-ovom algoritmu;
- primenom de Casteljau-ovog algoritma mogu se rekursivno dobiti nove kontrolne mreže i izvršiti podela Bézier-ovog trougla na manje Bézier-ove trouglove istog stepena; naime, tokom proračuna tačke  $P(u,v,w)$  po ovom algoritmu dobijaju se tri nova parametarska trougla  $\Delta V_1 V_3 P$ ,  $\Delta V_3 V_2 P$  i  $\Delta V_2 V_1 P$ ; novonastale kontrolne mreže leže bliže površi nego polazna mreža; ako se parametarski prostor podeli na četiri jednaka trougla tako što se na svakoj stranici izabere po jedna tačka na sredini stranice, dobijaju se četiri nove kontrolne mreže i njima korespondetne trougaone zakrpe; postupak se može nastaviti daljim deljenjem; dobijene kontrolne mreže brzo konvergiraju ka samoj površi, tj. sve je bolje aproksimiraju.



Slika A-6 : Postupak deljenja Bézier-ovog trougla sukcesivnim ubacivanjem novih tačaka na sredinama stranica trouglova (gore) i formiranje novih kontrolnih mreža (dole)

Kod računanja izvoda Bézier-ove površi koristi se specifičan pristup. Pošto baricentrične koordinate nisu međusobno nezavisne veličine, diferenciranje se ne vrši u odnosu na njih, već u pravcu nekog vektora u ravni. Na taj način se dobija *izvod u pravcu*. Ovo je inače vrlo korisno za proračun same Bézier-ove površi, pošto se vrlo često zahteva da izvodi površi budu kontinualni u određenim pravcima. Izvod površi  $S(u,v,w)=S(\mathbf{u})$  u pravcu  $\mathbf{d}=(d,e,f)$  definisan je kao (Farin 1993):

$$D_{\mathbf{d}}S(u, v, w) = d \frac{\partial}{\partial u} S(u, v, w) + e \frac{\partial}{\partial v} S(u, v, w) + f \frac{\partial}{\partial w} S(u, v, w) \quad (\text{A-37})$$

Prvi izvod Bézier-ove površi u pravcu  $D_{\mathbf{d}}$  se dobija na osnovu prethodne formule i diferenciranjem izraza (A-31):

$$D_{\mathbf{d}}S^n(u, v, w) = d \frac{\partial}{\partial u} \sum_{|i|=n} B_{ijk}^n(\mathbf{u}) \cdot \mathbf{P}_{ijk} + e \frac{\partial}{\partial v} \sum_{|i|=n} B_{ijk}^n(\mathbf{u}) \cdot \mathbf{P}_{ijk} + f \frac{\partial}{\partial w} \sum_{|i|=n} B_{ijk}^n(\mathbf{u}) \cdot \mathbf{P}_{ijk} \quad (\text{A-38})$$

Parcijalni izvodi površi po baricentričnim koordinatama se dobijaju kao:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial u} S^n(u, v, w) &= \frac{\partial}{\partial u} \sum_{i+j+k=n} B_{ijk}^n(u, v, w) \cdot \mathbf{P}_{ijk} \\ &= \frac{\partial}{\partial u} \sum_{i+j+k=n} \frac{n!}{i!j!k!} u^i v^j w^k \cdot \mathbf{P}_{ijk} \\ &= n \sum_{i+j+k=n} \frac{(n-1)!}{(i-1)!j!k!} u^{i-1} v^j w^k \cdot \mathbf{P}_{ijk} \\ &= n \sum_{i+j+k=n-1} \frac{(n-1)!}{(i)!j!k!} u^i v^j w^k \cdot \mathbf{P}_{i+1,j,k} \\ &= n \sum_{i+j+k=n-1} B_i^{n-1}(u, v, w) \cdot \mathbf{P}_{i+1,j,k} \end{aligned} \quad (\text{A-39})$$

Analogno se dobijaju i parcijalni izvodi za druge dve baricentrične koordinate. Uvrštavanjem dobijenih izraza u (A-38) dobija se da je:



$$\begin{aligned}
 D_d S^n(u, v, w) &= \sum_{i+j+k=n-1} B_{ijk}^{n-1}(u, v, w) \cdot [dP_{i+1,j,k} + eP_{i,j+1,k} + fP_{i,j,k+1}] \\
 &= n \sum_{i+j+k=n-1} B_{ijk}^{n-1}(u, v, w) \cdot P_{ijk}^1(d) \qquad \text{A-40) } \\
 P_{ijk}^1(d) &= dP_{i+1,j,k} + eP_{i,j+1,k} + fP_{i,j,k+1}
 \end{aligned}$$

Iz prethodne formule proizilazi da se izvod Bézier-ove površi u pravcu  $\mathbf{d}=(d,e,f)$  dobija tako što se izvrši  $n-1$  koraka de Casteljau-ovog algoritma s obzirom na  $\mathbf{u}=(u,v,w)$  i jedan korak s obzirom na  $\mathbf{d}$  (Reiter 1996). Drugim rečima, izvod površi  $D_d$  u pravcu  $\mathbf{d}$  u parametarskom prostoru je afina slika vektora  $\mathbf{d}$  u trouglu  $\Delta (P_{100}^{n-1}, P_{100}^{n-1}, P_{100}^{n-1})$  koji se dobija u pretposlednjem koraku po de Casteljau-ovom algoritmu.

Izvodi površi u odnosu na  $x$  i  $y$  koordinate se mogu dobiti diferenciranjem izraza (A-88), vodeći računa o odnosu između baricentričnih koordinata  $(u,v,w)$  i pravouglih koordinata  $(x,y)$  koji je dat formulama (A-83), (A-84) i (A-85).

Detaljnija materija koja je posvećena Bézier-ovim krivama i površima, može se naći u knjigama i naučnim radovima koji se bave kompjuterski podržanim geometrijskim projektovanjem (Farin 1993, Reiter 1996).

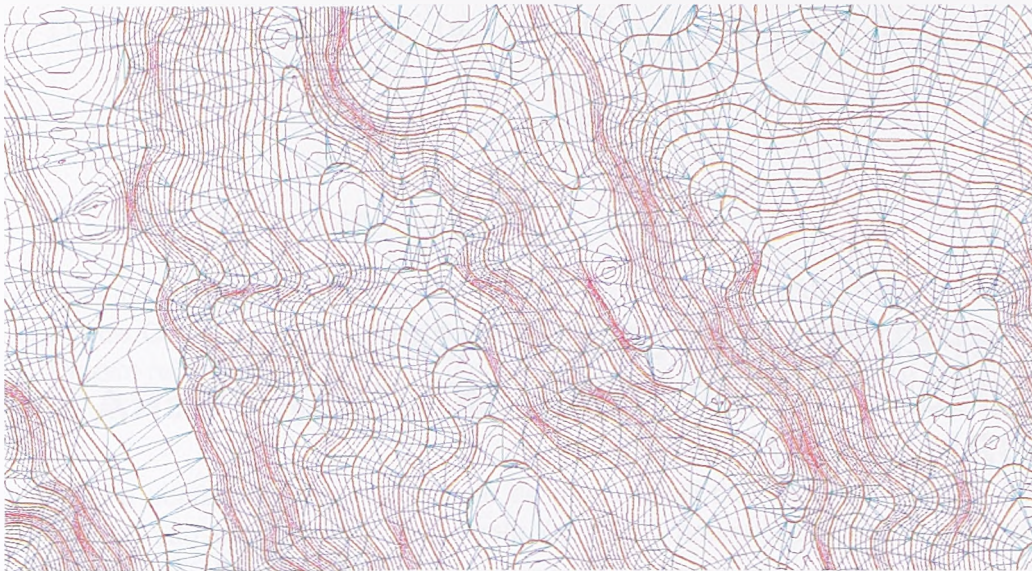
## **B. EKSPERIMENTALNA VERIFIKACIJA NUMERIČKIH POSTUPAKA I SOFTVERA ZA FORMIRANJE DMT-a**

### **B.1 Algoritmi za formiranje DMT-a na osnovu izohipsi**

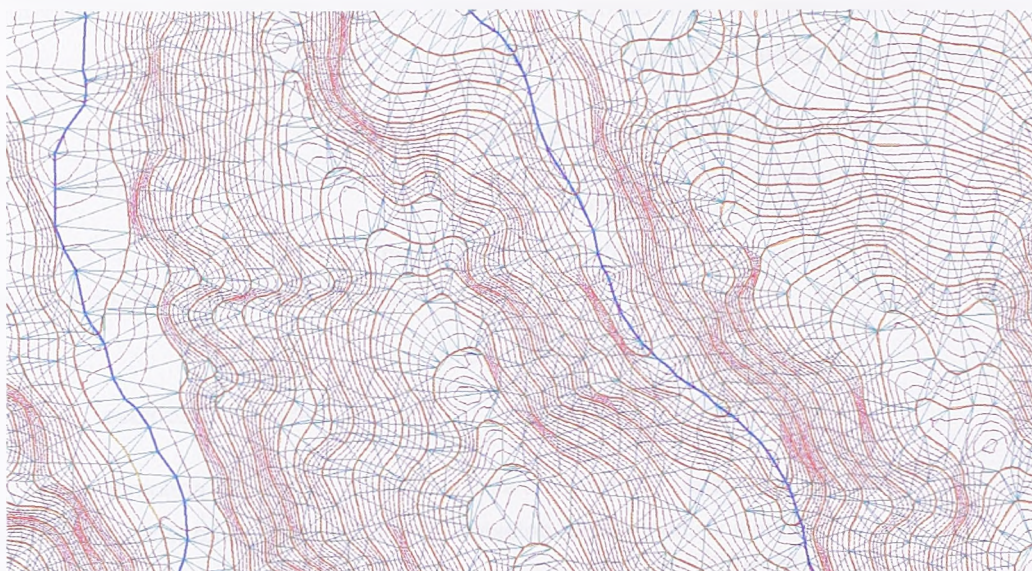
#### **KORIŠĆENE OZNAKE ZA PARAMETRE PROCESIRANJA:**

- CFDT – Konformna Delaunay-jeva triangulacija.
- MCS – Maksimalna dužina segmenta izohipse u [m]. Tokom triangulacije ubacuju se nove tačke duž izohipsi da bi se ovo ostvarilo.
- DL – Korišćeni algoritam za automatsku detekciju strukturnih linija:
  - ME – središnje tačke linija koje povezuju sredine stranica TIN-a između tačaka iste izohipse,
  - GC – osrednjena težišta trouglova,
  - CC – centri opisanih kružnica trouglova,
  - EM – središnje tačke stranica TIN-a između tačaka iste izohipse,
  - VS – srednje ose na osnovu Voronoi skeleta.
- LB – Tretiranje automatski detektovanih strukturnih linija terena kao prelomnih linija.
- LIH – Preračunavanje visina za tačke detektovanih strukturnih linija korišćenjem linearne interpolacije između izohipsi.
- LINK – Povezivanje detektovanih strukturnih linija, tj. njihovo produženje do preseka sa izohipsom nagore i nadole.
- MaxSDV – Prag za interpolaciju visina za tačke detektovanih strukturnih linija u [m]. Ako je odstupanje kubne od linearne površi (SDV) za neki trougao manje od zadate vrednosti koristi se kubna. U suprotnom, koristi se linearna interpolacija.
- SPLINE – Splajnovanje detektovane strukturne primenom B-splajn interpolanta trećeg stepana sa aproksimacijom po metodi najmanjih kvadrata. Vrednost u tabeli predstavlja rastojanje između susednih tačaka na strukturnoj liniji u [m].
- RTSDV – Profinjavanje TIN-a u delovima gde se površ terena dobijena po kubnoj interpolaciji razlikuje od površi dobijene korišćenjem linearne interpolacije (SDV) više od specificiranog praga. Ova vrednost je u u tabeli data u [m].
- ITER – Maksimalan broj iteracija kod profinjavanja TIN-a.

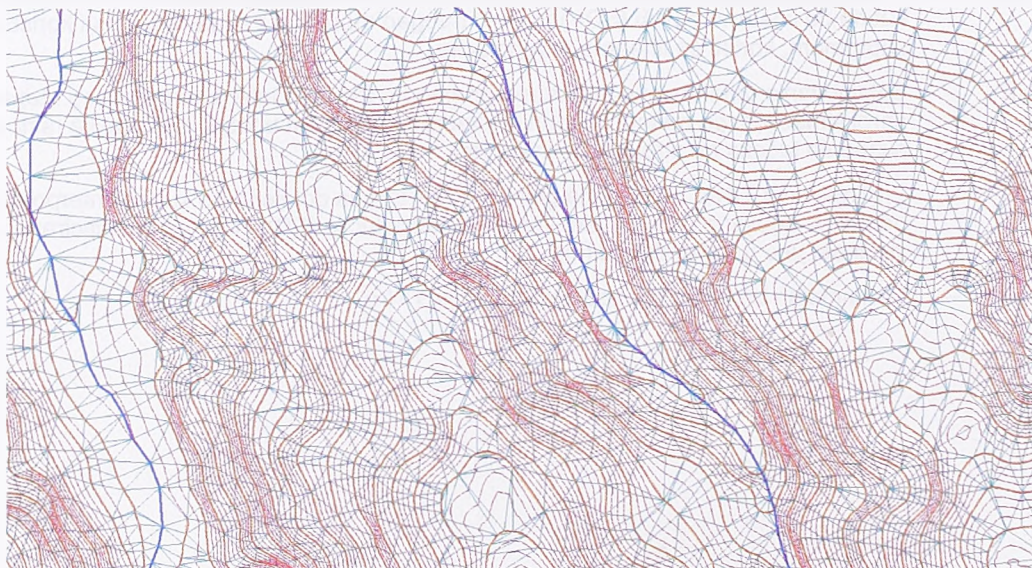




Slika B-1 : DMT formiran samo na osnovu podataka izohipsi, bez korišćenja hidrografije

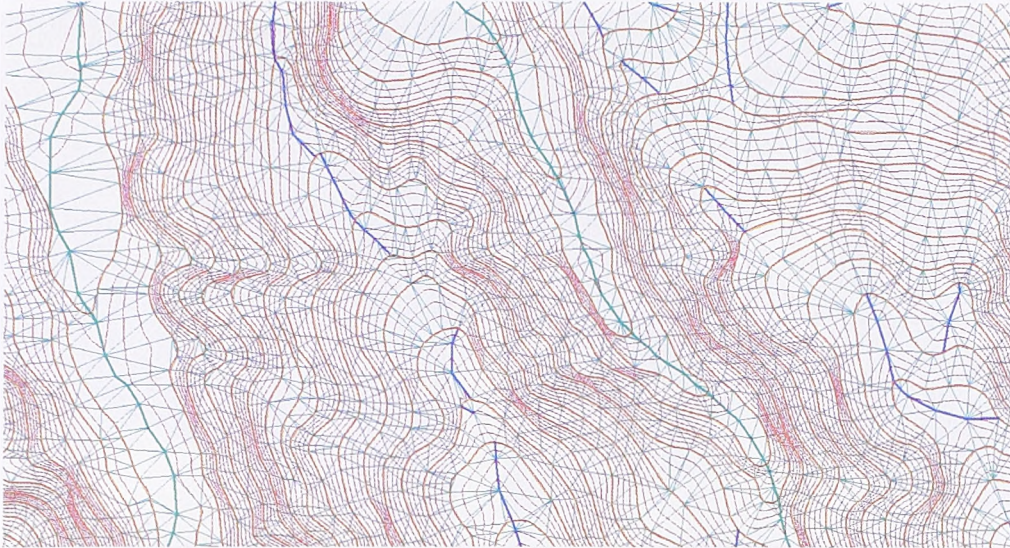


Slika B-2 : DMT formiran uz korišćenje digitalizovanih linija hidrografije (plavo); visine tačaka ovih linija određene su kubnom interpolacijom iz DMT-a formiranom na osnovu ostalih podataka

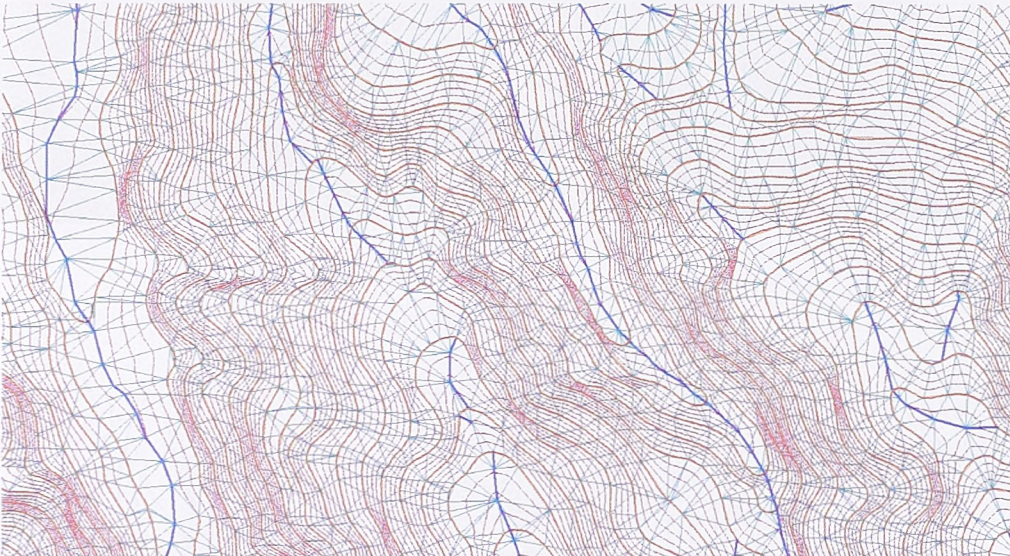


Slika B-3 : DMT formiran uz korišćenje digitalizovanih linija hidrografije (plavo); visine tačaka ovih linija određene su linearnom interpolacijom od presečnih tačaka sa izohipsama

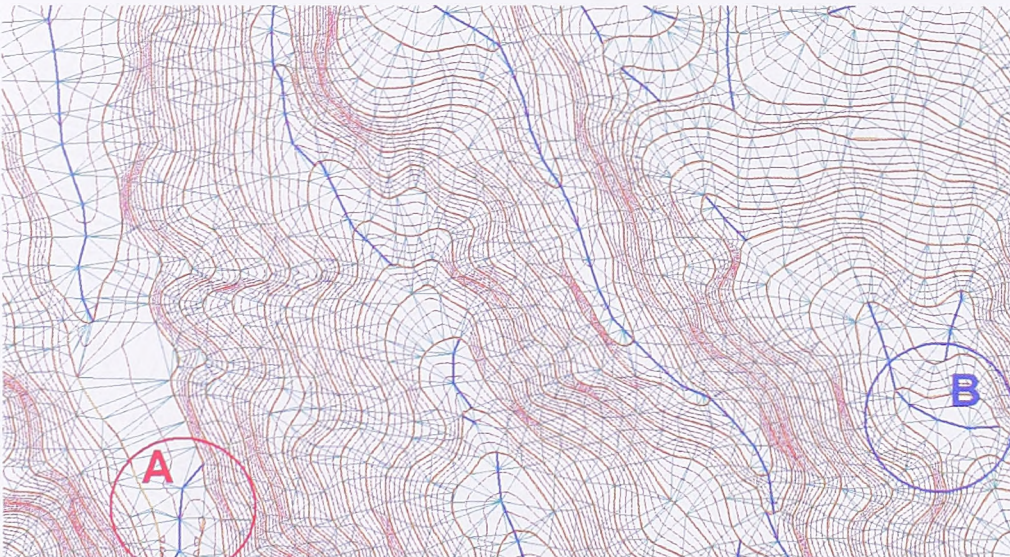




Slika B-4 : DMT formiran uz korišćenje digitalizovanih linija hidrografije (zeleno); visine tačaka ovih linija određene su kubnom interpolacijom iz DMT-a; podaci su dopunjeni automatski detektovanim strukturnim linijama (plavo); parametri: DL=VS, LINK=da, SPLINE=50m

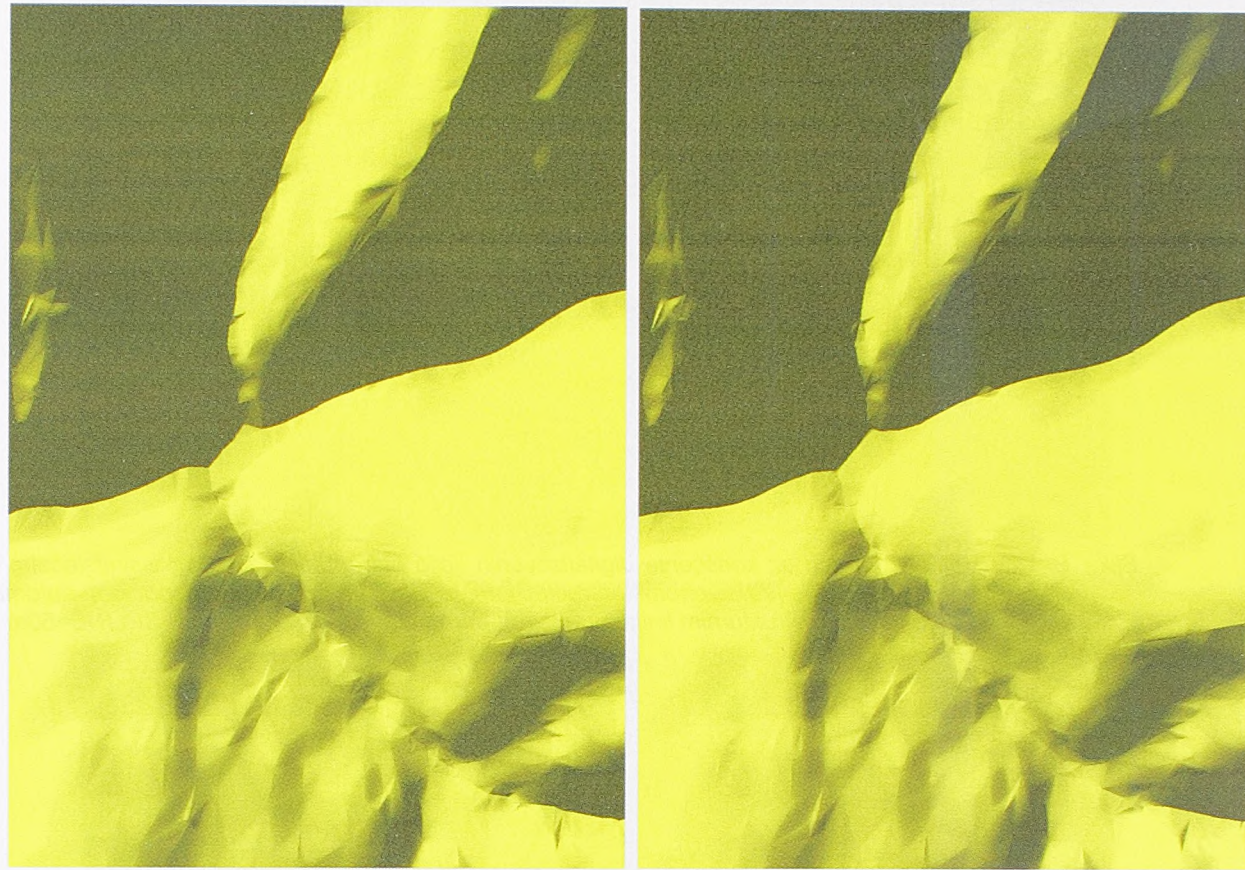


Slika B-5 : DMT formiran uz korišćenje digitalizovanih linija hidrografije (plavo); visine tačaka linija određene su lin. interpolacijom od izohipsi; podaci su dopunjeni automatski detektovanim strukturnim linijama (plavo); parametri: DL=VS, LINK=da, LIH=da, SPLINE=50m



Slika B-6 : DMT formiran bez linija hidrografije; podaci izohipsi su dopunjeni automatski detektovanim strukturnim linijama (plavo); parametri: DL=VS, LINK=da, LIH=da, SPLINE=50m





Slika B-7 : Prikaz rezultata dobijenih primenom algoritma ME bez glačanja detektovanih linija (gore) i sa glačanjem (dole)





Slika B-8 : Prikaz rezultata dobijenih primenom algoritma GC bez glaćanja detektovanih linija (gore) i sa glaćanjem (dole)





Slika B-9 : Prikaz rezultata dobijenih primenom algoritma CC bez glačanja detektovanih linija (gore) i sa glačanjem (dole)





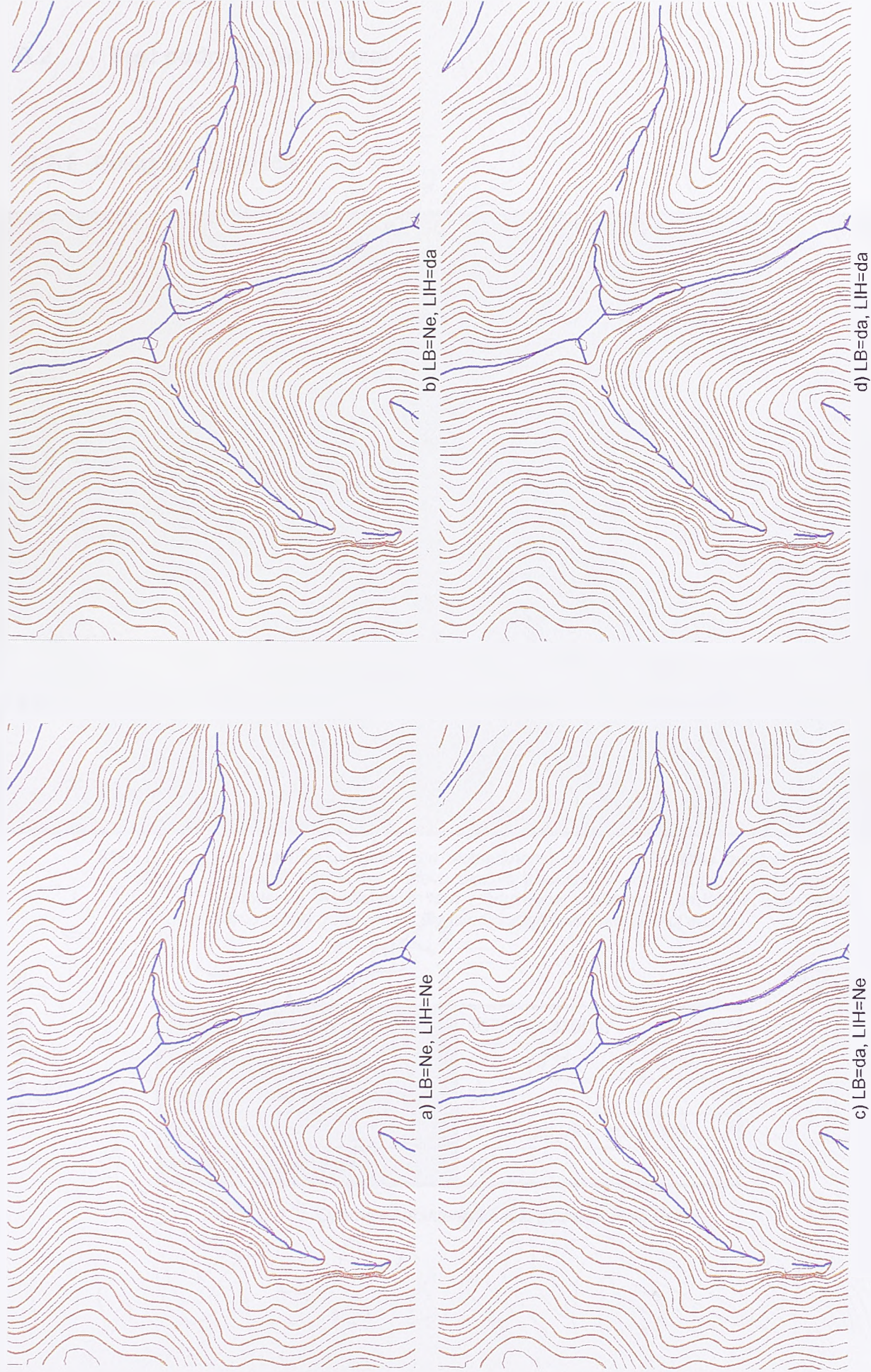
Slika B-10 : Prikaz rezultata dobijenih primenom algoritma EM bez glačanja detektovanih linija (gore) i sa glačanjem (dole)





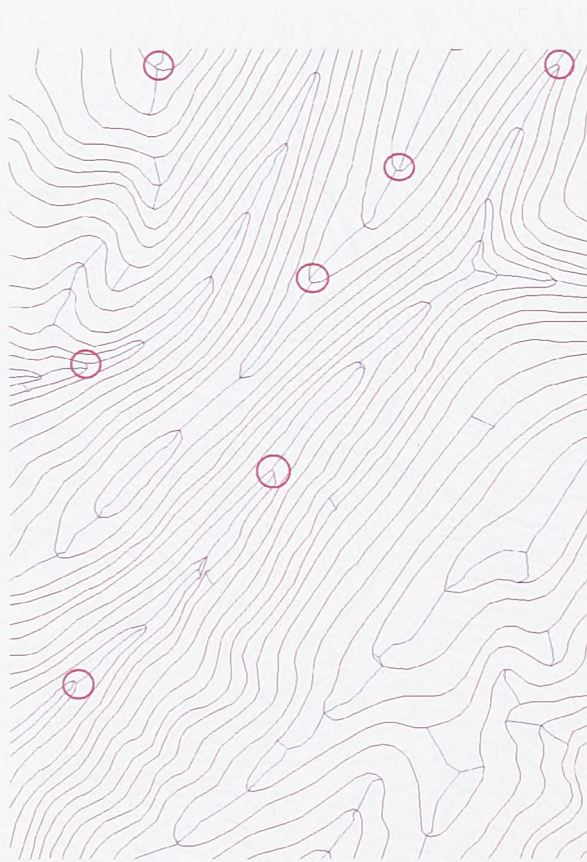
Slika B-11 : Prikaz rezultata dobijenih primenom algoritma VS bez glačanja detektovanih linija (gore) i sa glačanjem (dole)



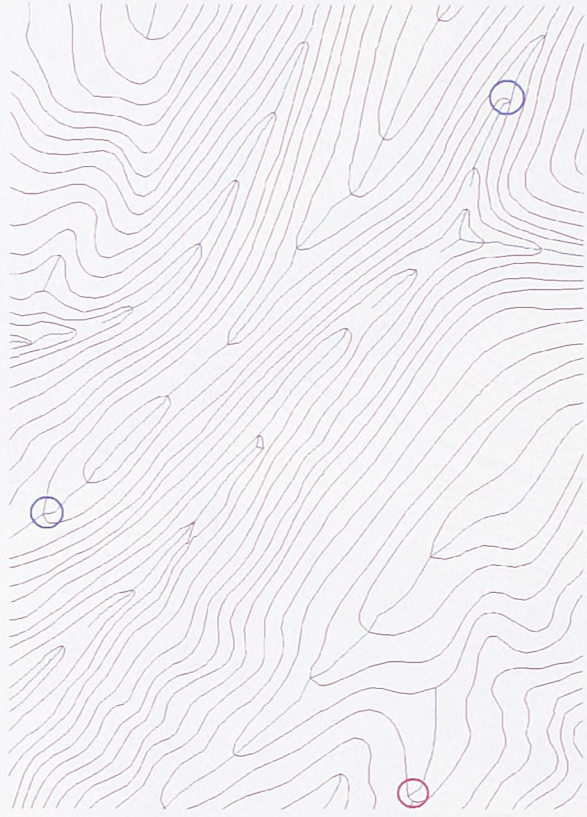


Slika B-12 : Upoređenje originalnih izohips na  $e=10m$  i izohips na  $e=5m$  interpolovanih iz DMT-a korišćenjem algoritma VS (CFDT=da, MCS=8m, LINK=da) sa varijacijama korišćenja parametara za korigovanje visina tačaka visinskih linija (LIH) i tretiranja detektovanih linija kao prelomnih linija (LB)





a) Novi Sad (Fruška Gora) - ME



b) Novi Sad (Fruška Gora) - VS



c) Novi Pazar - ME



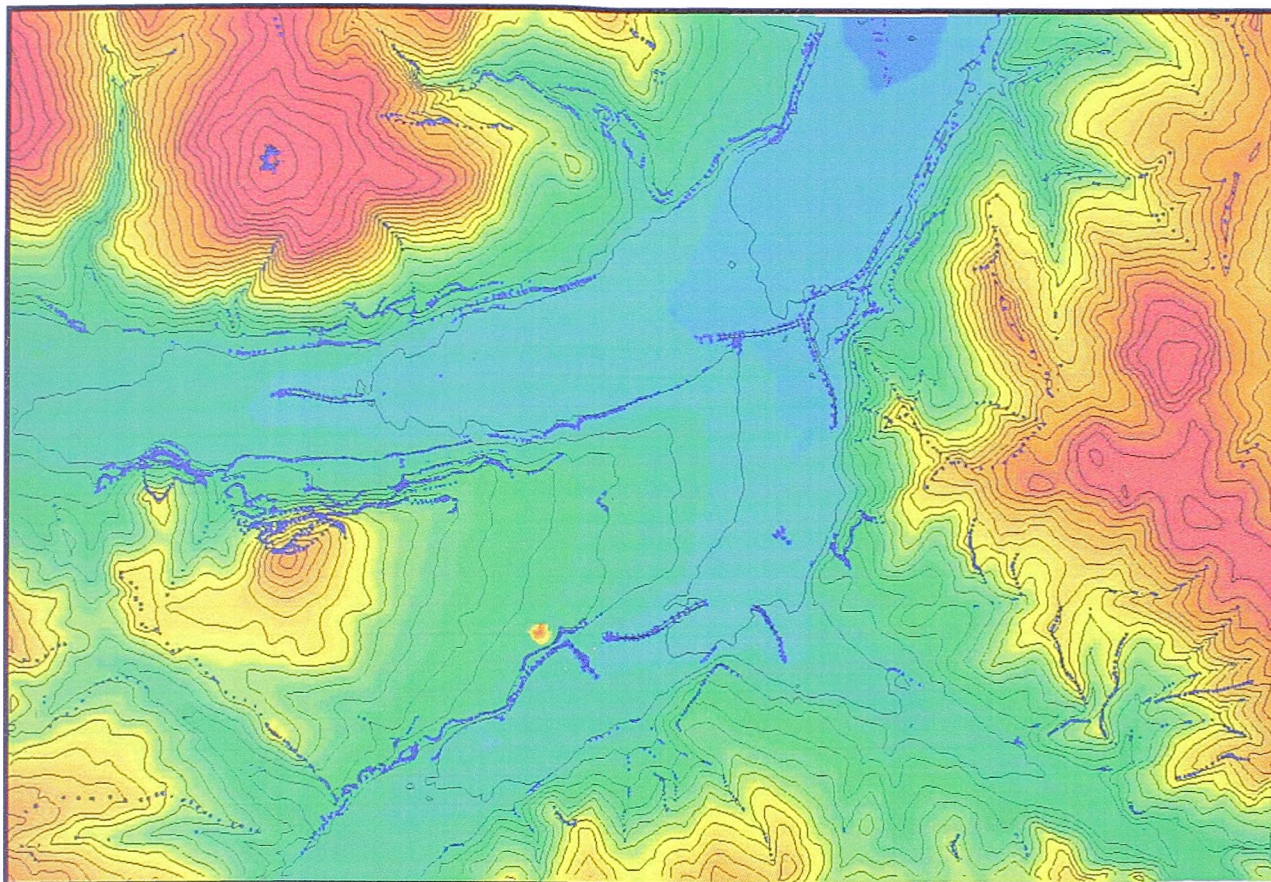
d) Novi Pazar - VS

Slika B-13 : Upoređenje rezultata detekcije i ekstrakcije strukturnih linija primenom algoritama ME i VS; crvenim kružnicama su označena mesta gde delovi strukturnih linija nisu dobro povezani preko izohipsi; plavim kružnicama su obeležena mesta gde nisu dobro određeni vrhovi izohipsi



## B.2 Test područje Novi Pazar

### B.2.1 Prikaz test područja



Slika B.14 : Test područje za realizaciju eksperimenta za ocenu kvaliteta različitih metoda formiranja DMT-a na osnovu ulaznih podataka u formi izohipsi; prikazane su izohipse na ekvidistanciji 10m i originalne strukture i prelomne linije terena (samo tačke) izmerene na digitalnoj fotogrametrijskoj radnoj stanici

Dimenzije područja	5370m x 3700m
Raspon visina	477m – 731m
Prosečna nadmorska visina	561m
Nagib terena	0°-35° (za 99% područja)
Prosečan nagib terena	10°

Tabela B-1 : Osnovne karakteristike test područja Novi Pazar



## B.2.2 Formiranje DMT-a korišćenjem metoda interpolacije implementiranih u okviru softverskog paketa ArcGIS

**NAPOMENA** : Korišćenjem ovih metoda formiran je DEM u vidu pravilnog grida sa veličinom ćelije grida od 10m. Procenjeno je da se korišćenjem ovako gustog grida čini zanemarljivom dodatna greška modeliranja, tj. greška interpolacije usled neadekvatne predstave terena modelom u vidu grida. Kod RBF metoda i kriginga visine su direktno interpolovane primenom predikcije. Broj kontrolnih visina je: 7485 za visinske tačke, 6517 za strukturne linije i 28085 za grid 25m.

Metod interpolacije	Visinske tačke					Strukturne linije					Grid 25m				
	Max	Min	Prosečna	STDEV	RMSE	Max	Min	Prosečna	STDEV	RMSE	Max	Min	Prosečna	STDEV	RMSE
TIN	8,62	-9,27	-0,50	2,06	2,12	30,18	-43,26	-0,88	3,00	3,12	9,23	-9,07	-0,56	1,95	2,03
NN	8,62	-8,46	-0,47	2,02	2,08	10,52	-12,99	-0,87	2,90	3,03	9,23	-8,35	-0,54	1,90	1,97
IDWN12	9,10	-9,70	-0,45	2,93	2,96	10,52	-12,99	-0,80	3,60	3,68	9,23	-9,60	-0,51	2,78	2,83
IDWN8	9,10	-9,70	-0,45	2,93	2,96	10,52	-12,99	-0,80	3,60	3,68	9,23	-9,60	-0,51	2,78	2,83
Ord. kriging	8,62	-8,97	-0,46	2,42	2,46	10,52	-12,99	-1,01	3,06	3,22	9,23	-8,79	-0,55	2,28	2,35
Univ. kriging	8,62	-8,97	-0,44	2,48	2,52	10,52	-12,99	-1,01	3,07	3,23	9,23	-8,79	-0,53	2,35	2,41
TopoToRaster	247,51	-15,94	0,61	5,25	5,28	157,63	-12,01	0,39	7,65	7,86	248,62	-16,63	0,60	5,41	5,45
TopoToRaster*	14,47	-15,94	0,40	2,01	2,05	11,54	-12,01	-0,16	2,97	2,97	11,91	-11,63	0,37	1,92	1,96
RBF-MQ	8,62	-8,53	-0,47	1,94	2,00	9,12	-12,99	-0,80	2,80	2,91	8,74	-8,82	-0,52	1,85	1,92
RBF-ST	8,62	-7,92	-0,48	2,12	2,17	12,99	-31,02	-0,89	3,05	3,17	9,48	-8,11	-0,54	1,97	2,05
RBF-CRS	9,15	-9,70	-0,45	2,86	2,90	10,52	-12,99	-0,77	3,69	3,77	9,23	-9,76	-0,52	2,73	2,78
T10N100	23,89	-22,36	-0,35	2,41	2,43	25,58	-19,46	-0,05	4,06	4,06	26,30	-25,61	-0,39	2,35	2,39
T10N50	10,20	-24,69	-0,43	2,28	2,32	12,91	-12,78	-0,46	2,97	3,00	11,89	-54,74	-0,49	2,25	2,30
T10N10	8,62	-9,54	-0,46	2,67	2,71	10,52	-12,99	-0,82	3,24	3,34	9,22	-11,10	-0,54	2,54	2,60
T5N100	26,20	-416,11	-0,40	5,39	5,41	344,03	-18,90	0,11	7,54	7,54	364,48	-397,74	-0,39	4,05	4,07
T5N50	9,15	-27,69	-0,43	2,25	2,29	12,65	-12,74	-0,47	2,92	2,95	11,88	-27,95	-0,47	2,19	2,24
T5N10	8,62	-9,54	-0,46	2,66	2,70	10,52	-12,99	-0,81	3,22	3,32	9,22	-13,52	-0,54	2,54	2,60
T1N100	142,72	-34,84	-0,29	3,17	3,18	35,06	-18,14	-0,14	3,70	3,70	139,05	-44,59	-0,33	3,07	3,08
T1N50	24,67	-33,09	-0,42	2,33	2,36	12,65	-28,27	-0,50	2,94	2,98	33,47	-42,08	-0,46	2,29	2,34
T1N10	27,98	-17,45	-0,46	2,68	2,72	11,21	-12,99	-0,77	3,18	3,28	20,06	-47,71	-0,53	2,62	2,67
T05N100	63,29	-272,43	-0,53	5,55	5,58	59,88	-55,86	-0,60	5,05	5,08	64,30	-370,27	-0,56	5,87	5,90
T05N50	10,26	-34,31	-0,42	2,33	2,37	12,65	-12,68	-0,50	2,84	2,89	13,39	-51,45	-0,46	2,30	2,35
T05N10	10,91	-21,06	-0,46	2,67	2,71	13,92	-12,99	-0,77	3,18	3,28	11,38	-29,21	-0,54	2,56	2,61
T02N100	61,88	-231,35	-0,53	4,82	4,85	58,99	-30,29	-0,43	4,70	4,72	61,33	-322,00	-0,55	5,13	5,16
T02N50	79,60	-39,42	-0,41	2,65	2,69	27,17	-30,32	-0,48	2,97	3,01	111,70	-62,36	-0,45	2,53	2,57
T02N10	15,49	-25,25	-0,46	2,69	2,72	17,10	-14,75	-0,76	3,21	3,29	14,44	-39,27	-0,53	2,58	2,64
T01N100	81,83	-48,67	-0,23	3,57	3,57	66,62	-18,90	-0,14	4,00	4,00	164,54	-70,74	-0,32	3,37	3,38
T01N50	303,45	-55,03	-0,20	6,62	6,63	12,65	-28,27	-0,50	2,94	2,98	491,86	-285,65	-0,28	7,49	7,50
T01N10	20,60	-27,97	-0,45	2,72	2,75	36,49	-12,99	-0,73	3,30	3,38	20,06	-47,71	-0,53	2,62	2,67
R05N100	76,91	-25,87	0,58	5,66	5,69	35,38	-27,69	-0,97	6,55	6,62	79,53	-25,48	0,42	5,55	5,56
R05N50	31,10	-159,41	-0,47	3,58	3,61	17,02	-13,93	-0,56	3,09	3,14	42,64	-246,06	-0,52	3,71	3,74
R05N10	69,60	-147,30	-0,46	3,46	3,49	183,04	-12,99	-0,63	5,25	5,29	95,20	-172,77	-0,53	3,46	3,50
R02N100	61,88	-231,35	-0,53	4,82	4,85	58,99	-30,29	-0,43	4,70	4,72	61,33	-322,00	-0,55	5,13	5,16
R02N50	26,52	-126,41	-0,47	3,25	3,28	15,77	-15,47	-0,57	3,22	3,27	23,37	-204,77	-0,52	3,36	3,40
R02N10	81,58	-104,31	-0,45	3,31	3,34	175,13	-12,99	-0,63	5,23	5,27	100,63	-135,44	-0,53	3,37	3,41
R01N100	62,02	-193,30	-0,52	4,28	4,31	59,50	-24,79	-0,32	4,85	4,86	60,44	-272,63	-0,54	4,55	4,58
R01N50	32,65	-104,41	-0,47	3,09	3,13	14,63	-15,15	-0,57	3,33	3,37	34,75	-173,72	-0,52	3,18	3,22
R01N10	85,89	-77,39	-0,44	3,24	3,27	169,20	-12,99	-0,63	5,19	5,23	101,94	-128,01	-0,52	3,32	3,36
R001N100	47,43	-48,13	-0,32	2,72	2,74	71,83	-18,23	-0,11	4,65	4,65	68,50	-67,34	-0,37	2,66	2,69
R001N50	25,23	-88,01	-0,42	2,84	2,88	14,39	-12,89	-0,53	3,46	3,50	34,26	-128,17	-0,48	2,85	2,89
R001N10	80,92	-56,23	-0,42	3,25	3,27	168,98	-12,99	-0,62	5,20	5,23	101,41	-136,99	-0,51	3,33	3,37

Tabela B-2 : Greške rekonstrukcije površi terena na osnovu ulaznih podataka u formi izohipsi korišćenjem različitih metoda interpolacije implementiranih u okviru ArcGIS softvera; sve vrednosti su date u [m]

**KORIŠĆENE OZNAKE ZA METODE INTERPOLACIJE:**

<b>TIN</b>	- Linearna interpolacija na osnovu formiranog TIN-a i prostornih trouglova.
<b>NN</b>	- Interpolacija po metodi "prirodnog suseda" (engl. <i>Natural Neighbor</i> ).
<b>IDWN12</b>	- Interpolacija po metodi inverznih odstojanja (engl. <i>Inverse Distance Weighted</i> ) sa parametrima: broj referentnih tačaka – 12, tip radijusa za pretraživanje – promenljiv, stepen – 2, maksimalno rastojanje – 500m, veličina izlazne ćelije – 10m.
<b>IDWN8</b>	- Interpolacija po metodi inverznih odstojanja (engl. <i>Inverse Distance Weighted</i> ) sa parametrima: broj referentnih tačaka – 8, tip radijusa za pretraživanje – promenljiv, stepen – 2, maksimalno rastojanje – 500m, veličina izlazne ćelije – 10m.
<b>Ord. kriging</b>	- Interpolacija po metodi običnog kriginga (engl. <i>Ordinary Kriging</i> ) sa korišćenjem krosvalidacije za ocenu optimalnih parametara interpolacije (parametri poluvariograma).
<b>Univ. kriging</b>	- Interpolacija po metodi univerzalnog kriginga (engl. <i>Universal Kriging</i> ) sa korišćenjem krosvalidacije za ocenu optimalnih parametara interpolacije (parametri poluvariograma).
<b>TopoToRaster</b>	- Algoritam iz <i>ArcToolbox</i> modula (baziran na <i>ANUDEM</i> algoritmu) – ulaz su bile samo vektorizovane izohipse.
<b>TopoToRaster*</b>	- Algoritam iz <i>ArcToolbox</i> modula (baziran na <i>ANUDEM</i> algoritmu) – ulaz su bile samo vektorizovane izohipse. Iz rezultata su izbačene grube greške koje je algoritam napravio.
<b>RBF-MQ</b>	- Algoritam sa interpolacijom po metodi radijalnih baznih funkcija (engl. <i>Radial Basis Functions</i> ), pri čemu je za radijalnu baznu funkciju izabrana multikvadratna funkcija. Krosvalidacija je korišćena za ocenu optimalnog parametra interpolacije.
<b>RBF-ST</b>	- Algoritam sa interpolacijom po metodi radijalnih baznih funkcija (engl. <i>Radial Basis Functions</i> ), pri čemu je za radijalnu baznu funkciju izabran splajn sa tenzijom (engl. <i>Spline With Tension</i> ). Krosvalidacija je korišćena za ocenu optimalnog parametra interpolacije.
<b>RBF-CRS</b>	- Algoritam sa interpolacijom po metodi radijalnih baznih funkcija (engl. <i>Radial Basis Functions</i> ), pri čemu je za radijalnu baznu funkciju izabran kompletno regularizovani splajn (engl. <i>Completely Regularised Spline</i> ). Krosvalidacija je korišćena za ocenu optimalnog parametra interpolacije.
<b>TaaNbb</b>	- Algoritam sa interpolacijom po metodi splajn sa tenzijom (engl. <i>Spline With Tension</i> ). Parametri splajn funkcije su posebno zadavani. Parametar aa je težina (engl. <i>Weight</i> ) i iznosi: 10.0 (za aa=10), 5.0 (za aa=5), 2.0 (za aa=2), 1.0 (za aa=1), 0.5 (za aa=05), 0.2 (za aa=02) ili 0.1 (za aa=01). Parametar bb je broj tačaka koji se koristi za proračun svake tačke grida i iznosi 10, 50 ili 100.
<b>RaaNbb</b>	- Algoritam sa interpolacijom po metodi regularizovanog splajna (engl. <i>Regularized Spline</i> ). Parametri splajn funkcije su posebno zadavani. Parametar aa je težina (engl. <i>Weight</i> ) i iznosi: 0.5 (za aa=05), 0.2 (za aa=02), 0.1 (za aa=01) ili 0.01 (za aa=001). Parametar bb je broj tačaka koji se koristi za proračun svake tačke grida i iznosi 10, 50 ili 100.



B.2.3 Formiranje DMT-a korišćenjem razvijenih metoda interpolacije implementiranih u okviru softvera Surfing

Ulazni podaci	Test podaci	Parametri rekonstrukcije površi											Tip interpolacije	Prosečan nagib terena	Broj tačaka	Srednja kvadratna greška (RMSE) [m]	Standardna devijacija ( $\sigma$ ) [m]	Prosečna greška [m]	Minimalna greška [m]	Maksimalna greška [m]	
		CFDT	RTSDV [m]	ITER	MCS [m]	DL	LB	LIH	LINK	SPLINE [m]	MaxSDV [m]										
		+	10	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	CUBIC	11,446	28085	1,59	1,54	-0,24	-8,86	7,57
		+	10	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	LINEAR	8,951	28085	1,99	1,82	-0,55	-9,07	9,23
		+	1	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	CUBIC	9,659	28085	1,95	1,75	-0,53	-8,38	9,23
		+	1	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	LINEAR	8,891	28085	1,98	1,77	-0,55	-8,38	9,23
		+	1	5	10	ME	+	+	+	+	+	+	-	CUBIC	10,399	28085	3,08	3,01	0,57	-7,43	28,20
		+	1	5	10	ME	+	+	+	+	+	+	-	LINEAR	10,286	28085	3,06	3,00	0,56	-7,43	28,03
		+	1	5	10	VS	+	+	+	+	+	+	11	CUBIC	10,078	28085	1,65	1,50	-0,40	-8,81	7,43
		+	1	5	10	VS	+	+	+	+	+	+	11	LINEAR	9,572	28085	1,68	1,52	-0,42	-8,82	7,39
		+	1	5	10	VS	+	+	+	+	+	+	-	CUBIC	10,428	28085	2,43	2,41	0,30	-7,76	29,09
		+	1	5	10	VS	+	+	+	+	+	+	-	LINEAR	9,939	28085	2,44	2,42	0,28	-7,65	28,75
		+	1	5	10	VS	+	-	+	+	+	+	-	CUBIC	10,471	28085	2,60	2,54	0,48	-7,78	29,09
		+	1	5	10	VS	+	-	+	+	+	+	-	LINEAR	9,954	28085	2,61	2,56	0,46	-7,77	28,75
		+	5	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	CUBIC	10,831	28085	1,77	1,61	-0,45	-9,60	8,20
		+	5	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	LINEAR	8,938	28085	2,03	1,82	-0,57	-9,07	9,23
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	CUBIC	12,593	28085	3,54	3,34	0,83	-7,13	33,46
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	LINEAR	8,952	28085	2,03	1,91	-0,56	-9,07	9,23
		+	10	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	CUBIC	13,145	6517	2,47	2,40	-0,46	-11,20	8,58
		+	10	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	LINEAR	8,098	6517	3,02	2,86	-0,86	-12,99	10,52
		+	1	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	CUBIC	10,567	6517	2,97	2,74	-0,83	-12,95	10,51
		+	1	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	LINEAR	8,134	6517	3,01	2,77	-0,86	-12,99	10,52
		+	1	5	10	ME	+	+	+	+	+	+	-	CUBIC	11,597	6517	3,41	3,39	0,26	-11,30	23,49
		+	1	5	10	ME	+	+	+	+	+	+	-	LINEAR	11,328	6517	3,40	3,39	0,26	-11,27	23,50
		+	1	5	10	VS	+	+	+	+	+	+	11	CUBIC	11,765	6517	2,60	2,48	-0,55	-12,38	9,05
		+	1	5	10	VS	+	+	+	+	+	+	11	LINEAR	10,299	6517	2,63	2,50	-0,57	-12,38	9,06
		+	1	5	10	VS	+	+	+	+	+	+	-	CUBIC	12,004	6517	2,96	2,95	0,03	-12,38	19,06
		+	1	5	10	VS	+	+	+	+	+	+	-	LINEAR	10,700	6517	2,97	2,96	0,02	-12,38	18,73
		+	1	5	10	VS	+	-	+	+	+	+	-	CUBIC	11,449	6517	3,07	3,06	0,08	-12,38	19,06
		+	1	5	10	VS	+	-	+	+	+	+	-	LINEAR	10,221	6517	3,08	3,07	0,06	-12,38	18,73
		+	5	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	CUBIC	12,670	6517	2,63	2,50	-0,64	-11,20	9,84
		+	5	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	LINEAR	8,116	6517	3,04	2,85	-0,88	-12,99	10,52
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	CUBIC	13,803	6517	3,63	3,56	0,35	-11,20	31,72
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	LINEAR	8,108	6517	3,05	2,91	-0,88	-12,99	10,52





Ulazni podaci	Test podaci	Parametri rekonstrukcije površi										Tip interpolacije	Prosečan nagib terena	Broj tačaka	Srednja kvadratna greška (RMSE) [m]	Standardna devijacija ( $\sigma$ ) [m]	Prosečna greška [m]	Minimalna greška [m]	Maksimalna greška [m]		
		CFDT	RTSDV [m]	ITER	MCS [m]	DL	LB	LIH	LINK	SPLINE [m]	MaxSDV [m]										
Izohipse sa e=10m i izabrane izohipse sa e=5m	Grid 25m	+	10	5	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,078	28085	1,01	1,00	0,09	-7,11	7,36
		+	10	5	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9,061	28085	1,29	1,27	-0,14	-8,58	9,23
		+	1	5	10	VS	+	+	+	+	+	+	+	+	10,104	28085	0,92	0,92	-0,04	-7,02	7,43
		+	1	5	10	VS	+	+	+	+	+	+	+	+	9,636	28085	0,96	0,95	-0,06	-7,08	7,39
		+	10	5	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13,148	6517	1,91	1,90	-0,03	-11,20	8,58
		+	10	5	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8,434	6517	2,48	2,43	-0,42	-12,99	10,52
	Strukt. linije	+	1	5	10	VS	+	+	+	+	+	+	+	+	12,096	6517	1,95	1,93	-0,13	-12,38	9,05
		+	1	5	10	VS	+	+	+	+	+	+	+	+	10,504	6517	1,99	1,97	-0,15	-12,38	9,06
		+	10	5	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,033	7485	1,11	1,10	0,11	-5,77	7,18
		+	10	5	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8,894	7485	1,43	1,41	-0,09	-8,97	8,62
		+	1	5	10	VS	+	+	+	+	+	+	+	+	9,989	7485	1,04	1,04	-0,02	-6,41	9,16
		+	1	5	10	VS	+	+	+	+	+	+	+	+	9,452	7485	1,09	1,09	-0,03	-6,46	9,16

Tabela B-4 : Greške rekonstrukcije površi na osnovu ulaznih podataka u formi izohipsi sa ekvidistancijom e=10m i izabranog broja izohipsi sa poluekvidistancijom (5m) u ravničarskim područjima gde se one standardno i iscrtavaju na TK25

Ulazni podaci	Test podaci	Parametri rekonstrukcije površi										Tip interpolacije	Prosečan nagib terena	Broj tačaka	Srednja kvadratna greška (RMSE) [m]	Standardna devijacija ( $\sigma$ ) [m]	Prosečna greška [m]	Minimalna greška [m]	Maksimalna greška [m]			
		CFDT	RTSDV [m]	ITER	MCS [m]	DL	LB	LIH	LINK	SPLINE [m]	MaxSDV [m]											
Sve izohipse sa e=5m	Grid 25m	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	CUBIC	10,973	28085	1,73	1,55	0,26	-12,79	49,32	
		+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	LINEAR	9,394	28085	0,75	0,73	-0,12	-4,71	4,23	
		+	5	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	CUBIC	10,444	28085	0,60	0,60	-0,04	-4,34	4,28
		+	5	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	LINEAR	9,39	28085	0,74	0,71	-0,13	-4,71	4,23
		+	5	5	10	VS	+	+	+	-	5	-	-	-	CUBIC	10,069	28085	0,58	0,57	-0,07	-4,34	3,77
		+	5	5	10	VS	+	+	+	-	5	-	-	-	LINEAR	9,735	28085	0,61	0,60	-0,08	-4,34	3,77
	Strukturne linije	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	CUBIC	12,078	6517	1,33	1,33	-0,03	-10,75	6,41
		+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	LINEAR	8,26	6517	1,58	1,55	-0,27	-10,54	5,52	
		+	5	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	CUBIC	11,975	6517	1,30	1,30	-0,12	-10,75	4,22
		+	5	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	LINEAR	8,249	6517	1,58	1,55	-0,27	-10,54	5,52
		+	5	5	10	VS	+	+	+	-	5	-	-	-	CUBIC	11,725	6517	1,36	1,35	-0,14	-10,75	6,72
		+	5	5	10	VS	+	+	+	-	5	-	-	-	LINEAR	10,355	6517	1,41	1,39	-0,16	-10,54	6,82
Visinske tačke	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	CUBIC	10,653	7485	1,78	1,55	0,27	-4,66	42,11	
	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	LINEAR	9,034	7485	0,82	0,80	-0,11	-4,41	4,52		
	+	5	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	CUBIC	10,051	7485	0,65	0,64	-0,04	-4,33	3,82	
	+	5	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	LINEAR	9,032	7485	0,81	0,79	-0,12	-4,41	4,52	
	+	5	5	10	VS	+	+	+	-	5	-	-	-	CUBIC	9,652	7485	0,64	0,63	-0,07	-4,13	3,43	
	+	5	5	10	VS	+	+	+	-	5	-	-	-	LINEAR	9,369	7485	0,68	0,66	-0,08	-4,12	3,80	

Tabela B-5 : Greške rekonstrukcije površi na osnovu ulaznih podataka u formi izohipsi sa ekvidistancijom e=5m



Ulazni podaci	Test podaci	Parametri rekonstrukcije površi										Tip interpolacije	Prosečan nagib terena	Broj tačaka	Srednja kvadratna greška (RMSE) [m]	Standardna devijacija ( $\sigma$ ) [m]	Prosečna greška [m]	Minimalna greška [m]	Maksimalna greška [m]	
		CFDT	RTSDV [m]	ITER	MCS [m]	DL	LB	LIH	LINK	SPLINE [m]	MaxSDV [m]									
Samo izohipse na e=10m i originalne strukturne i prelomne linije terena	Grid 25m	+	10	5	-	-	-	-	-	-	-	-	CUBIC	10,446	28085	1,04	0,97	-0,21	-6,48	6,99
		+	10	5	-	-	-	-	-	-	-	-	LINEAR	9,575	28085	1,23	1,17	-0,22	-7,84	8,74
		+	1	5	-	-	-	-	-	-	-	-	CUBIC	9,943	28085	1,20	1,15	-0,20	-7,99	8,85
		+	1	5	-	-	-	-	-	-	-	-	LINEAR	9,527	28085	1,22	1,17	-0,22	-7,73	8,74
	Strukturne linije	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	CUBIC	10,523	28085	1,08	1,03	-0,18	-6,64	12,79
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	LINEAR	9,588	28085	1,24	1,18	-0,22	-7,84	8,74
		+	10	5	-	-	-	-	-	-	-	-	CUBIC	2,105	6517	0,14	0,14	0,00	-11,20	1,82
		+	10	5	-	-	-	-	-	-	-	-	LINEAR	2,107	6517	0,16	0,16	0,00	-12,99	2,51
		+	1	5	-	-	-	-	-	-	-	-	CUBIC	5,334	6517	0,16	0,16	0,00	-12,99	1,12
		+	1	5	-	-	-	-	-	-	-	-	LINEAR	6,070	6517	0,16	0,16	0,00	-12,99	1,08
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	CUBIC	0,849	6517	0,14	0,14	0,00	-11,20	1,82
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	LINEAR	0,896	6517	0,16	0,16	0,00	-12,99	2,51
Visinske tačke	+	10	5	-	-	-	-	-	-	-	-	CUBIC	10,159	7485	1,21	1,15	-0,21	-6,65	7,97	
	+	10	5	-	-	-	-	-	-	-	-	LINEAR	8,983	7485	1,46	1,40	-0,21	-7,77	8,62	
	+	1	5	-	-	-	-	-	-	-	-	CUBIC	9,465	7485	1,41	1,37	-0,19	-8,01	8,70	
	+	1	5	-	-	-	-	-	-	-	-	LINEAR	8,947	7485	1,45	1,41	-0,21	-7,68	8,62	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	CUBIC	10,219	7485	1,24	1,19	-0,18	-6,64	11,03		
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	LINEAR	8,992	7485	1,46	1,41	-0,21	-7,77	8,62		

Tabela B-6 : Greške rekonstrukcije površi na osnovu ulaznih podataka u formi izohipse sa ekvidistancijom e=10m i dodatkom strukturnih i prelomnih linija terena izmerenih na digitalnom fotogrametrijskom instrumentu (podaci iz originalnog seta podataka)

Ulazni podaci	Test podaci	Parametri rekonstrukcije površi										Tip interpolacije	Prosečan nagib terena	Broj tačaka	Srednja kvadratna greška (RMSE) [m]	Standardna devijacija ( $\sigma$ ) [m]	Prosečna greška [m]	Minimalna greška [m]	Maksimalna greška [m]		
		CFDT	RTSDV [m]	ITER	MCS [m]	DL	LB	LIH	LINK	SPLINE [m]	MaxSDV [m]										
Samo izohipse na e=10m i manuelno digitalizovane (u 2D) strukturne i prelomne linije terena	Grid 25m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	CUBIC	10,688	28085	1,74	1,55	-0,47	-8,96	7,36	
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	LINEAR	8,945	28085	2,03	1,80	-0,56	-8,95	9,23	
		-	1	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	CUBIC	9,658	28085	1,99	1,78	-0,54	-8,38	9,23
		-	1	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	LINEAR	8,891	28085	2,01	1,80	-0,56	-8,38	9,23
		-	1	5	10	VS	+	+	+	-	-	-	-	CUBIC	9,911	28085	1,75	1,54	-0,49	-8,82	7,20
		-	1	5	10	VS	+	+	+	-	-	-	-	LINEAR	9,402	28085	1,78	1,56	-0,51	-8,80	7,16
	Strukturne linije	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	CUBIC	12,372	6517	2,56	2,41	-0,61	-11,20	8,58
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	LINEAR	8,082	6517	3,05	2,85	-0,88	-12,99	10,52
		-	1	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	CUBIC	10,579	6517	2,98	2,74	-0,83	-12,95	10,51
		-	1	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	LINEAR	8,117	6517	3,03	2,79	-0,87	-12,99	10,52
		-	1	5	10	VS	+	+	+	-	-	-	-	CUBIC	11,184	6517	2,62	2,46	-0,65	-12,38	8,58
		-	1	5	10	VS	+	+	+	-	-	-	-	LINEAR	9,679	6517	2,67	2,50	-0,67	-12,38	8,58
Visinske tačke	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	CUBIC	10,668	7485	1,81	1,63	-0,44	-9,15	8,03	
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	LINEAR	8,819	7485	2,12	1,92	-0,50	-9,15	8,62	
	-	1	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	CUBIC	9,574	7485	2,08	1,91	-0,49	-8,72	8,72	
	-	1	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	LINEAR	8,78	7485	2,12	1,94	-0,51	-8,60	8,62	
	-	1	5	10	VS	+	+	+	-	-	-	-	CUBIC	9,871	7485	1,83	1,64	-0,45	-9,02	7,78	
	-	1	5	10	VS	+	+	+	-	-	-	-	LINEAR	9,3	7485	1,86	1,67	-0,47	-9,00	7,76	

Tabela B-7 : Greške rekonstrukcije površi na osnovu ulaznih podataka u formi izohipsi sa ekvidistancijom e=10m i strukturnim i prelomnim linijama terena prikupljenim manuelnom digitalizacijom sa TK25; geometrija ovih linija u položajnom smislu je određena vizuelno na osnovu iscrtanih izohipsi na TK25 (manuelna digitalizacija), dok su visine tačaka ovih linija određene linearnom interpolacijom (trougonaone facete) iz privremenog TIN DMT-a formiranog na osnovu digitalizovanih izohipsi



Ulazni podaci	Test podaci	Parametri rekonstrukcije površi										Tip interpolacije	Prosečan nagib terena	Broj tačaka	Srednja kvadratna greška (RMSE) [m]	Standardna devijacija ( $\sigma$ ) [m]	Prosečna greška [m]	Minimalna greška [m]	Maksimalna greška [m]		
		CFDT	RTSDV [m]	ITER	MCS [m]	DL	LB	LIH	LINK	SPLINE [m]	MaxSDV [m]										
		+	1	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	CUBIC	9,314	28085	2,01	1,80	-0,56	-8,82	9,23
		+	1	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	LINEAR	8,879	28085	2,01	1,81	-0,56	-8,89	9,23
		+	1	5	-	ME	+	+	+	+	+	-	-	CUBIC	9,427	28085	1,87	1,60	-0,59	-8,47	8,39
		+	1	5	-	ME	+	+	+	+	+	-	-	LINEAR	9,348	28085	1,88	1,60	-0,59	-8,39	8,39
		+	1	5	-	VS	+	+	+	+	+	25	-	CUBIC	9,698	28085	1,71	1,51	-0,49	-24,90	7,16
		+	1	5	-	VS	+	+	+	+	+	25	-	LINEAR	9,463	28085	1,73	1,52	-0,49	-24,59	7,11
		+	1	5	-	VS	+	+	+	+	+	-	-	CUBIC	9,715	28085	1,70	1,50	-0,49	-8,90	7,43
		+	1	5	-	VS	+	+	+	+	+	-	-	LINEAR	9,463	28085	1,72	1,51	-0,48	-8,82	7,39
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	CUBIC	9,980	28085	1,86	1,60	-0,59	-9,07	8,39
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	LINEAR	8,952	28085	2,03	1,80	-0,56	-9,07	9,23
		+	1	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	CUBIC	9,301	6517	3,01	2,75	-0,87	-12,95	10,51
		+	1	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	LINEAR	8,129	6517	3,03	2,77	-0,86	-12,99	10,52
		+	1	5	-	ME	+	+	+	+	+	-	-	CUBIC	9,838	6517	2,72	2,47	-0,76	-11,30	8,94
		+	1	5	-	ME	+	+	+	+	+	-	-	LINEAR	9,734	6517	2,72	2,47	-0,75	-11,27	8,91
		+	1	5	-	VS	+	+	+	+	+	25	-	CUBIC	10,495	6517	2,65	2,45	-0,67	-12,29	9,11
		+	1	5	-	VS	+	+	+	+	+	25	-	LINEAR	9,988	6517	2,67	2,47	-0,66	-12,38	9,13
		+	1	5	-	VS	+	+	+	+	+	-	-	CUBIC	10,556	6517	2,65	2,45	-0,68	-12,38	9,05
		+	1	5	-	VS	+	+	+	+	+	-	-	LINEAR	10,011	6517	2,67	2,47	-0,66	-12,38	9,06
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	CUBIC	10,299	6517	2,71	2,46	-0,80	-11,20	8,91
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	LINEAR	8,108	6517	3,05	2,81	-0,88	-12,99	10,52
		+	1	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	CUBIC	9,181	7485	2,11	1,94	-0,51	-11,37	8,62
		+	1	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	LINEAR	8,76	7485	2,12	1,96	-0,50	-11,37	8,62
		+	1	5	-	ME	+	+	+	+	+	-	-	CUBIC	9,359	7485	1,94	1,70	-0,55	-8,66	8,62
		+	1	5	-	ME	+	+	+	+	+	-	-	LINEAR	9,286	7485	1,95	1,71	-0,55	-8,57	8,62
		+	1	5	-	VS	+	+	+	+	+	25	-	CUBIC	9,534	7485	1,82	1,62	-0,46	-31,21	8,88
		+	1	5	-	VS	+	+	+	+	+	25	-	LINEAR	9,290	7485	1,84	1,64	-0,45	-31,31	8,94
		+	1	5	-	VS	+	+	+	+	+	-	-	CUBIC	9,582	7485	1,78	1,60	-0,45	-10,54	9,16
		+	1	5	-	VS	+	+	+	+	+	-	-	LINEAR	9,320	7485	1,80	1,62	-0,45	-10,16	9,16
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	CUBIC	9,905	7485	1,92	1,69	-0,54	-9,27	8,62
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	LINEAR	8,821	7485	2,12	1,91	-0,50	-9,27	8,62

Tabela B-8 : Greške rekonstrukcije površi na osnovu ulaznih podataka u formi izohipsi sa ekvidistancijom e=10m uz posebno označavanje onih izohipsi koje razdvajaju strme padine od ravničarskog dela terena

Ulazni podaci	Test podaci	Parametri rekonstrukcije površi										Tip interpolacije	Prosečan nagib terena	Broj tačaka	Srednja kvadratna greška (RMSE) [m]	Standardna devijacija ( $\sigma$ ) [m]	Prosečna greška [m]	Minimalna greška [m]	Maksimalna greška [m]				
		CFDT	RTSDV [m]	ITER	MCS [m]	DL	LB	LIH	LINK	SPLINE [m]	MaxSDV [m]												
Sve izohipse na e=5m uz manualno označavanje izohipsi na prelazu iz brda u ravnicu	Grid 25m	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28085	0,70	0,66	-0,14	-5,04	3,77	
		+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28085	0,75	0,71	-0,12	-4,71	4,23
		+	1	5	7	VS	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	28085	0,61	0,58	-0,12	-4,34	3,88
		+	1	5	7	VS	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	28085	0,62	0,59	-0,11	-4,34	3,87
		+	5	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28085	0,70	0,66	-0,14	-5,04	3,77
		+	5	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28085	0,75	0,71	-0,13	-4,71	4,23
	Strukturne linije	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6517	1,42	1,39	-0,23	-10,75	4,27
		+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6517	1,58	1,55	-0,27	-10,54	5,52
		+	1	5	7	VS	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	6517	1,41	1,39	-0,18	-10,75	6,72
		+	1	5	7	VS	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	6517	1,42	1,40	-0,18	-10,54	6,82
		+	5	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6517	1,42	1,39	-0,23	-10,75	4,23
		+	5	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6517	1,58	1,55	-0,27	-10,54	5,52
	Visinske tačke	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7485	0,75	0,72	-0,14	-4,41	3,50
		+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7485	0,82	0,79	-0,11	-4,41	4,52
		+	1	5	7	VS	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	7485	0,67	0,65	-0,11	-4,31	3,20
		+	1	5	7	VS	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	7485	0,69	0,66	-0,11	-4,29	3,28
		+	5	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7485	0,78	0,75	-0,15	-9,95	3,50
		+	5	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7485	0,84	0,82	-0,12	-9,94	4,52

Tabela B-9 : Greške rekonstrukcije površi na osnovu ulaznih podataka u formi izohipsi sa ekvidistancijom e=5m uz posebno označavanje onih izohipsi koje razdvajaju strme padine od ravninarskog dela terena (izohipse se tretiraju kao prelomne linije)



Ulazni podaci	Test podaci	Parametri rekonstrukcije površi										Tip interpolacije	Prosečan nagib terena	Broj tačaka	Srednja kvadratna greška (RMSE) [m]	Standardna devijacija ( $\sigma$ ) [m]	Prosečna greška [m]	Minimalna greška [m]	Maksimalna greška [m]	
		CFDT	RTSDV [m]	ITER	MCS [m]	DL	LB	LIH	LINK	SPLINE [m]	MaxSDV [m]									
Izohipse sa e=10m i izabrane izohipse sa e=5m, uz manuelno označavanje izohipsi na prelazu iz brda u ravnicu	Grid 25m	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,03	0,98	-0,18	-7,27	8,39
		+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,30	1,27	-0,15	-8,58	9,23
		+	1	5	10	VS	+	+	+	-	10	-	-	-	-	0,98	0,95	-0,16	-7,24	7,43
	Strukt. linije	Vis. tačke	+	1	5	10	VS	+	+	+	10	-	-	-	-	1,01	0,97	-0,16	-7,24	7,39
			+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,06	1,99	-0,36	-11,20	8,91
			+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,48	2,42	-0,43	-12,99	10,52
	Vis. tačke	Vis. tačke	+	1	5	10	VS	+	+	+	10	-	-	-	-	2,02	1,98	-0,24	-12,38	9,05
			+	1	5	10	VS	+	+	+	10	-	-	-	-	2,04	2,00	-0,23	-12,38	9,06
			+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,14	1,11	-0,14	-7,44	8,62
	Vis. tačke	Vis. tačke	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,44	1,40	-0,10	-8,97	8,62
			+	1	5	10	VS	+	+	+	10	-	-	-	-	1,10	1,07	-0,13	-6,46	9,16
			+	1	5	10	VS	+	+	+	10	-	-	-	-	1,14	1,11	-0,12	-6,46	9,16

Tabela B-10 : Greške rekonstrukcije površi na osnovu ulaznih podataka u formi izohipsi sa ekvidistancijom e=10m, uz dodatak izabranog broja izohipsi sa poluekvidistancijom (na 5m - u ravničarskim područjima gde se one standardno i iscrtavaju na TK25) i uz posebno označavanje onih izohipsi koje razdvajaju strme padine od ravničarskog dela terena (Izohipse se tretiraju kao prelomne linije)

**Novi Pazar**

**Ulaz - Izohipse na e=10m**

**DMT25 - CFDT=da, MCS=10m, DL=VS, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=11m, SPLINE=ne, RTSDV=1m, ITER=5**

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
10.078	28085	1.647	1.498	-0.398	-8.814	7.430
0.0 5.0	8917	2.583	2.282	-1.210	-8.814	6.437
5.0 10.0	6892	1.173	1.171	-0.063	-7.019	7.197
10.0 15.0	5570	0.854	0.854	0.011	-6.087	7.430
15.0 20.0	3402	0.671	0.671	0.009	-6.548	5.367
20.0 25.0	1887	0.587	0.587	-0.017	-6.348	5.397
25.0 30.0	934	0.602	0.601	0.020	-5.622	4.605
30.0 35.0	309	0.782	0.782	0.011	-6.196	3.673
35.0 40.0	80	0.818	0.818	0.012	-2.894	4.269
40.0 45.0	33	1.920	1.920	0.034	-6.319	4.437
45.0 50.0	24	2.047	2.038	-0.190	-4.897	5.295
50.0 55.0	16	1.653	1.408	-0.839	-4.368	0.599
55.0 60.0	9	2.457	1.909	-1.459	-5.214	0.925
60.0 65.0	3	0.368	0.153	0.273	0.168	0.449
65.0 70.0	2	1.840	1.579	-0.667	-1.784	0.449
70.0 75.0	4	5.318	4.415	2.567	-2.558	7.362
75.0 80.0	2	0.628	0.133	-0.434	-0.528	-0.340
80.0 85.0	1	-	-	-0.323	-0.323	-0.323

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	2.076	0.005	-3.422	0.022		0.593
STDEV	1.887	0.004	-2.929	0.018		0.481

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
9.572	28085	1.678	1.520	-0.422	-8.818	7.387
0.0 5.0	8917	2.611	2.289	-1.256	-8.818	6.314
5.0 10.0	6892	1.225	1.222	-0.087	-7.021	7.164
10.0 15.0	5570	0.899	0.899	-0.003	-6.251	7.387
15.0 20.0	3402	0.715	0.715	-0.005	-6.831	5.085
20.0 25.0	1887	0.615	0.615	-0.006	-6.208	5.290
25.0 30.0	934	0.613	0.612	0.023	-5.855	4.294
30.0 35.0	309	0.807	0.806	0.029	-6.179	4.175
35.0 40.0	80	0.791	0.791	-0.018	-3.077	3.602
40.0 45.0	33	1.970	1.959	-0.198	-6.903	3.871
45.0 50.0	24	1.958	1.938	-0.267	-4.908	4.613
50.0 55.0	16	1.640	1.444	-0.752	-3.981	1.431
55.0 60.0	9	2.390	1.779	-1.505	-4.551	1.043
60.0 65.0	3	0.696	0.414	0.457	0.008	0.825
65.0 70.0	2	1.664	1.452	-0.576	-1.602	0.451
70.0 75.0	4	5.291	4.383	2.567	-2.776	7.379
75.0 80.0	2	0.732	0.549	-0.342	-0.731	0.046
80.0 85.0	1	-	-	-0.636	-0.636	-0.636

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	2.117	0.005	-3.437	0.022		0.583
STDEV	1.914	0.004	-2.904	0.017		0.465

ERROR DISTRIBUTION

Range	CUBIC		LINEAR	
	No.pts	%	No.pts	%
0.0m - 1.0m	20243	72.1%	19717	70.2%
1.0m - 2.0m	3641	13.0%	4010	14.3%
2.0m - 5.0m	3403	12.1%	3558	12.7%
5.0m - 8.8m	798	2.8%	800	2.8%

Izveštaj B-1 : Upoređenje referentnih visina grida na 25m i visina interpolovanih iz DMT25 dobijenog na osnovu izohipsi na e=10m - test područje Novi Pazar



**Novi Pazar**

**Ulaz - Izohipse na e=10m sa dodatkom izabranih izohipsi na e=5m u ravnici**  
**DMT25 - CFDT=da, MCS=10m, DL=VS, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10m, SPLINE=ne,**  
**RTSDV=1m, ITER=5**

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
10.104	28085	0.922	0.917	-0.042	-7.019	7.430
0.0 5.0	8859	1.172	1.160	-0.170	-6.006	6.725
5.0 10.0	6872	0.973	0.973	0.023	-7.019	7.197
10.0 15.0	5608	0.730	0.729	0.025	-5.145	7.430
15.0 20.0	3438	0.583	0.583	-0.004	-5.898	4.866
20.0 25.0	1892	0.498	0.498	0.007	-3.986	4.566
25.0 30.0	937	0.507	0.506	0.034	-3.962	4.604
30.0 35.0	307	0.616	0.615	0.029	-2.475	3.770
35.0 40.0	81	0.724	0.715	-0.116	-3.209	2.007
40.0 45.0	31	0.950	0.900	0.301	-2.023	2.539
45.0 50.0	22	1.471	1.467	-0.101	-4.897	3.246
50.0 55.0	16	1.010	0.982	-0.227	-2.927	0.872
55.0 60.0	8	1.146	1.144	-0.068	-2.101	1.105
60.0 65.0	6	1.515	1.315	-0.687	-2.464	0.202
65.0 70.0	4	1.100	0.970	-0.448	-1.784	0.542
70.0 75.0	3	6.045	6.022	0.430	-3.513	7.362
75.0 80.0	1	-	-	-0.528	-0.528	-0.528

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	1.110	0.002	-1.182	0.006		0.169
STDEV	1.103	0.002	-1.168	0.006		0.164

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
9.636	28085	0.960	0.953	-0.060	-7.078	7.387
0.0 5.0	8859	1.201	1.185	-0.199	-5.921	6.732
5.0 10.0	6872	1.023	1.023	0.001	-7.078	7.164
10.0 15.0	5608	0.775	0.775	0.013	-5.244	7.387
15.0 20.0	3438	0.636	0.636	-0.013	-5.639	4.803
20.0 25.0	1892	0.527	0.527	0.019	-3.833	4.845
25.0 30.0	937	0.524	0.523	0.040	-4.219	4.294
30.0 35.0	307	0.645	0.643	0.043	-2.614	4.175
35.0 40.0	81	0.660	0.646	-0.136	-2.336	1.641
40.0 45.0	31	0.995	0.993	0.071	-2.839	2.634
45.0 50.0	22	1.399	1.394	-0.113	-4.908	2.676
50.0 55.0	16	1.120	1.089	-0.253	-3.519	1.112
55.0 60.0	8	1.057	1.047	-0.134	-1.950	1.043
60.0 65.0	6	1.454	1.328	-0.540	-2.256	0.825
65.0 70.0	4	0.938	0.803	-0.420	-1.602	0.127
70.0 75.0	3	6.245	6.240	0.207	-3.981	7.379
75.0 80.0	1	-	-	0.046	0.046	0.046

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	1.151	0.002	-1.190	0.006		0.163
STDEV	1.141	0.001	-1.166	0.006		0.159

ERROR DISTRIBUTION

Range	CUBIC		LINEAR	
	No.pts	%	No.pts	%
0.0m - 1.0m	23103	82.3%	22611	80.5%
1.0m - 2.0m	3447	12.3%	3813	13.6%
2.0m - 5.0m	1491	5.3%	1613	5.7%
5.0m - 7.4m	44	0.2%	48	0.2%

Izveštaj B-2: Upoređenje referentnih visina grida na 25m i visina interpolovanih iz DMT25 dobijenog na osnovu izohipsi na e=10m i izabranih izohipsi na e=5m - test područje Novi Pazar

**Novi Pazar**

**Ulaz - Izohipse na e=10m sa dodatkom izabranih izohipsi na e=5m u ravnici**

**DMT25 - CFDT=da, MCS=10m, DL=VS, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10m, SPLINE=ne, RTSDV=1m, ITER=5**

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
9.789	28085	0.984	0.947	-0.157	-7.238	7.430
0.0 5.0	9260	1.291	1.205	-0.462	-7.238	7.376
5.0 10.0	6729	0.996	0.996	-0.019	-7.198	7.065
10.0 15.0	5561	0.745	0.745	0.007	-5.826	7.430
15.0 20.0	3364	0.587	0.587	-0.017	-5.502	4.627
20.0 25.0	1850	0.477	0.477	-0.008	-5.023	4.187
25.0 30.0	919	0.484	0.483	0.026	-3.994	4.604
30.0 35.0	274	0.493	0.492	0.022	-2.350	3.673
35.0 40.0	68	0.522	0.509	-0.114	-1.890	0.783
40.0 45.0	24	1.288	1.287	-0.061	-4.907	1.979
45.0 50.0	15	0.738	0.737	-0.018	-1.182	1.616
50.0 55.0	12	1.162	1.101	-0.356	-2.927	0.872
55.0 60.0	4	1.573	1.428	-0.571	-2.101	1.105
60.0 65.0	3	1.361	1.188	-0.542	-1.913	0.168
65.0 70.0	1	-	-	-1.784	-1.784	-1.784
70.0 75.0	1	-	-	7.362	7.362	7.362

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	1.261	0.001	-1.770	0.006		0.141
STDEV	1.200	0.001	-1.594	0.005		0.120

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
9.550	28085	1.009	0.971	-0.156	-7.238	7.387
0.0 5.0	9260	1.304	1.218	-0.466	-7.238	7.383
5.0 10.0	6729	1.034	1.034	-0.020	-7.147	7.027
10.0 15.0	5561	0.781	0.780	0.009	-5.674	7.387
15.0 20.0	3364	0.625	0.625	-0.012	-5.500	4.469
20.0 25.0	1850	0.507	0.507	0.013	-5.023	4.555
25.0 30.0	919	0.499	0.497	0.044	-4.219	4.294
30.0 35.0	274	0.518	0.516	0.050	-1.951	4.175
35.0 40.0	68	0.530	0.523	-0.088	-1.888	0.779
40.0 45.0	24	1.219	1.213	-0.113	-4.908	2.133
45.0 50.0	15	0.700	0.699	0.031	-1.091	1.621
50.0 55.0	12	1.294	1.231	-0.381	-3.519	1.112
55.0 60.0	4	1.358	1.068	-0.726	-1.950	0.333
60.0 65.0	3	1.257	1.064	-0.546	-1.773	0.127
65.0 70.0	1	-	-	-1.602	-1.602	-1.602
70.0 75.0	1	-	-	7.379	7.379	7.379

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	1.284	0.001	-1.747	0.005		0.132
STDEV	1.224	0.001	-1.572	0.005		0.111

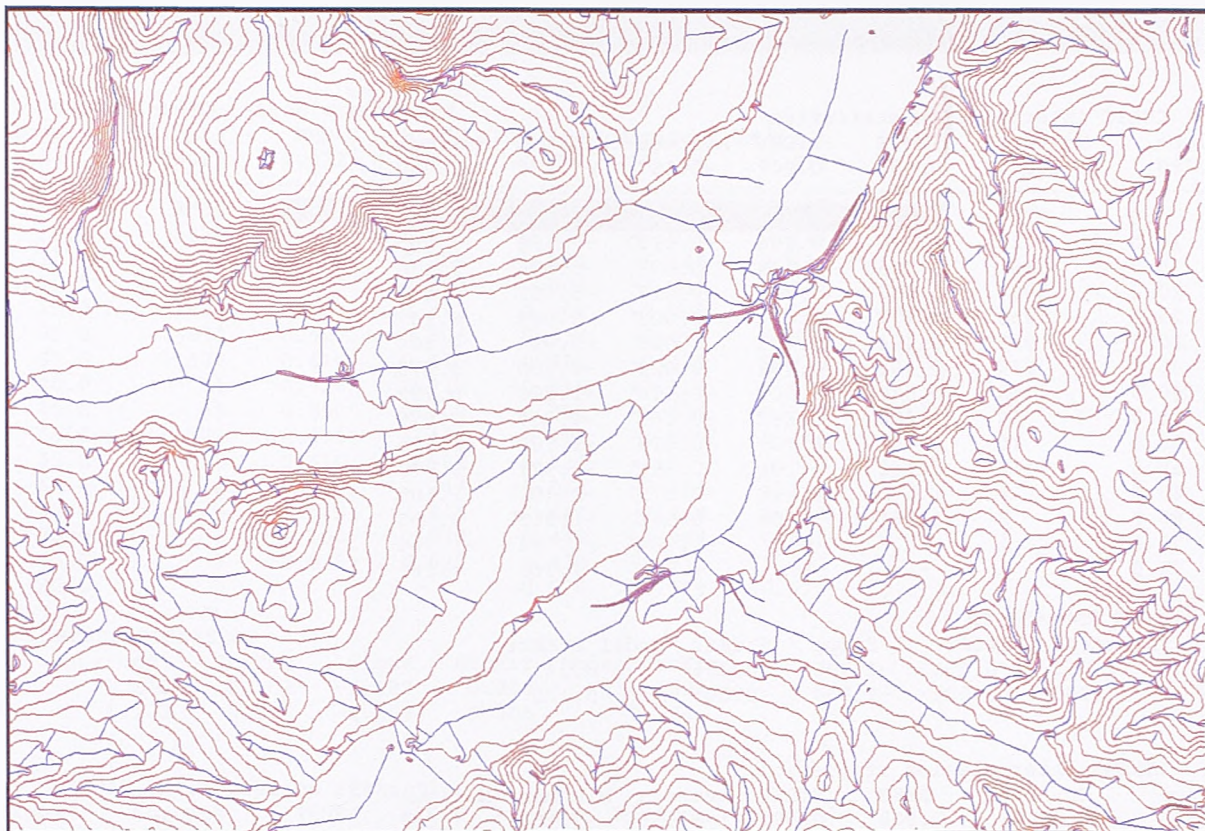
ERROR DISTRIBUTION

Range	CUBIC		LINEAR	
	No.pts	%	No.pts	%
0.0m - 1.0m	22457	80.0%	22138	78.8%
1.0m - 2.0m	3842	13.7%	4105	14.6%
2.0m - 5.0m	1738	6.2%	1793	6.4%
5.0m - 7.4m	48	0.2%	49	0.2%

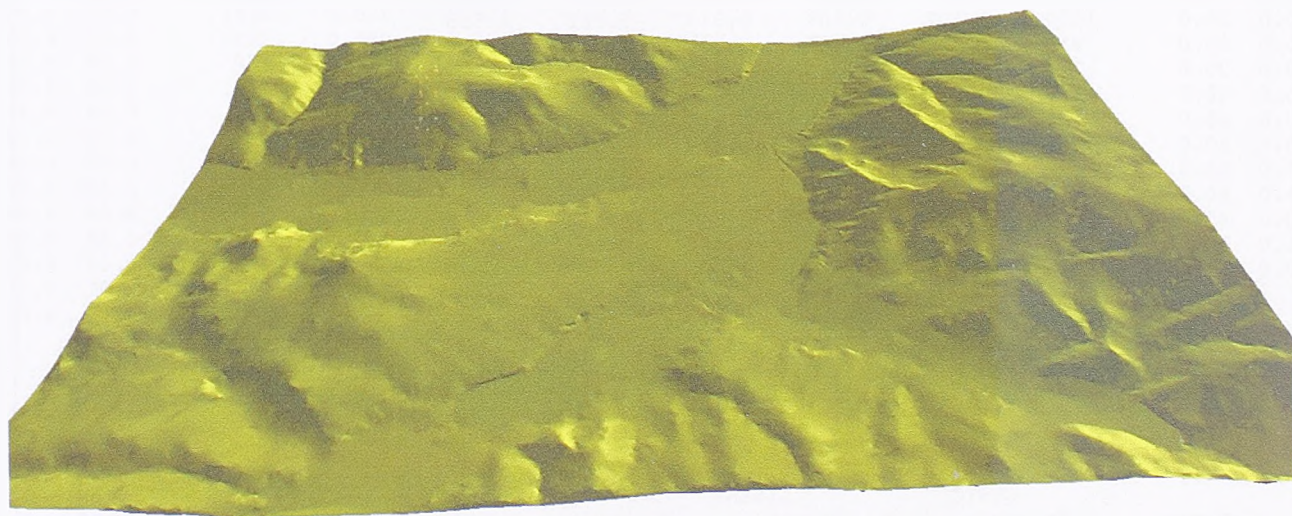
Izveštaj B-3: Upoređenje referentnih visina grida na 25m i visina interpolovanih iz DMT25 dobijenog na osnovu izohipsi na e=10m, uz dodatak izabranih izohipsi na e=5m i manuelno označavanje izohipsi gde brdo naglo prelazi u dolinu - test područje Novi Pazar



B.2.4 Grafički prikaz rezultata formiranja DMT-a na osnovu izohipsi sa ekvidistancijom 10m



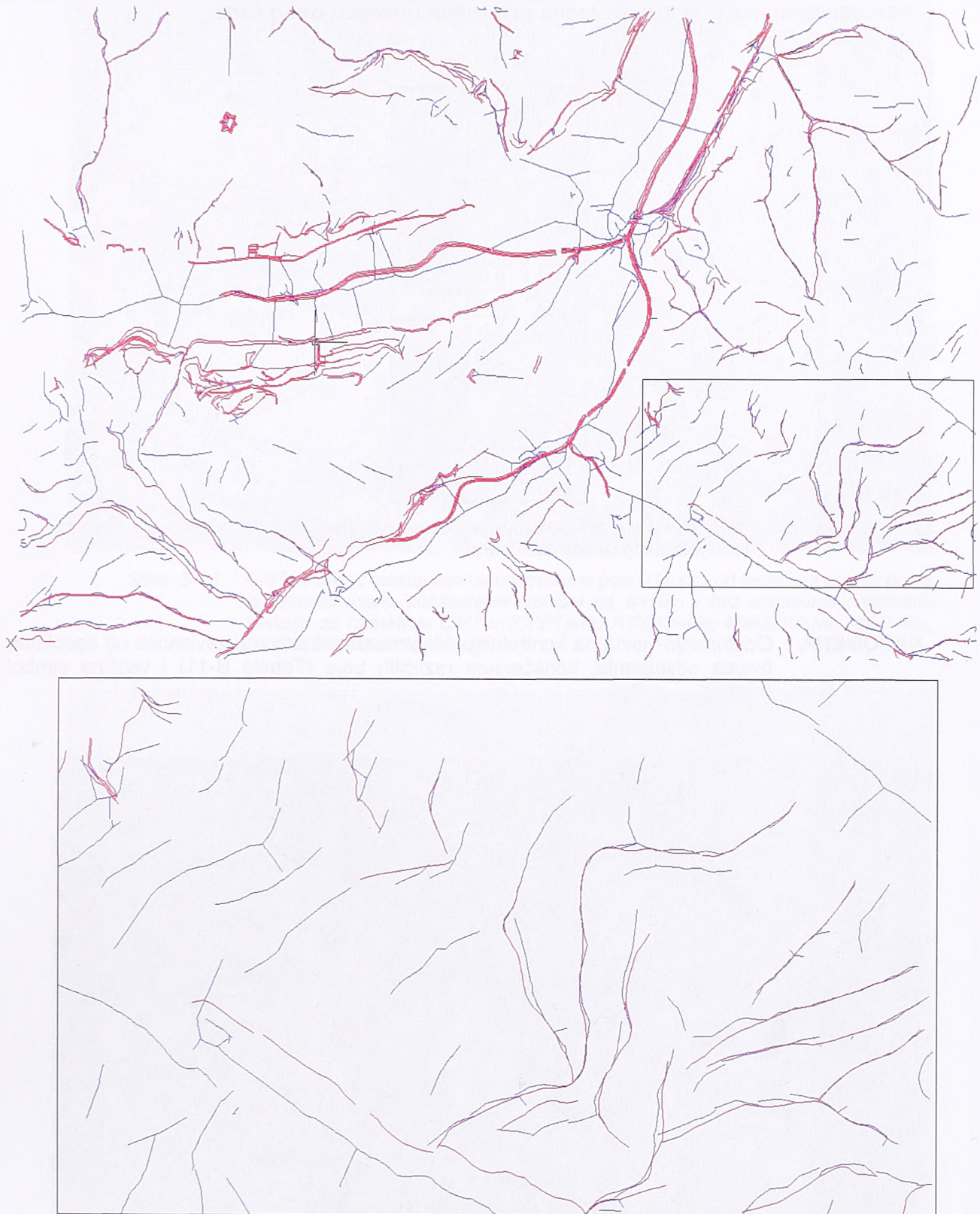
a) Ulazni podaci u formi izohipsi (sepija) i detektovane strukturne linije (plavo)



b) Senčeni model (3D model) rekonstruisane površi terena

Slika B.15 : Rezultat detekcije i ekstrakcije struktumih linija terena; korišćen je algoritam VS; parametri obrade: CFDT=da, RTSDV=1m, ITER=5, MCS=10m, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=11m





Slika B-16 : Upoređenje strukturnih i prelomnih linija terena merenih na fotogrametrijskom instrumentu (crveno, linije korišćene za formiranje polazne, teoretske površi) i linija detektovanih i ekstraktovanih na osnovu analize izohipsi (plavo); za detekciju i ekstrakciju je korišćen algoritam VS; parametri obrade: CFTD=da, RTSDV=1m, ITER=5, MCS=10m, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=11m

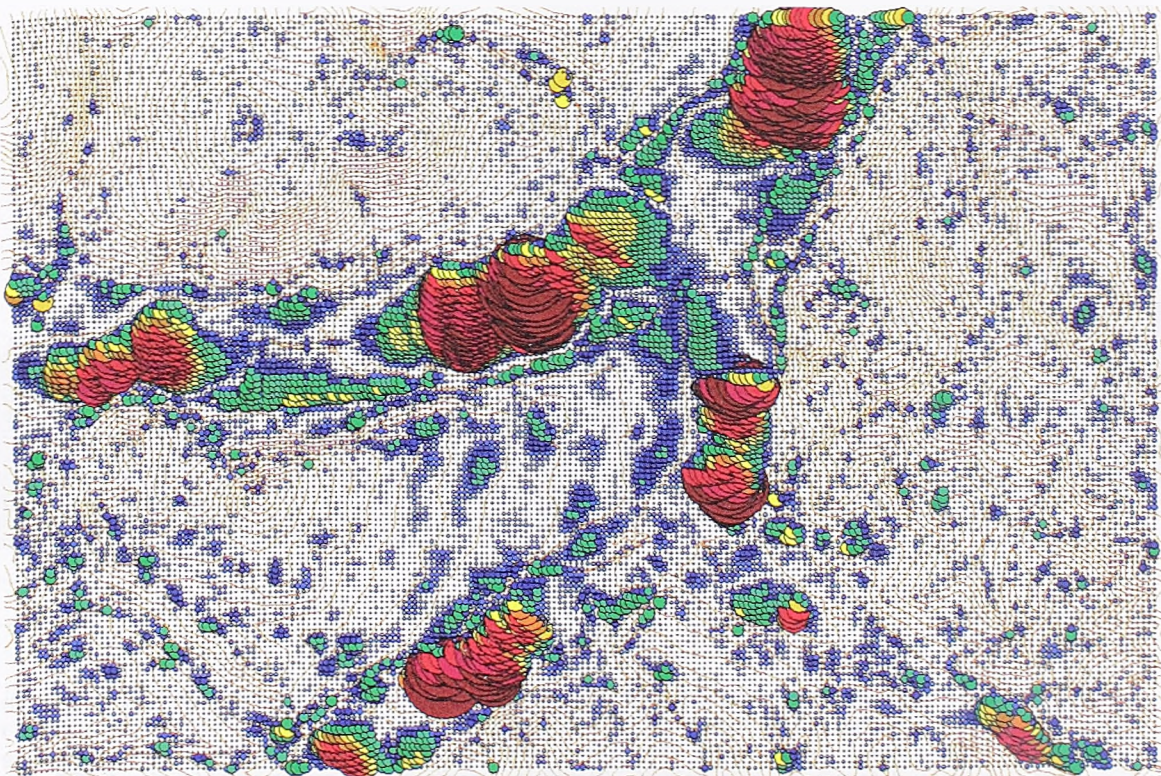


### B.2.5 Grafički prikaz odstupanja teoretske površi terena od površi terena dobijene korišćenjem metoda interpolacije razvijenih u okviru ovog rada

Raspon [m]		Boja
0.0	1.0	Light Blue
1.0	2.0	Blue
2.0	3.0	Dark Blue
3.0	4.0	Light Green
4.0	5.0	Green
5.0	6.0	Dark Green
6.0	7.0	Yellow
7.0	8.0	Orange
8.0	9.0	Light Orange
9.0	10.0	Red
10.0	11.0	Dark Red
11.0	15.0	Magenta
15.0	20.0	Pink
20.0	$\infty$	Brown

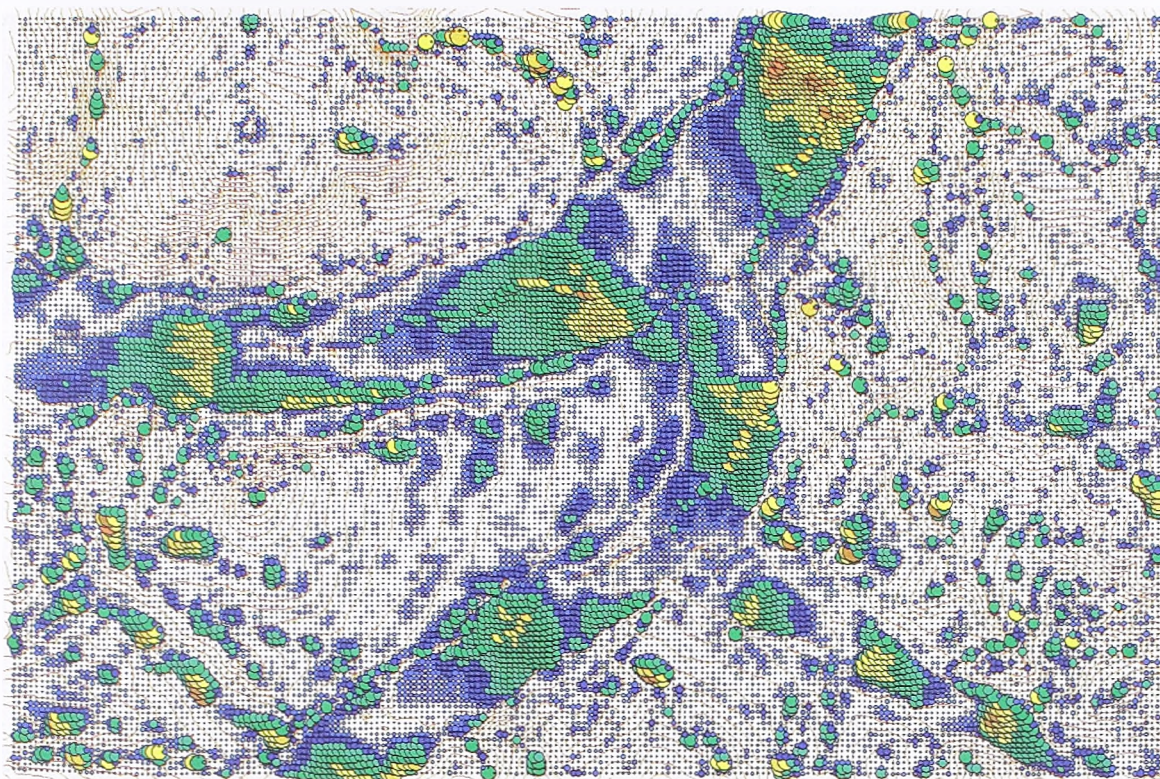
Tabela B-11: Boje korišćene za obeležavanje odstupanja na kontrolnim tačkama u zavisnosti od apsolutnog iznosa odstupanja

**NAPOMENA :** Odstupanja visina na kontrolnim tačkama su prikazana u zavisnosti od apsolutnog iznosa odstupanja, korišćenjem različitih boja (Tabela B-11) i veličine simbola (kruga)

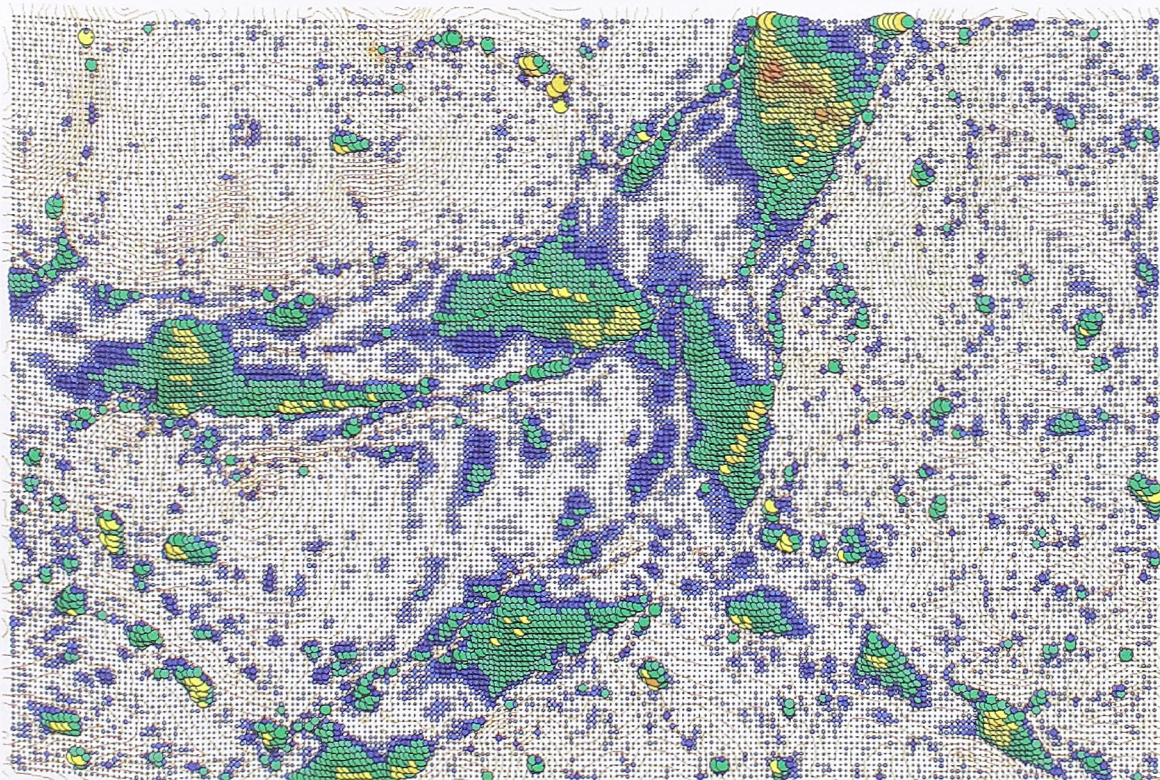


Slika B-17 : Grafički prikaz odstupanja rekonstruisane površi terena od teoretske površi; površ je rekonstruisana korišćenjem izohipsi na  $e=10m$  i bez korišćenja naprednih funkcija za formiranje DMT-a (CFDT=da, RTSDV=Ne, MaxSDV=Ne, MCS=Ne, DL=Ne, kubna interpolacija)



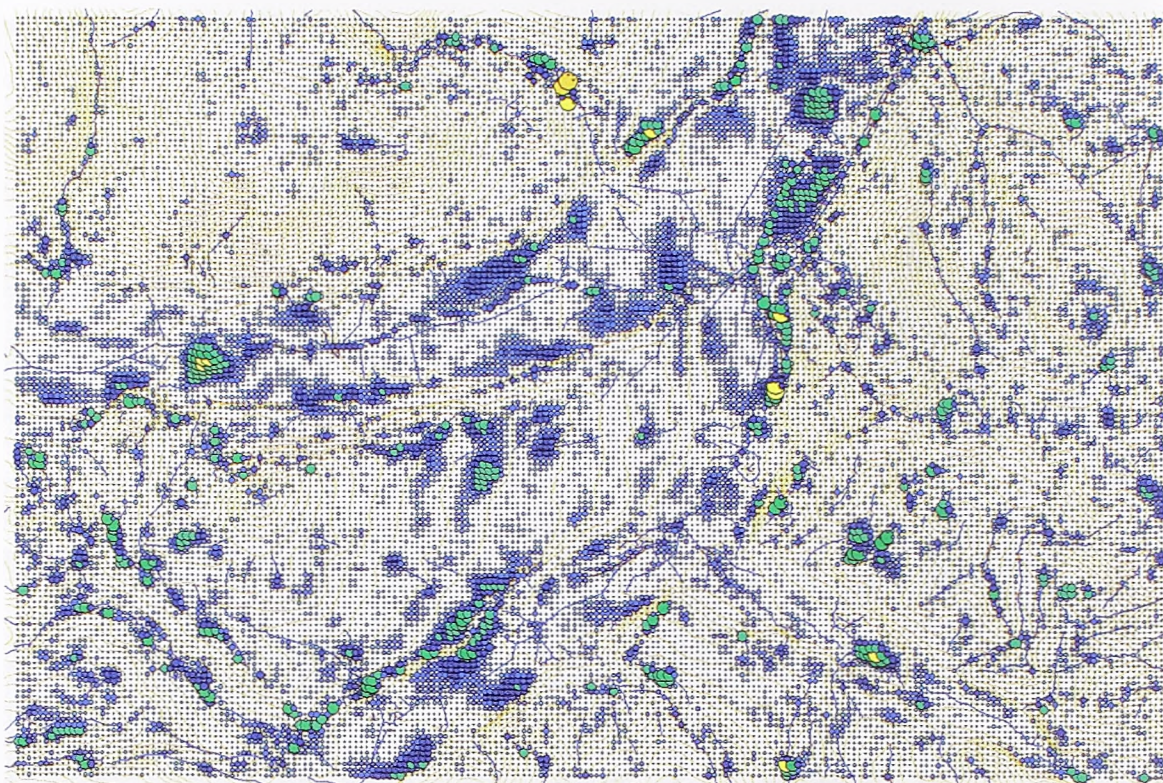


Slika B-18 : Grafički prikaz odstupanja rekonstruisane površi terena od teoretske površi; površ je rekonstruisana korišćenjem izohipsi na  $e=10m$  i bez korišćenja naprednih funkcija za formiranje DMT-a (CFDT=da, RTSDV=Ne, MaxSDV=Ne, MCS=Ne, DL=Ne, linearna interpolacija)

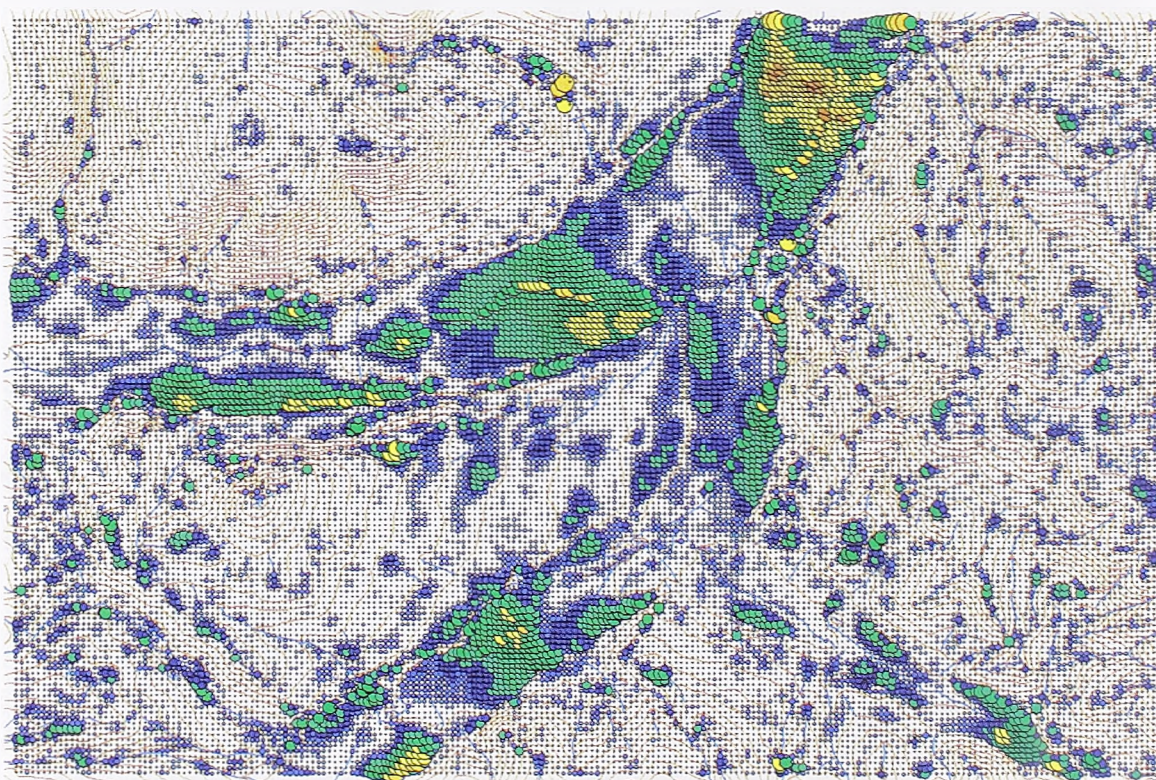


Slika B-19 : Grafički prikaz odstupanja rekonstruisane površi terena od teoretske površi; površ je rekonstruisana korišćenjem izohipsi na  $e=10m$  i sa korišćenjem naprednih funkcija za formiranje DMT-a (CFDT=da, RTSDV=5m, ITER=5, MCS=Ne, DL=Ne, LB=Ne, LIH=Ne, LINK=Ne, MaxSDV=Ne, kubna interpolacija)



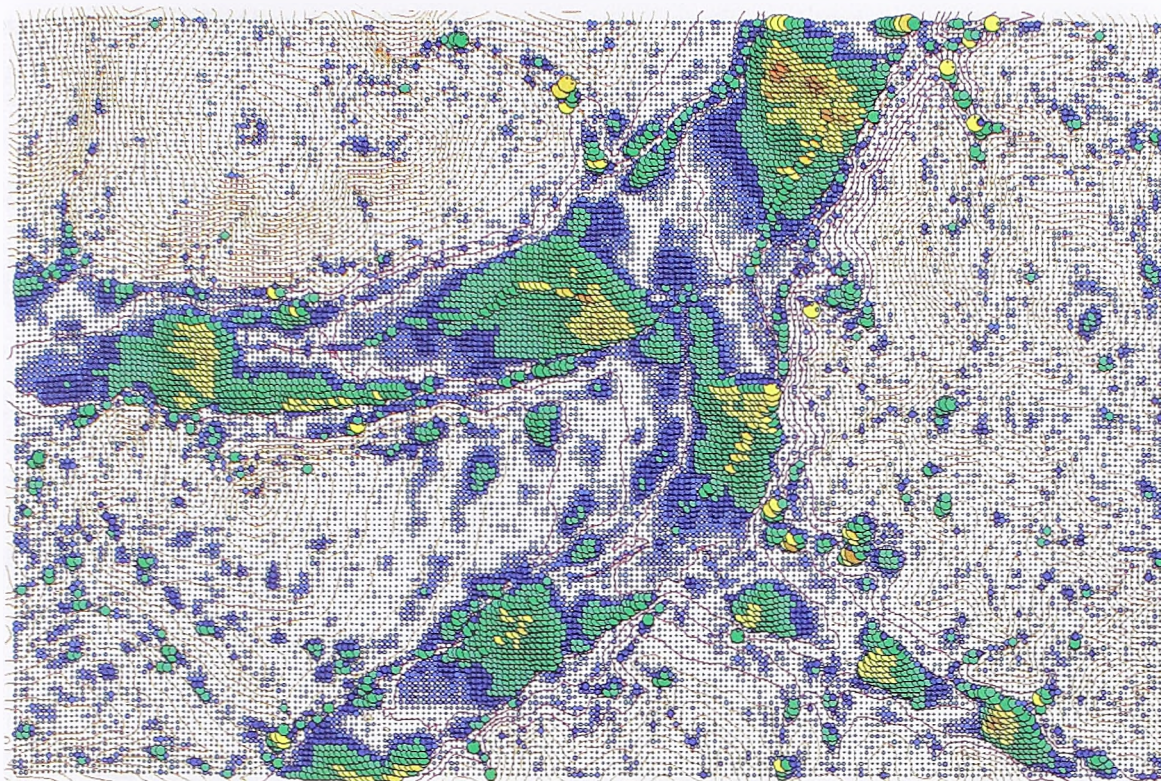


Slika B-20 : Grafički prikaz odstupanja rekonstruisane površi terena od teoretske površi; površ je rekonstruisana korišćenjem izohipsi na  $e=10m$  uz dodatak izohipsi na  $e=5m$  na ravnom terenu; korišćene su napredne funkcije za formiranje DMT-a (CFDT=da, RTSDV=5m, ITER=5, MCS=10m, DL=VS, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10m, kubna interpolacija)

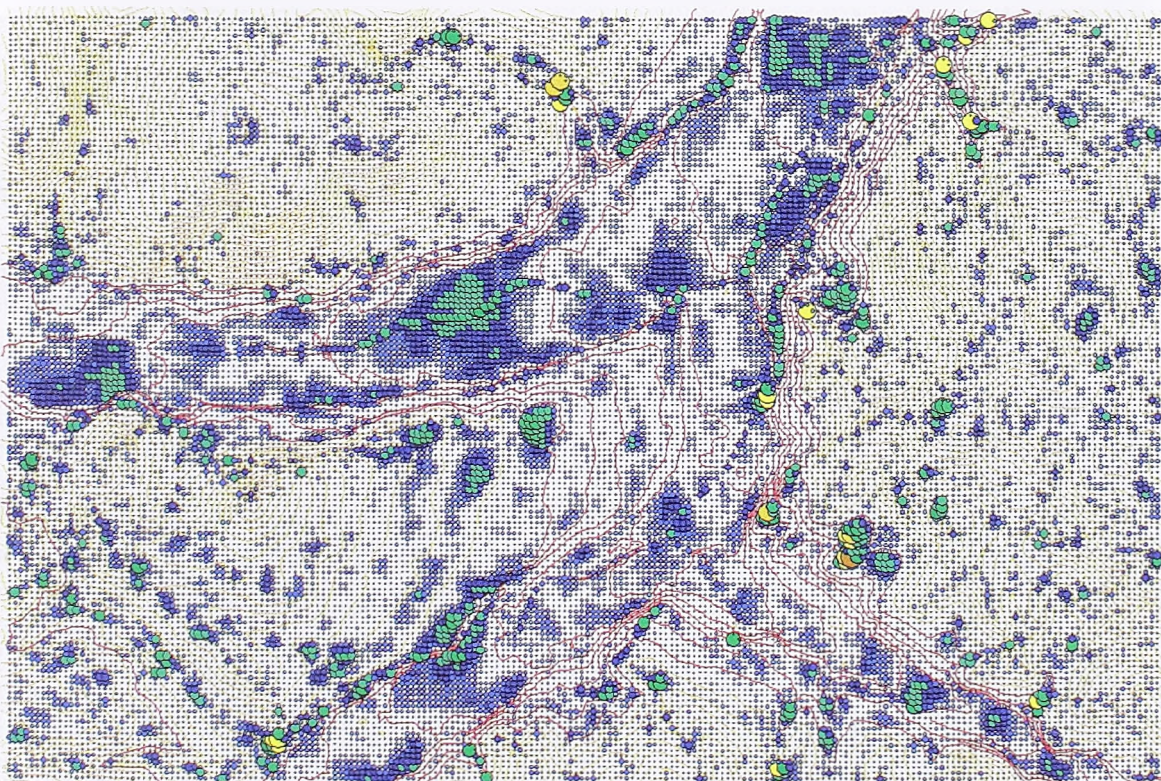


Slika B-21 : Grafički prikaz odstupanja rekonstruisane površi terena od teoretske površi; površ je rekonstruisana korišćenjem izohipsi na  $e=10m$  i sa korišćenjem naprednih funkcija za formiranje DMT-a (CFDT=da, RTSDV=1m, ITER=5, MCS=10m, DL=VS, LB=Ne, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=11, kubna interpolacija)



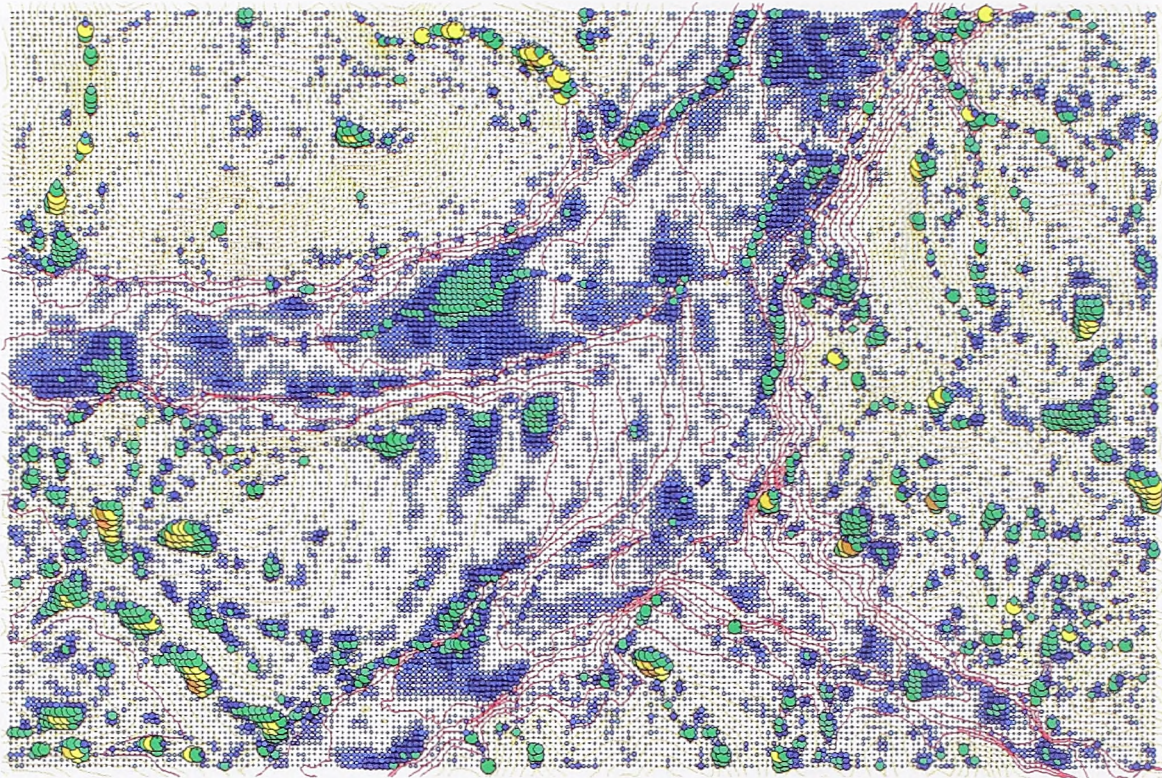


Slika B-22 : Grafički prikaz odstupanja rekonstruisane površi terena od teoretske površi; površ je rekonstruisana korišćenjem izohipsi na  $e=10m$  i sa definisanjem izohipsi gde padina prelazi naglo u dolinu; nisu korišćene napredne funkcije za formiranje DMT-a (CFDT=da, RTSDV=Ne, MaxSDV=Ne, MCS=Ne, DL=Ne, kubna interpolacija)

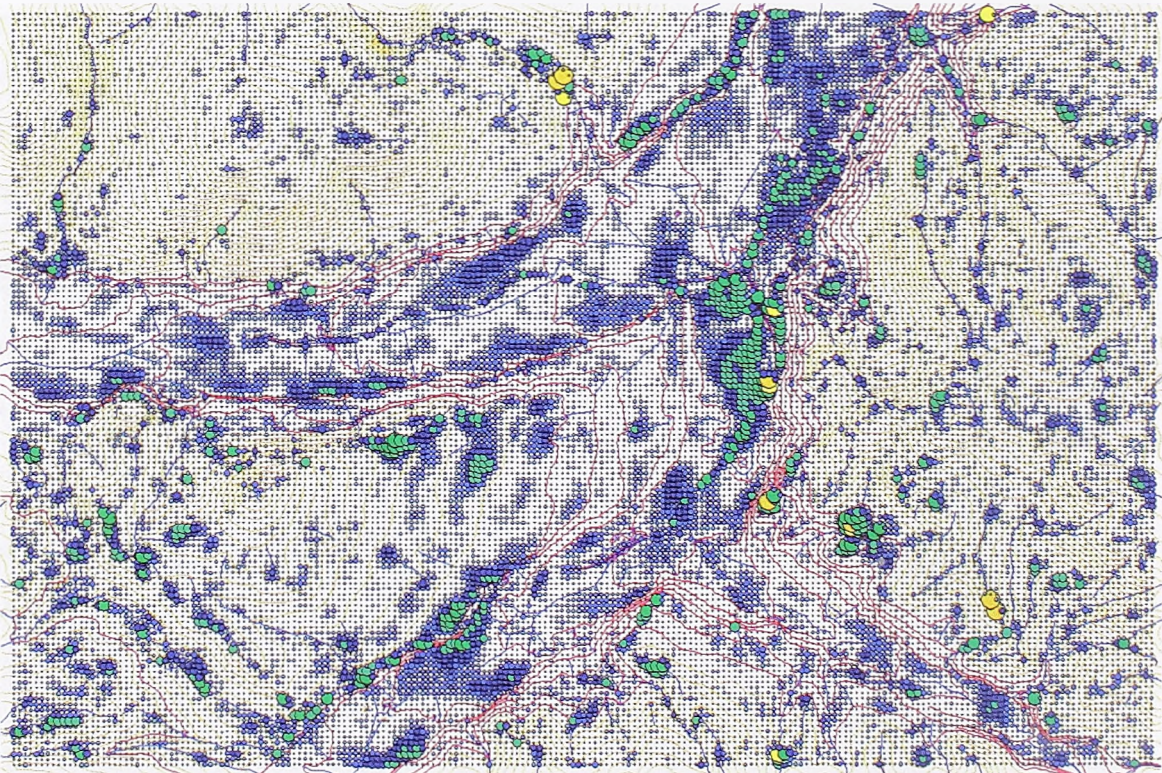


Slika B-23 : Grafički prikaz odstupanja rekonstruisane površi terena od teoretske površi; površ je rekonstruisana korišćenjem izohipsi na  $e=10m$ , sa definisanjem izohipsi gde padina prelazi naglo u dolinu i izohipsama na  $e=5m$  na ravnom terenu; nisu korišćene napredne funkcije za formiranje DMT-a (CFDT=da, RTSDV=Ne, MaxSDV=Ne, MCS=Ne, DL=Ne, kubna interpolacija)



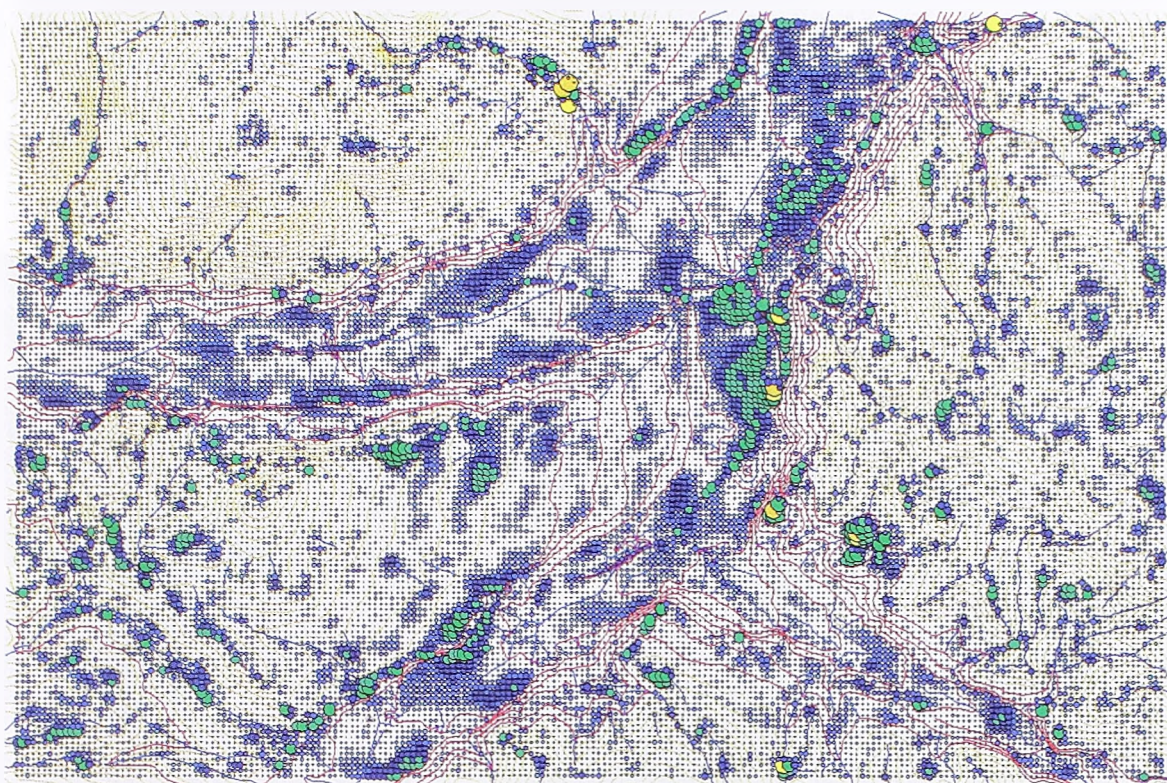


Slika B-24 : Grafički prikaz odstupanja rekonstruisane površi terena od teoretske površi; površ je rekonstruisana korišćenjem izohipsi na  $e=10m$ , sa definisanjem izohipsi gde padina prelazi u dolinu i izohipsama na  $e=5m$  na ravnom terenu; nisu korišćene napredne funkcije za formiranje DMT-a (CFDT=da, RTSDV=1m, ITER=5, MaxSDV=Ne, MCS=Ne, DL=Ne, kubna interpolacija)

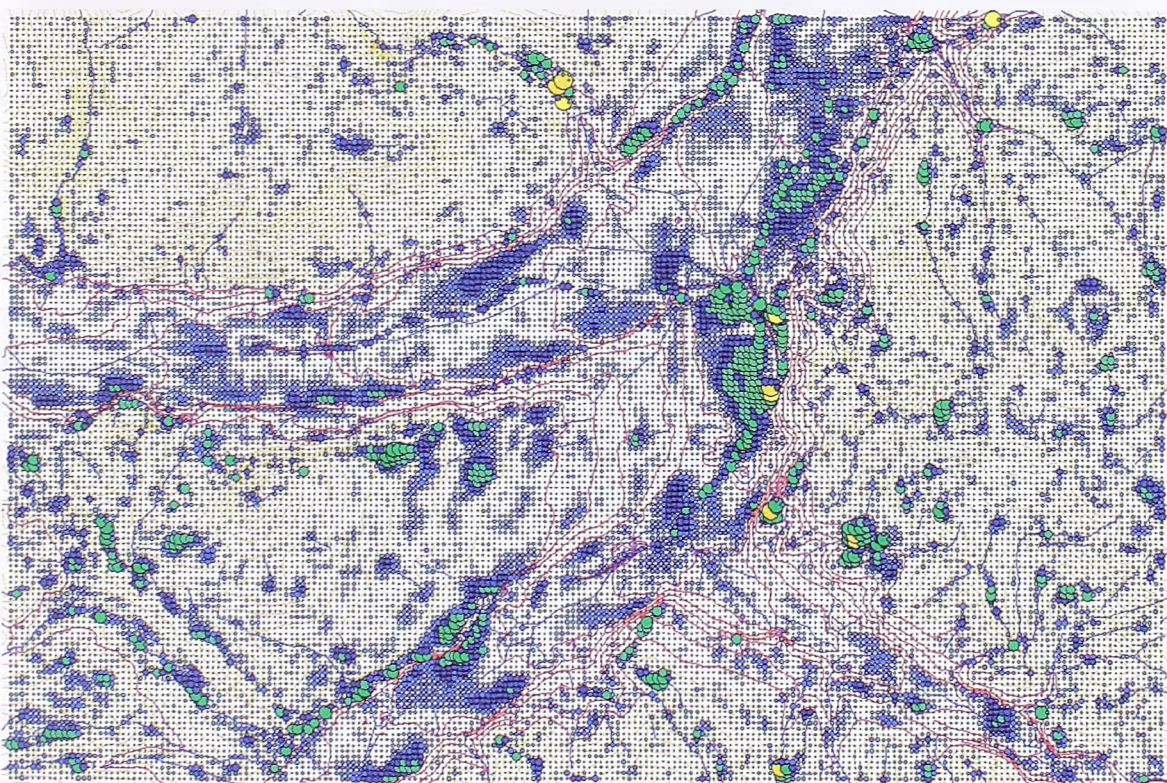


Slika B-25 : Grafički prikaz odstupanja rekonstruisane površi terena od teoretske površi; površ je rekonstruisana korišćenjem izohipsi na  $e=10m$ , sa definisanjem izohipsi gde padina prelazi u dolinu i izohipsama na  $e=5m$  na ravnom terenu; korišćene su napredne funkcije za formiranje DMT-a (CFDT=da, RTSDV=1m, ITER=5, MCS=10m, DL=VS, LB=da, LIH=Ne, LINK=da, MaxSDV=10, kubna interpolacija)





Slika B-26 : Grafički prikaz odstupanja rekonstruisane površi terena od teoretske površi; površ je rekonstruisana korišćenjem izohipsi na  $e=10m$ , sa definisanjem izohipsi gde padina prelazi u dolinu i izohipsama na  $e=5m$  na ravnom terenu; korišćene su napredne funkcije za formiranje DMT-a (CFDT=da, RTSDV=1m, ITER=5, MCS=10m, DL=VS, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10, kubna interpolacija)

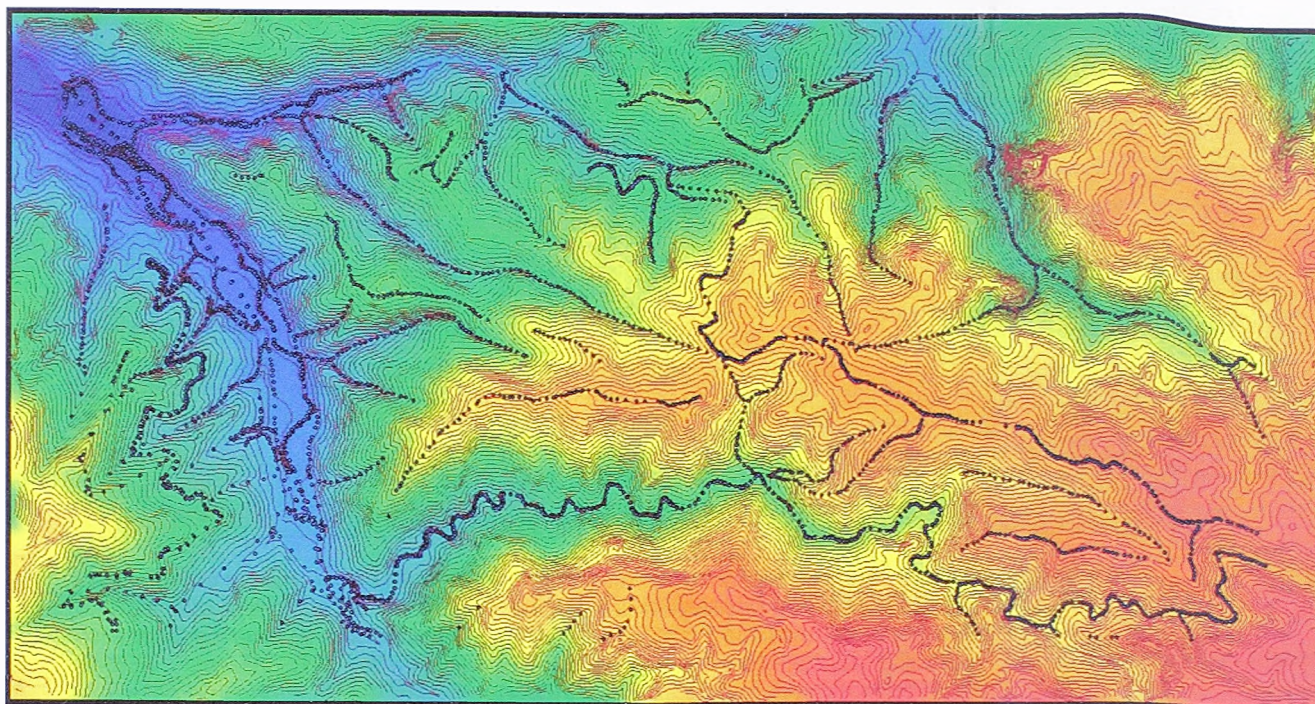


Slika B-27 : Grafički prikaz odstupanja rekonstruisane površi terena od teoretske površi; površ je rekonstruisana korišćenjem izohipsi na  $e=10m$ , sa definisanjem izohipsi gde padina prelazi u dolinu i izohipsama na  $e=5m$  na ravnom terenu; korišćene su napredne funkcije za formiranje DMT-a (CFDT=da, RTSDV=1m, ITER=5, MCS=10m, DL=VS, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10, linearna interpolacija)



## B.3 Test područje Valjevo

### B.3.1 Prikaz test područja



Slika B-28 : Test područje Valjeva za realizaciju eksperimenta sa ciljem uporedne analize različitih metoda formiranja DMT-a na osnovu ulaznih podataka u formi izohipsi; prikazane su izohipse na ekvidistanciji  $e=10m$  i originalne strukturne i prelomne linije terena (samo tačke) koje su izmerene na digitalnoj fotogrametrijskoj radnoj stanici i koje su poslužile za kontrolu

Dimenzije područja	6400m x 3400m
Raspon visina	403m – 1010m
Prosečna nadmorska visina	708m
Nagib terena	$0^{\circ}$ - $45^{\circ}$ (za 98% područja)
Prosečan nagib terena	$24.7^{\circ}$

Tabela B-12: Osnovne karakteristike test područja Valjevo



### B.3.2 Formiranje DMT-a korišćenjem metoda interpolacije implementiranih u okviru softverskog paketa ArcGIS

**NAPOMENA :** Korišćenjem ovih metoda formiran je DEM u vidu pravilnog grida sa veličinom ćelije grida od 10m. Procenjeno je da se korišćenjem ovako gustog grida čini zanemarljivom dodatna greška modeliranja, tj. greška interpolacije usled neadekvatne predstave terena modelom u vidu grida. Za proveru ove pretpostavke metodom prirodnog suseda interpolovan je grid od 10m i grid od 5m. Kod RBF metoda i kriginga visine su direktno interpolovane primenom predikcije. Broj kontrolnih visina je: 4118 za strukturne linije i 6840 za grid 50m.

Metod interpolacije	Strukturne linije					Grid 50m				
	Max	Min	Prosečna	STDEV	RMSE	Max	Min	Prosečna	STDEV	RMSE
TIN	10.02	-9.95	-1.49	3.42	3.73	8.52	-9.47	-0.02	1.21	1.21
NN (grid 10m)	10.02	-9.95	-1.64	3.43	3.80	8.15	-9.47	-0.02	1.24	1.24
NN (grid 5m)	10.02	-9.95	-1.56	3.38	3.72	8.15	-9.47	-0.02	1.21	1.21
IDWP2N12	13.29	-14.54	-1.89	4.05	4.47	11.27	-13.13	-0.03	1.91	1.92
Ord. kriging - gausova kriva	11.16	-13.97	-2.55	4.56	5.23	11.02	-10.35	-0.02	2.08	2.08
Ord. kriging - sferni model krive	11.06	-13.83	-2.52	4.52	5.17					
Univerzalni kriging	12.02	-9.95	-0.91	2.77	2.91	11.09	-12.47	-0.05	1.06	1.06
TopoToRaster	8.45	-17.74	-1.54	3.34	3.67	12.61	-21.11	-0.06	1.49	1.50
TopoToRaster*	8.45	-12.47	-1.52	3.31	3.64	12.61	-13.29	-0.05	1.44	1.44
RBF-MQ1						7.13	-11.29	-0.05	0.75	0.75
RBF-MQ2	7.71	-9.71	-0.60	2.17	2.25	6.66	-8.19	-0.04	0.69	0.69
RBF-MQ3	8.10	-10.48	-0.81	2.35	2.49					
RBF-ST	9.02	-10.54	-0.90	2.55	2.70	7.57	-9.70	-0.03	0.91	0.91
RBF-CRS	9.88	-9.82	-1.18	2.94	3.17	7.66	-9.88	-0.03	1.07	1.07
T01N100	7.78	-12.05	-0.77	2.35	2.48	46.93	-39.37	-0.03	1.29	1.29
T01N50	8.38	-9.20	-0.76	2.33	2.45	6.20	-7.22	-0.04	0.71	0.71
T01N10	11.51	-9.91	-0.92	2.67	2.82	8.79	-9.28	-0.05	0.90	0.90
R01N50	10.52	-9.59	-0.63	2.36	2.44	19.07	-12.71	-0.06	0.84	0.84
R01N10	18.28	-9.92	-0.74	2.69	2.79	8.51	-16.53	-0.05	0.95	0.95
R01N100	13.73	-12.97	-0.64	2.33	2.42	88.50	-75.57	-0.03	2.29	2.29

Tabela B-13: Greške rekonstrukcije površi terena na osnovu ulaznih podataka u formi izohipsi korišćenjem različitih metoda interpolacije implementiranih u okviru ArcGIS softvera; sve vrednosti su date u [m]

#### KORIŠĆENE OZNAKE ZA METODE INTERPOLACIJE:

- TIN - Linearna interpolacija na osnovu formiranog TIN-a i prostornih trouglova.
- NN - Interpolacija po metodi "prirodnog suseda" (engl. *Natural Neighbor*).
- IDWP2N12 - Interpolacija po metodi inverznih odstojanja (engl. *Inverse Distance Weighted*) sa parametrima: broj referentnih tačaka – 12, tip radijusa za pretraživanje – promenljiv, stepen – 2, maksimalno rastojanje – 500m, veličina izlazne ćelije – 10m.
- Ord. kriging - Interpolacija po metodi običnog kriginga (engl. *Ordinary Kriging*) sa korišćenjem krosvalidacije za ocenu optimalnih parametara interpolacije (parametri poluvariograma). Za model funkcije korišćene su gausova kriva i sferna funkcija.
- Univerzalni kriging - Interpolacija po metodi univerzalnog kriginga (engl. *Universal Kriging*) sa korišćenjem krosvalidacije za ocenu optimalnih parametara interpolacije (parametri poluvariograma).
- TopoToRaster - Algoritam iz *ArcToolbox* modula (baziran na *ANUDEM* algoritmu) – ulaz su bile samo vektorizovane izohipse.
- TopoToRaster\* - Algoritam iz *ArcToolbox* modula (baziran na *ANUDEM* algoritmu) – ulaz su bile samo vektorizovane izohipse. Iz rezultata su izbačene grube greške koje je algoritam napravio.
- RBF-MQ - Algoritam sa interpolacijom po metodi radijalnih baznih funkcija (engl. *Radial Basis Functions*), pri čemu je za radijalnu baznu funkciju izabrana multikvadratna funkcija. Krosvalidacija je korišćena za ocenu optimalnog parametra interpolacije.



- RBF-ST** - Algoritam sa interpolacijom po metodi radijalnih baznih funkcija (engl. *Radial Basis Functions*), pri čemu je za radijalnu baznu funkciju izabran splajn sa tenzijom (engl. *Spline With Tension*). Krosvalidacija je korišćena za ocenu optimalnog parametra interpolacije.
- RBF-CRS** - Algoritam sa interpolacijom po metodi radijalnih baznih funkcija (engl. *Radial Basis Functions*), pri čemu je za radijalnu baznu funkciju izabran kompletno regularizovani splajn (engl. *Completely Regularised Spline*). Krosvalidacija je korišćena za ocenu optimalnog parametra interpolacije.
- TaaNbb** - Algoritam sa interpolacijom po metodi splajn sa tenzijom (engl. *Spline With Tension*). Parametri splajn funkcije su posebno zadavani. Parametar aa je težina (engl. *Weight*) i iznosi: 1.0 (za aa=01). Parametar bb je broj tačaka koji se koristi za proračun svake tačke rastera i iznosi 10, 50 ili 100.
- RaaNbb** - Algoritam sa interpolacijom po metodi regularizovanog splajna (engl. *Regularized Spline*). Parametri splajn funkcije su posebno zadavani. Parametar aa je težina (engl. *Weight*) i iznosi 0.1 (za aa=01). Parametar bb je broj tačaka koji se koristi za proračun svake tačke rastera i iznosi 10, 50 ili 100.

B.3.3 Formiranje DMT-a korišćenjem metoda interpolacije razvijenih u okviru ovog rada i implementiranih u softveru Surfing

Ulazni podaci	Test podaci	Parametri rekonstrukcije površi										Tip interpolacije	Prosečan nagib terena	Broj tačaka	Srednja kvadratna greška (RMSE) [m]	Standardna devijacija ( $\sigma$ ) [m]	Prosečna greška [m]	Minimalna greška [m]	Maksimalna greška [m]		
		CFDT	RTSDV [m]	ITER	MCS [m]	DL	LB	LIH	LINK	SPLINE [m]	MaxSDV [m]										
		+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14,018	4118	2,08	2,01	-0,48	-8,80	8,17
		+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9,12	4118	3,70	3,37	-1,50	-9,95	9,37
		+	-	-	10	VS	+	-	+	25	-	-	-	-	14,241	4118	2,22	2,08	-0,72	-8,73	7,81
		+	-	-	10	VS	+	-	+	25	-	-	-	-	14,733	4118	2,51	2,33	-0,88	-9,24	8,08
		+	1	5	100	EM	-	+	+	-	-	-	-	-	14,259	4118	2,18	2,08	-0,61	-8,60	8,10
		+	1	5	100	EM	-	+	+	-	-	-	-	-	15,886	4118	2,30	2,18	-0,71	-8,75	7,98
		+	1	5	100	ME	-	+	+	-	-	-	-	-	15,525	4118	1,99	1,92	-0,48	-8,84	6,79
		+	1	5	100	ME	-	+	+	-	-	-	-	-	16,945	4118	2,12	2,02	-0,60	-9,08	6,80
		+	1	5	10	VS	+	-	+	25	-	-	-	-	14,177	4118	2,39	2,23	-0,81	-8,73	8,15
		+	1	5	10	VS	+	-	+	25	-	-	-	-	14,65	4118	2,49	2,31	-0,88	-8,81	8,08
		+	1	5	10	VS	+	+	+	-	-	-	-	-	15,05	4118	2,44	2,27	-0,83	-10,86	8,15
		+	1	5	10	VS	+	+	+	-	-	-	-	-	15,364	4118	2,52	2,34	-0,89	-10,89	8,08
		+	1	5	10	VS	+	+	+	25	-	-	-	-	14,929	4118	2,41	2,26	-0,80	-12,25	8,15
		+	1	5	10	VS	+	+	+	25	-	-	-	-	15,272	4118	2,51	2,34	-0,87	-12,51	8,08
		+	1	5	10	VS	-	+	+	25	-	-	-	-	14,46	4118	2,37	2,23	-0,75	-12,60	8,15
		+	1	5	10	VS	-	+	+	25	-	-	-	-	15,279	4118	2,51	2,34	-0,87	-12,51	8,08
		+	1	5	10	VS	-	+	+	-	-	-	-	-	14,628	4118	2,38	2,25	-0,74	-11,22	8,15
		+	1	5	10	VS	-	+	+	-	-	-	-	-	15,461	4118	2,51	2,35	-0,86	-11,07	8,08
		+	5	5	10	VS	+	+	+	-	-	-	-	-	14,211	4118	2,19	2,06	-0,70	-8,93	6,77
		+	5	5	10	VS	+	+	+	-	-	-	-	-	14,817	4118	2,53	2,35	-0,91	-9,02	8,61
		+	10	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13,892	4118	2,08	1,98	-0,56	-8,80	7,00
		+	10	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9,104	4118	3,69	3,36	-1,49	-9,95	9,37
		+	1	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,113	4118	3,55	3,15	-1,42	-9,95	8,46
		+	1	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9,234	4118	3,63	3,21	-1,49	-9,95	8,46

Tabela B-14: Greške rekonstrukcije površi korišćenjem ulaznih podataka u formi izohipsi sa ekvidistancijom  $e=10m$  (u visinskim tačkama)



Ulazni podaci	Test podaci	Parametri rekonstrukcije površi										Tip interpolacije	Prosečan nagib terena	Broj tačaka	Srednja kvadratna greška (RMSE) [m]	Standardna devijacija ( $\sigma$ ) [m]	Prosečna greška [m]	Minimalna greška [m]	Maksimalna greška [m]	
		CFDT	RTSDV [m]	ITER	MCS [m]	DL	LB	LIH	LINK	SPLINE [m]	MaxSDV [m]									
		+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	CUBIC	24,933	6840	0,66	0,65	0,00	-5,18	7,83
		+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	LINEAR	23,851	6840	1,20	1,20	0,02	-8,52	9,48
		+	-	-	10	VS	+	-	+	+	+	25	CUBIC	24,769	6840	0,66	0,66	0,00	-5,51	5,46
		+	-	-	10	VS	+	-	+	+	+	25	LINEAR	24,627	6840	0,78	0,78	0,01	-7,12	5,67
		+	1	5	100	EM	-	+	+	+	+	-	CUBIC	24,716	6840	0,66	0,66	0,00	-5,27	5,77
		+	1	5	100	EM	-	+	+	+	+	-	LINEAR	24,681	6840	0,73	0,73	0,02	-5,45	5,40
		+	1	5	100	ME	-	+	+	+	+	-	CUBIC	24,894	6840	0,66	0,66	0,01	-5,07	6,04
		+	1	5	100	ME	-	+	+	+	+	-	LINEAR	24,841	6840	0,72	0,72	0,03	-5,16	6,10
		+	1	5	10	VS	+	-	+	+	+	25	CUBIC	24,653	6840	0,72	0,72	0,00	-6,20	5,51
		+	1	5	10	VS	+	-	+	+	+	25	LINEAR	24,58	6840	0,79	0,79	0,01	-6,23	5,46
		+	1	5	10	VS	+	+	+	+	+	-	CUBIC	24,725	6840	0,75	0,75	0,01	-9,97	6,16
		+	1	5	10	VS	+	+	+	+	+	10	LINEAR	24,635	6840	0,82	0,82	0,02	-9,97	6,09
		+	1	5	10	VS	+	+	+	+	+	-	CUBIC	24,681	6840	0,75	0,75	0,01	-7,82	5,52
		+	1	5	10	VS	+	+	+	+	+	25	LINEAR	24,612	6840	0,82	0,82	0,02	-7,67	5,53
		+	1	5	10	VS	-	+	+	+	+	25	CUBIC	24,692	6840	0,75	0,74	0,01	-8,82	6,03
		+	1	5	10	VS	-	+	+	+	+	25	LINEAR	24,62	6840	0,82	0,82	0,02	-8,23	5,67
		+	1	5	10	VS	-	+	+	+	+	-	CUBIC	24,743	6840	0,74	0,74	0,01	-10,12	6,22
		+	1	5	10	VS	-	+	+	+	+	-	LINEAR	24,643	6840	0,82	0,81	0,02	-10,03	6,09
		+	5	5	10	VS	+	+	+	+	+	10	CUBIC	24,854	6840	0,67	0,67	0,00	-7,78	9,12
		+	5	5	10	VS	+	+	+	+	+	10	LINEAR	24,661	6840	0,81	0,81	0,02	-8,12	9,48
		+	10	5	-	-	-	-	-	-	-	-	CUBIC	24,917	6840	0,67	0,67	0,00	-6,04	8,69
		+	10	5	-	-	-	-	-	-	-	-	LINEAR	23,848	6840	1,20	1,20	0,02	-8,52	9,48
		+	1	5	-	-	-	-	-	-	-	-	CUBIC	24,114	6840	1,14	1,13	0,01	-8,15	9,48
		+	1	5	-	-	-	-	-	-	-	-	LINEAR	23,753	6840	1,19	1,19	0,02	-8,15	9,48

Tabela B-15: Greške rekonstrukcije površi korišćenjem ulaznih podataka u formi izohipse sa ekvidistancijom  $e=10m$  (u tačkama pravilnog grida veličine 50m)

Ulazni podaci	Test podaci	Parametri rekonstrukcije površi										Tip interpolacije	Prosečan nagib terena	Broj tačaka	Srednja kvadratna greška (RMSE) [m]	Standardna devijacija ( $\sigma$ ) [m]	Prosečna greška [m]	Minimalna greška [m]	Maksimalna greška [m]		
		CFDT	RTSDV [m]	ITER	MCS [m]	DL	LB	LIH	LINK	SPLINE [m]	MaxSDV [m]										
		+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	CUBIC	24,932	168399	0,67	0,67	0,00	-8,66	9,24
		+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	LINEAR	23,867	168399	1,22	1,22	0,02	-9,90	9,66
		+	-	-	10	VS	+	-	+	25	-	-	-	CUBIC	24,788	168399	0,68	0,68	0,00	-8,45	8,41
		+	-	-	10	VS	+	-	+	25	-	-	-	LINEAR	24,673	168399	0,80	0,80	0,02	-8,45	8,62
		+	1	5	100	EM	-	+	+	-	-	-	-	CUBIC	24,764	168399	0,68	0,68	0,00	-8,41	8,98
		+	1	5	100	EM	-	+	+	-	-	-	-	LINEAR	24,733	168399	0,75	0,75	0,02	-8,52	8,50
		+	1	5	100	ME	-	+	+	-	-	-	-	CUBIC	24,962	168399	0,67	0,67	0,01	-8,72	7,20
		+	1	5	100	ME	-	+	+	-	-	-	-	LINEAR	24,923	168399	0,73	0,73	0,03	-8,83	7,52
		+	1	5	10	VS	+	-	+	25	-	-	-	CUBIC	24,672	168399	0,73	0,73	0,00	-8,45	8,52
		+	1	5	10	VS	+	-	+	25	-	-	-	LINEAR	24,615	168399	0,80	0,80	0,02	-8,45	8,61
		+	1	5	10	VS	+	+	+	-	-	-	-	CUBIC	24,727	168399	0,76	0,76	0,00	-9,97	9,35
		+	1	5	10	VS	+	+	+	-	-	-	-	LINEAR	24,664	168399	0,82	0,82	0,02	-9,97	9,37
		+	1	5	10	VS	+	+	+	25	-	-	-	CUBIC	24,705	168399	0,75	0,75	0,00	-8,78	8,52
		+	1	5	10	VS	+	+	+	25	-	-	-	LINEAR	24,644	168399	0,82	0,82	0,02	-8,62	8,61
		+	1	5	10	VS	-	+	+	25	-	-	-	CUBIC	24,713	168399	0,75	0,75	0,01	-8,98	8,79
		+	1	5	10	VS	-	+	+	25	-	-	-	LINEAR	24,638	168399	0,82	0,82	0,02	-8,62	8,55
		+	1	5	10	VS	-	+	+	-	-	-	-	CUBIC	24,752	168399	0,74	0,74	0,01	-10,12	8,65
		+	1	5	10	VS	-	+	+	-	-	-	-	LINEAR	24,669	168399	0,82	0,82	0,02	-10,03	8,30
		+	5	5	10	VS	+	+	+	-	-	-	-	CUBIC	24,867	168399	0,69	0,69	0,00	-8,67	9,12
		+	5	5	10	VS	+	+	+	-	-	-	-	LINEAR	24,691	168399	0,82	0,82	0,02	-8,70	9,66
		+	10	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	CUBIC	24,907	168399	0,68	0,68	0,00	-8,66	9,16
		+	10	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	LINEAR	23,867	168399	1,22	1,22	0,02	-9,90	9,66
		+	1	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	CUBIC	24,141	168399	1,15	1,15	0,01	-9,87	9,66
		+	1	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	LINEAR	23,799	168399	1,20	1,20	0,02	-9,90	9,66

Tabela B-16: Greške rekonstrukcije površi korišćenjem ulaznih podataka u formi izohipsi sa ekvidistancijom  $e=10m$  (u tačkama pravilnog grida veličine 10m)



**Valjevo**

**Ulaz - Izohipse na e=10m**

**DMT25 - CFDT=da, MCS=10m, DL=VS, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10, SPLINE=ne, RTSDV=5m, ITER=5**

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
24.867	168399	0.689	0.689	-0.001	-8.669	9.124
0.0 5.0	2536	1.967	1.965	-0.100	-8.194	8.896
5.0 10.0	9139	1.617	1.616	-0.066	-8.669	9.099
10.0 15.0	17300	1.042	1.042	-0.002	-7.573	9.124
15.0 20.0	23864	0.687	0.687	-0.006	-6.825	6.216
20.0 25.0	30035	0.437	0.437	0.003	-6.378	8.531
25.0 30.0	33010	0.339	0.339	0.003	-7.075	5.675
30.0 35.0	28312	0.302	0.302	0.007	-6.381	8.737
35.0 40.0	15206	0.336	0.336	0.013	-3.186	8.006
40.0 45.0	6143	0.432	0.432	0.023	-4.189	7.338
45.0 50.0	1928	0.491	0.491	0.016	-2.066	6.060
50.0 55.0	591	0.693	0.693	0.011	-6.128	6.476
55.0 60.0	183	1.185	1.171	0.175	-2.676	7.661
60.0 65.0	91	1.197	1.182	0.186	-3.046	6.589
65.0 70.0	38	1.567	1.500	0.448	-2.465	6.225
70.0 75.0	16	1.282	1.188	-0.466	-2.315	2.096
75.0 80.0	4	1.908	1.906	-0.071	-2.815	1.499
80.0 85.0	3	3.395	2.510	1.866	-0.393	4.568

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	1.112	0.002	-1.117	0.003		0.286
STDEV	1.113	0.002	-1.120	0.003		0.285

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
24.691	168399	0.818	0.818	0.017	-8.701	9.661
0.0 5.0	2536	2.140	2.138	-0.094	-8.268	8.926
5.0 10.0	9139	1.810	1.809	-0.016	-8.701	9.339
10.0 15.0	17300	1.217	1.216	0.045	-8.347	9.661
15.0 20.0	23864	0.859	0.858	0.021	-8.602	7.526
20.0 25.0	30035	0.587	0.587	0.022	-7.131	8.650
25.0 30.0	33010	0.462	0.462	0.011	-7.370	8.111
30.0 35.0	28312	0.400	0.400	0.016	-7.523	9.510
35.0 40.0	15206	0.422	0.421	0.019	-3.708	9.228
40.0 45.0	6143	0.527	0.526	0.023	-6.923	9.190
45.0 50.0	1928	0.570	0.570	0.022	-3.504	6.335
50.0 55.0	591	0.798	0.797	-0.021	-6.358	7.482
55.0 60.0	183	1.352	1.339	0.184	-2.861	9.194
60.0 65.0	91	1.332	1.315	0.208	-3.400	7.386
65.0 70.0	38	1.694	1.626	0.469	-2.776	6.862
70.0 75.0	16	1.640	1.524	-0.586	-3.841	2.315
75.0 80.0	4	2.075	2.070	-0.121	-3.119	1.544
80.0 85.0	3	4.731	2.519	3.270	0.375	4.960

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	1.309	0.002	-1.246	0.003		0.295
STDEV	1.312	0.002	-1.253	0.003		0.293

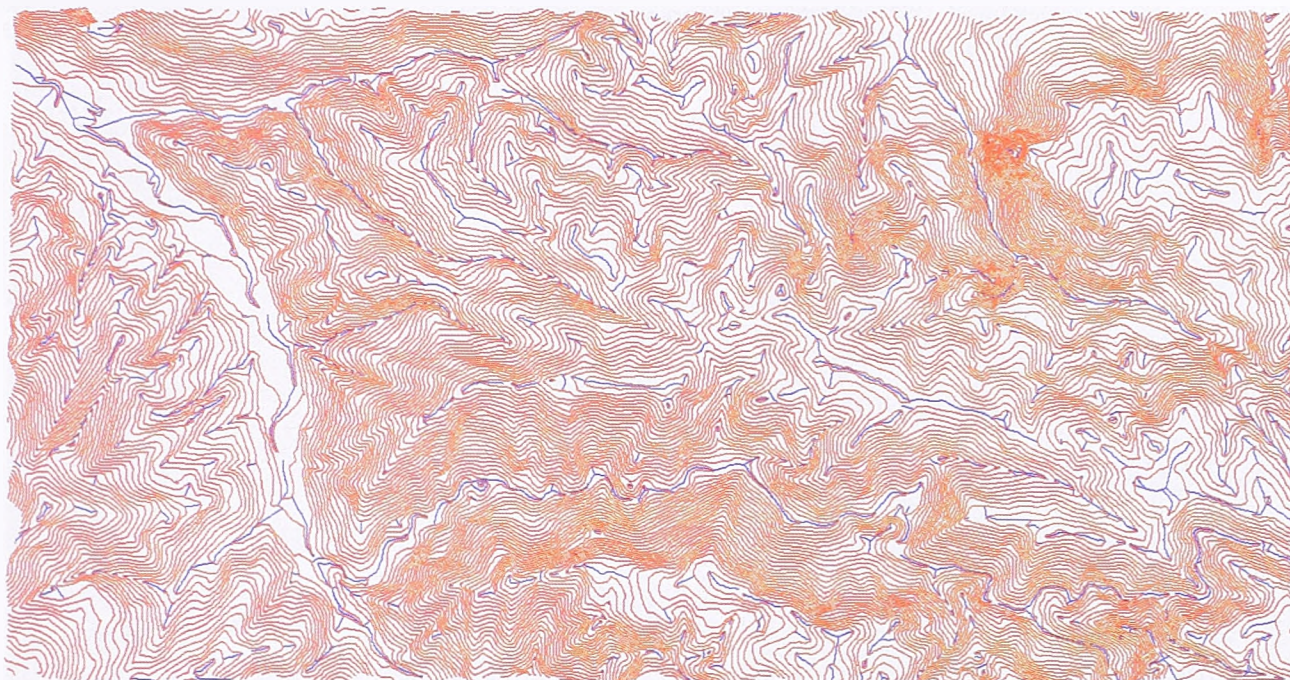
ERROR DISTRIBUTION

		CUBIC		LINEAR	
Range	No. pts	%	No. pts	%	
0.0m - 1.0m	154684	91.9%	149660	88.9%	
1.0m - 2.0m	9282	5.5%	12615	7.5%	
2.0m - 5.0m	4157	2.5%	5681	3.4%	
5.0m - 9.7m	276	0.2%	443	0.3%	

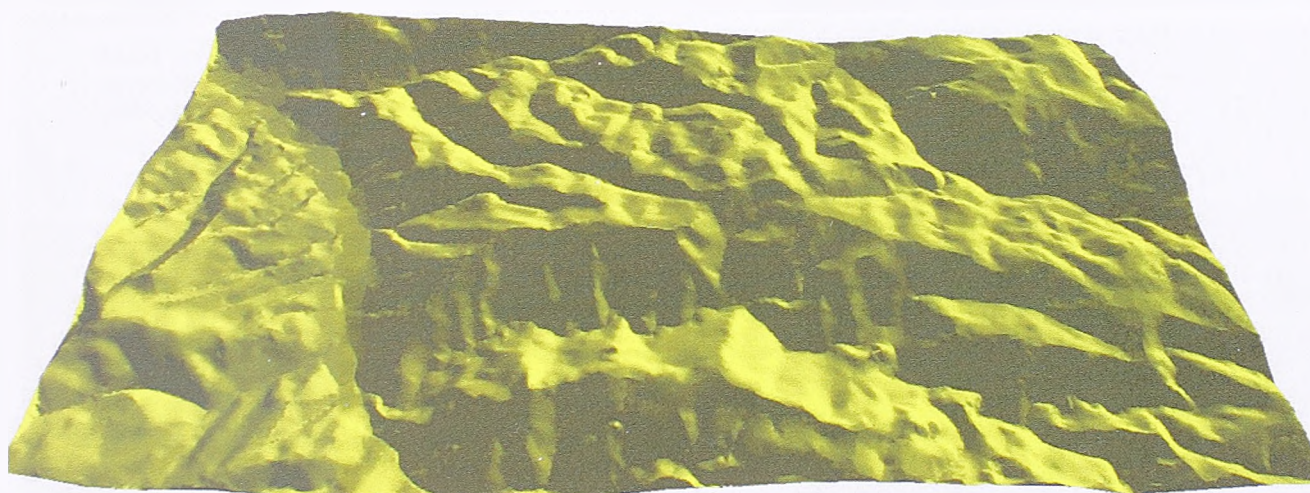
Izveštaj B-4 : Upoređenje referentnih visina grida na 10m i visina interpolovanih iz DMT25 dobijenog na osnovu izohipsi na e=10m - test područje Valjevo



### B.3.4 Grafički prikaz rezultata formiranja DMT-a na osnovu izohipsi sa ekvidistancijom 10m



a) Ulazni podaci u formi izohipsi (sepija) i detektovane strukturne linije (plavo)



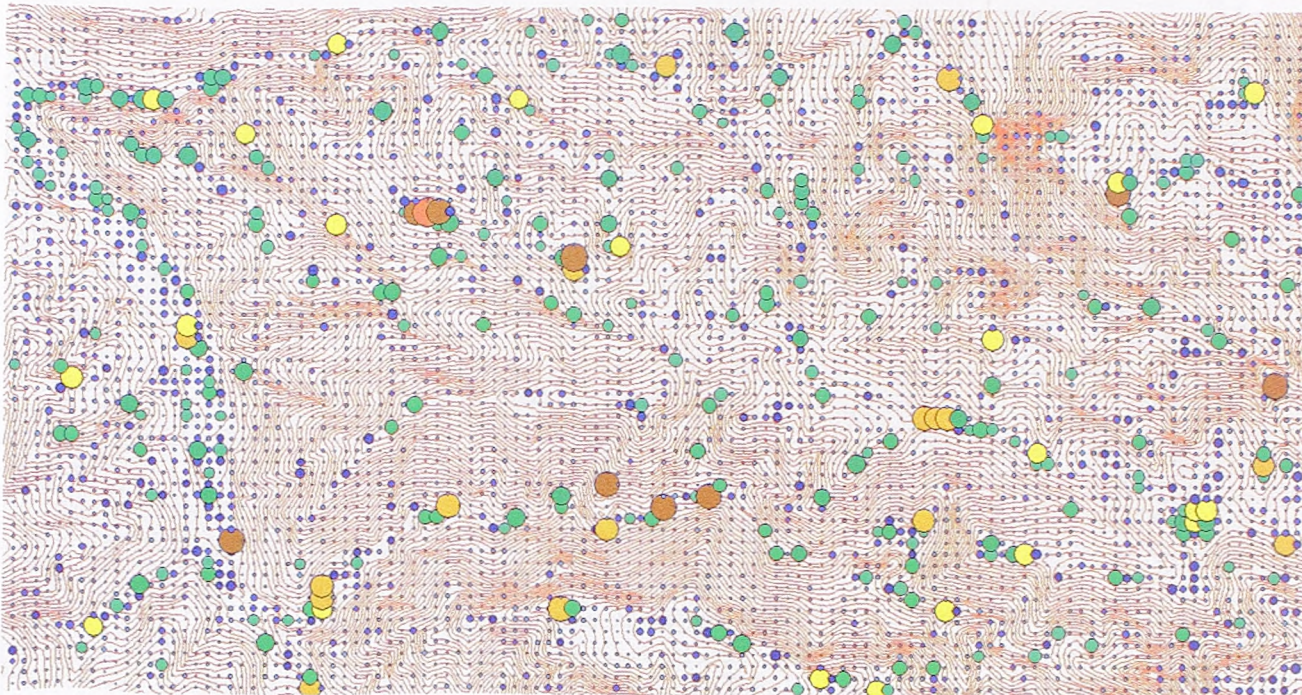
b) Senčeni model (3D model) rekonstruisane površi terena

Slika B.29 : Rezultat detekcije i ekstrakcije strukturnih linija terena; korišćen je algoritam VS; parametri obrade: CFDT=da, RTSDV=1m, ITER=5, MCS=10m, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10m

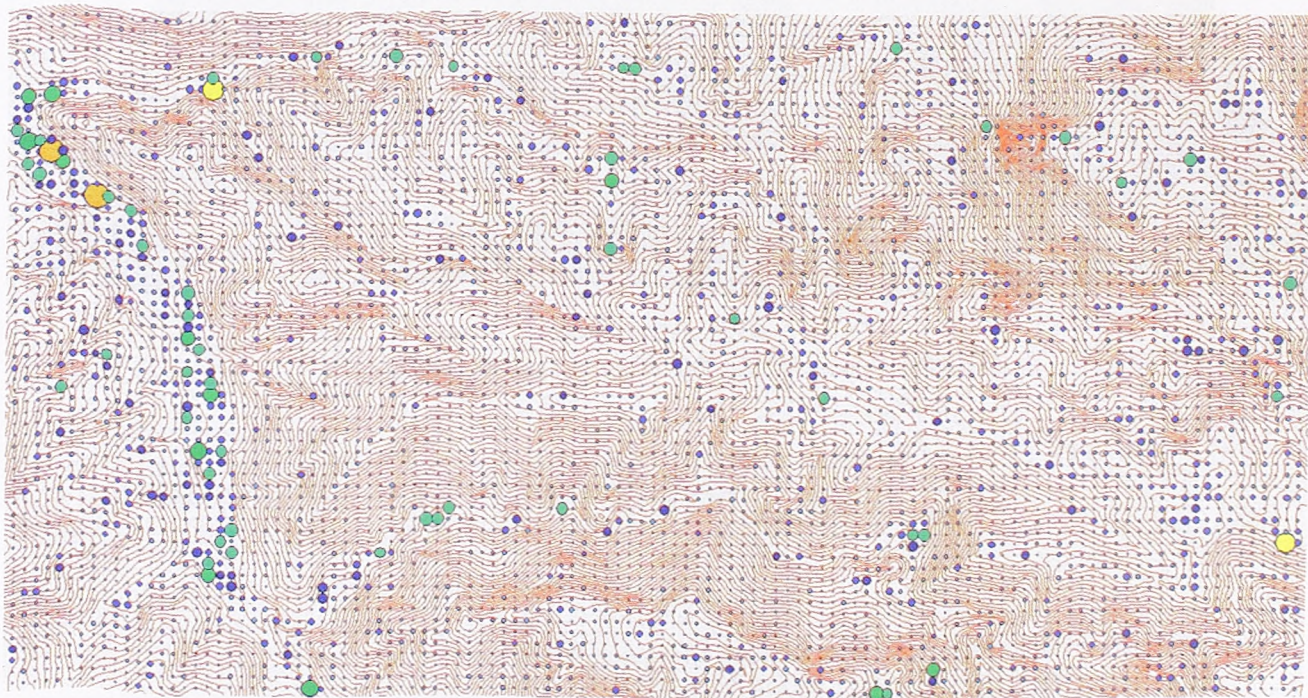


### B.3.5 Grafički prikaz odstupanja teoretske površi terena od površi terena dobijene korišćenjem metoda interpolacije razvijenih u okviru ovog rada

**NAPOMENA :** Odstupanja visina na kontrolnim tačkama su prikazana u zavisnosti od apsolutnog iznosa odstupanja, korišćenjem različitih boja (Tabela B-11) i veličine simbola (kruga)

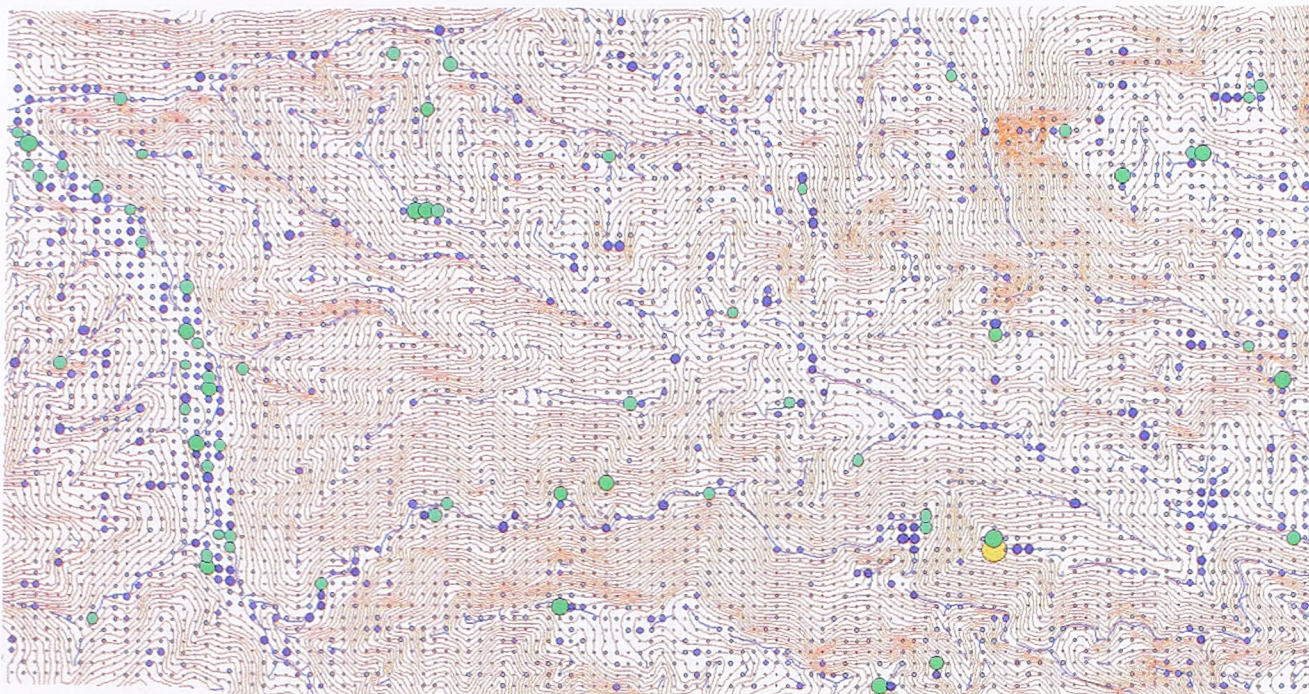


Slika B.30 : Grafički prikaz odstupanja rekonstruisane površi terena od teoretske površi; površ je rekonstruisana korišćenjem izohipsi sa ekvidistancijom  $e=10m$  i bez korišćenja naprednih funkcija za formiranje DMT-a (CFDT=Ne, RTSDV=Ne, MaxSDV=Ne, MCS=Ne, DL=Ne, linearna interpolacija)

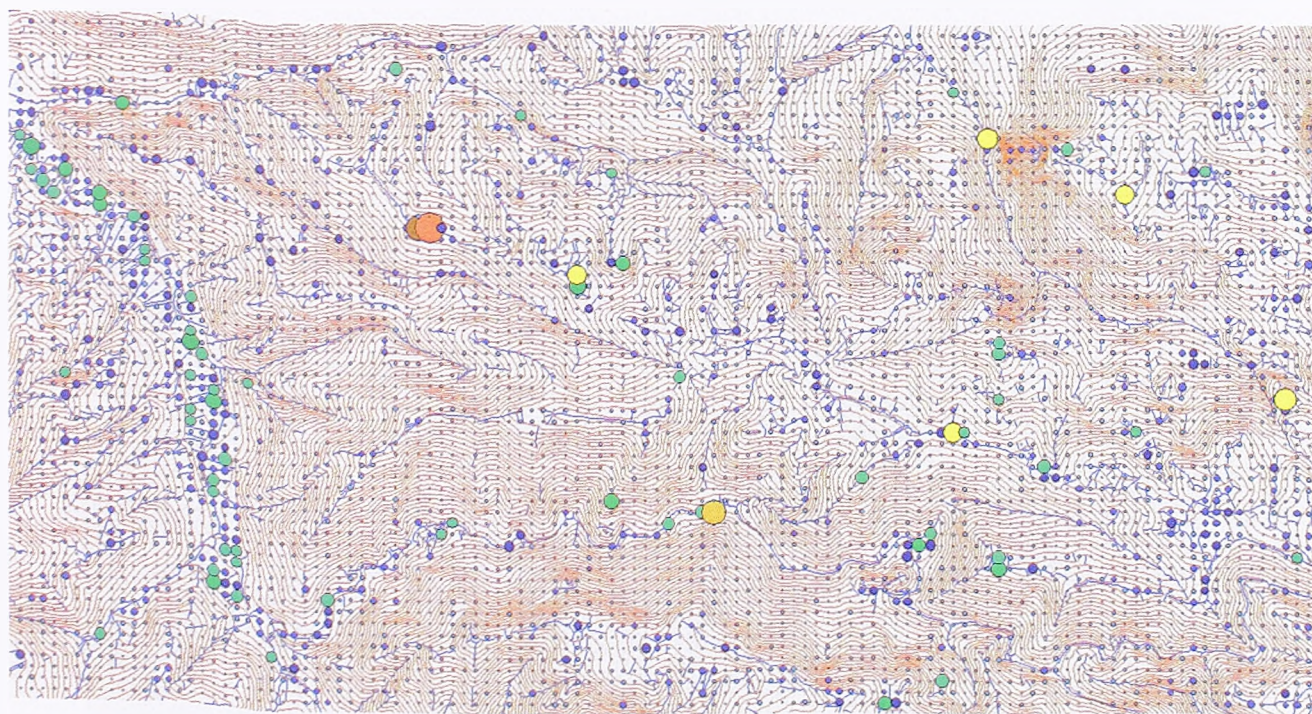


Slika B.31 : Grafički prikaz odstupanja rekonstruisane površi terena od teoretske površi; površ je rekonstruisana korišćenjem izohipsi sa ekvidistancijom  $e=10m$  i bez korišćenja naprednih funkcija za formiranje DMT-a (CFDT=Ne, RTSDV=Ne, MaxSDV=Ne, MCS=Ne, DL=Ne, kubna interpolacija)





Slika B.32 : Grafički prikaz odstupanja rekonstruisane površi terena od teoretske površi; površ je rekonstruisana korišćenjem izohipsi sa ekvidistancijom  $e=10m$  i sa korišćenjem naprednih funkcija za formiranje DMT-a (CFDT=da, RTSDV=5m, ITER=5, MCS=10m, DL=VS, LB=da, LIH=da, LINK=DA, MaxSDV=10m, kubna interpolacija)



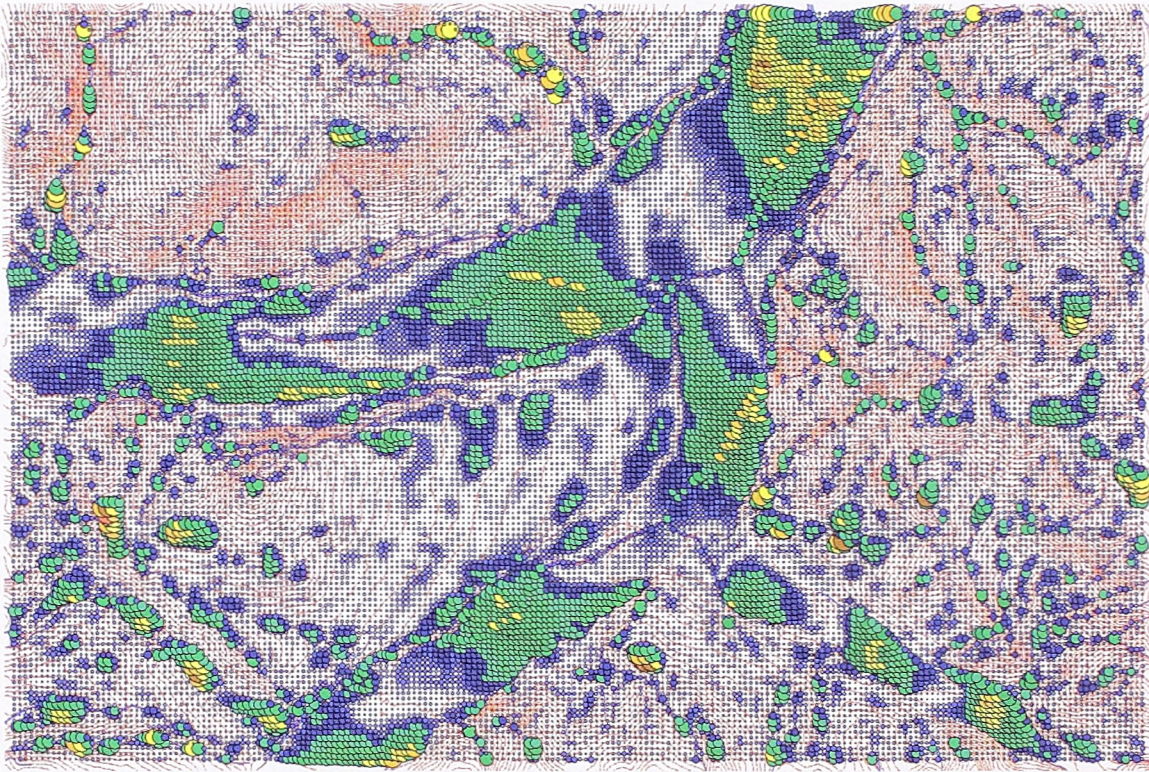
Slika B.33 : Grafički prikaz odstupanja rekonstruisane površi terena od teoretske površi; površ je rekonstruisana korišćenjem izohipsi sa ekvidistancijom  $e=10m$  i sa korišćenjem naprednih funkcija za formiranje DMT-a (CFDT=da, RTSDV=1m, ITER=5, MCS=100m, DL=ME, LB=da, LIH=Ne, LINK=DA, MaxSDV=10m, kubna interpolacija)



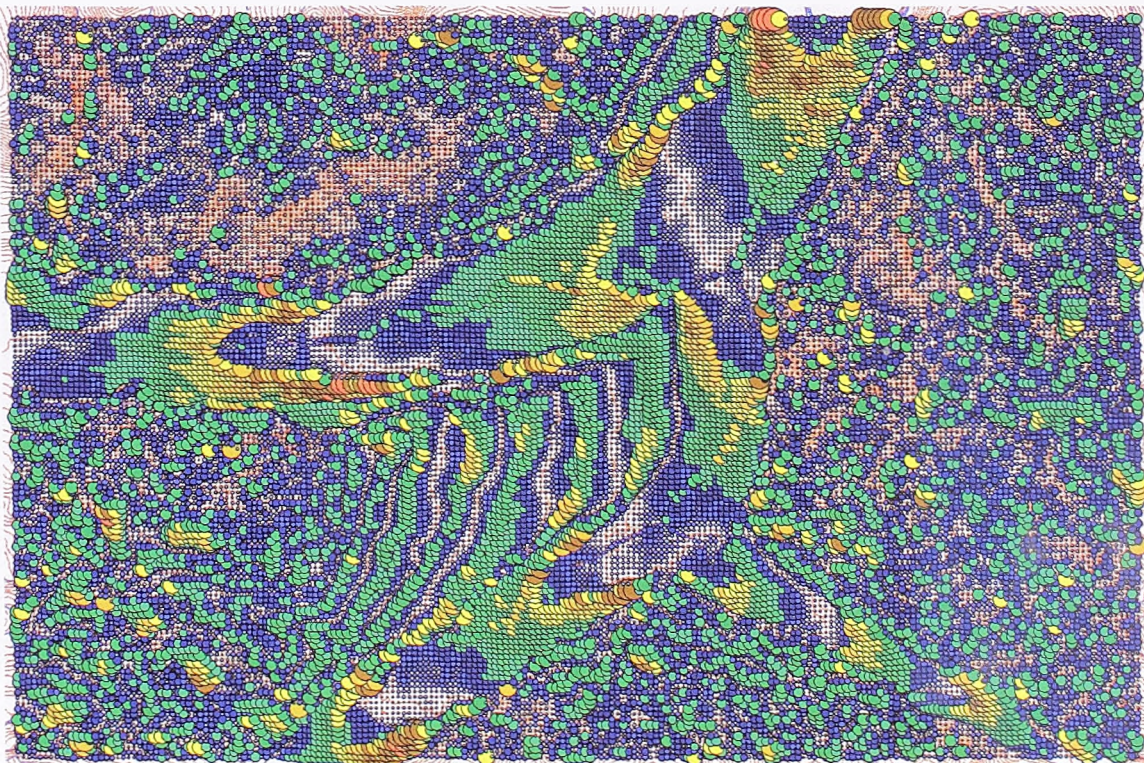
## B.4 Grafički prikaz grešaka rekonstrukcije površi terena korišćenjem metoda interpolacije implementiranih u okviru softverskog paketa ArcGIS

### B.4.1 Test područje Novi Pazar

**NAPOMENA** : Predstavljene su greške dobijene postupcima opisanim u poglavlju B.2.2 (Tabela B-2). Greške su prikazane korišćenjem boja (Tabela B-11) i veličine simbola.

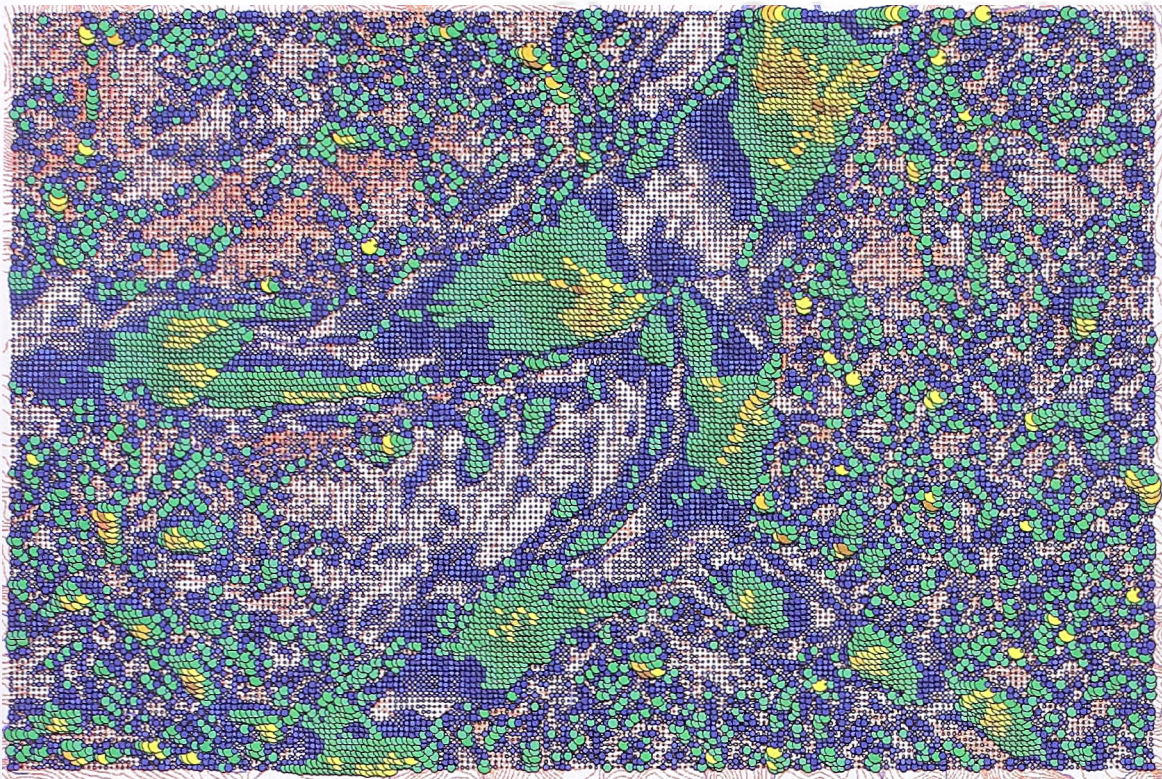


Slika B.34 : Greške dobijene korišćenjem interpolacije po metodi prirodnog suseda (NN)

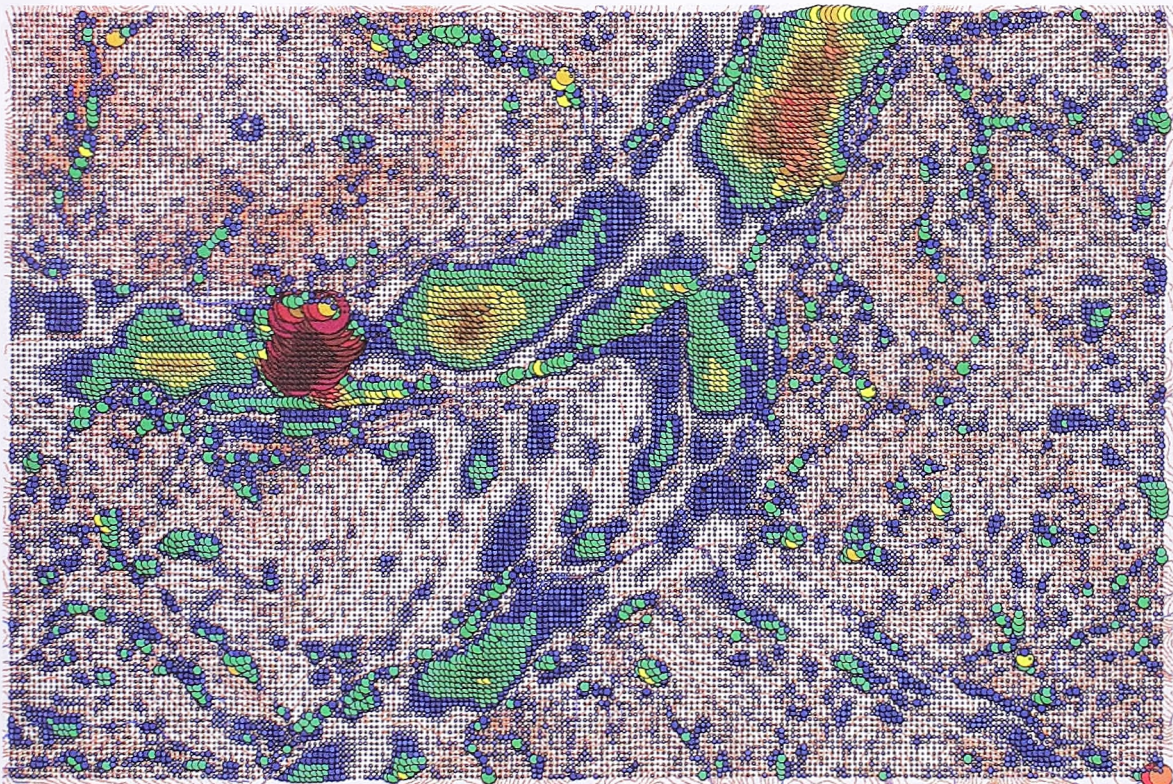


Slika B.35 : Greške dobijene korišćenjem interpolacije po metodi inverznih odstojanja (IDW12)



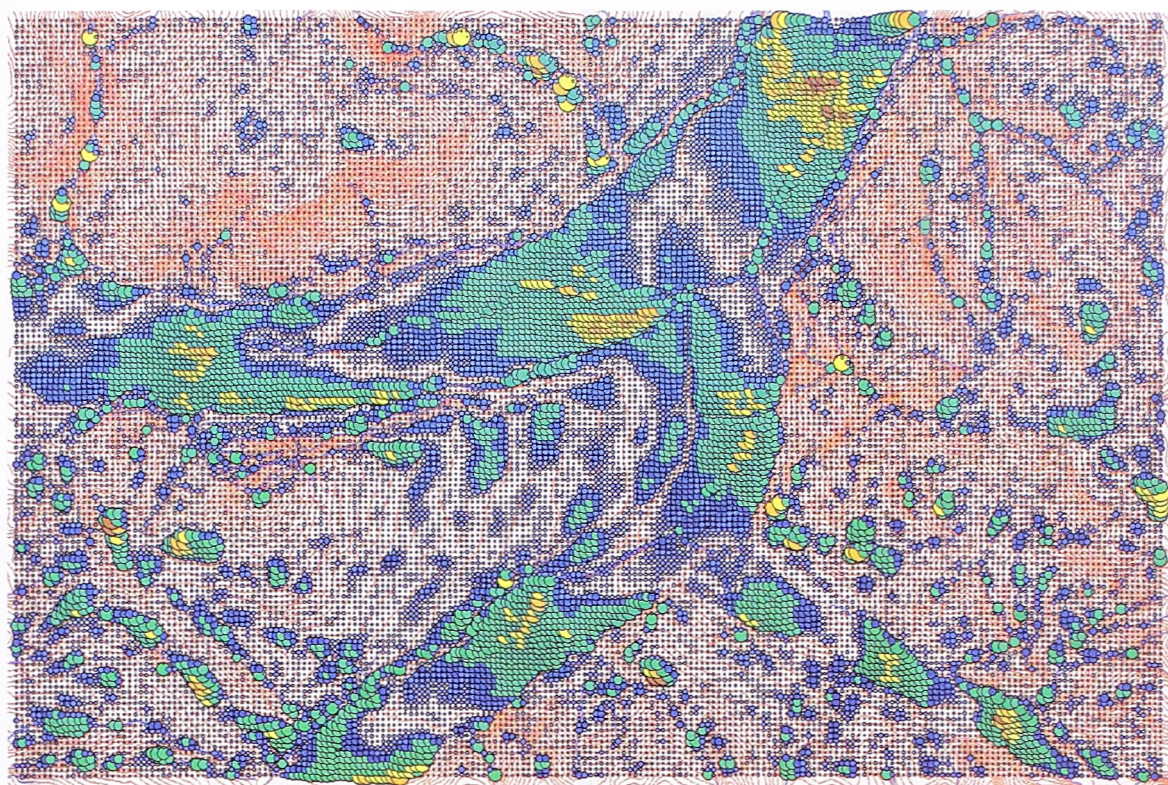


Slika B.36 : Greške dobijene korišćenjem interpolacije po metodi običnog kriginga (Ord. kriging)

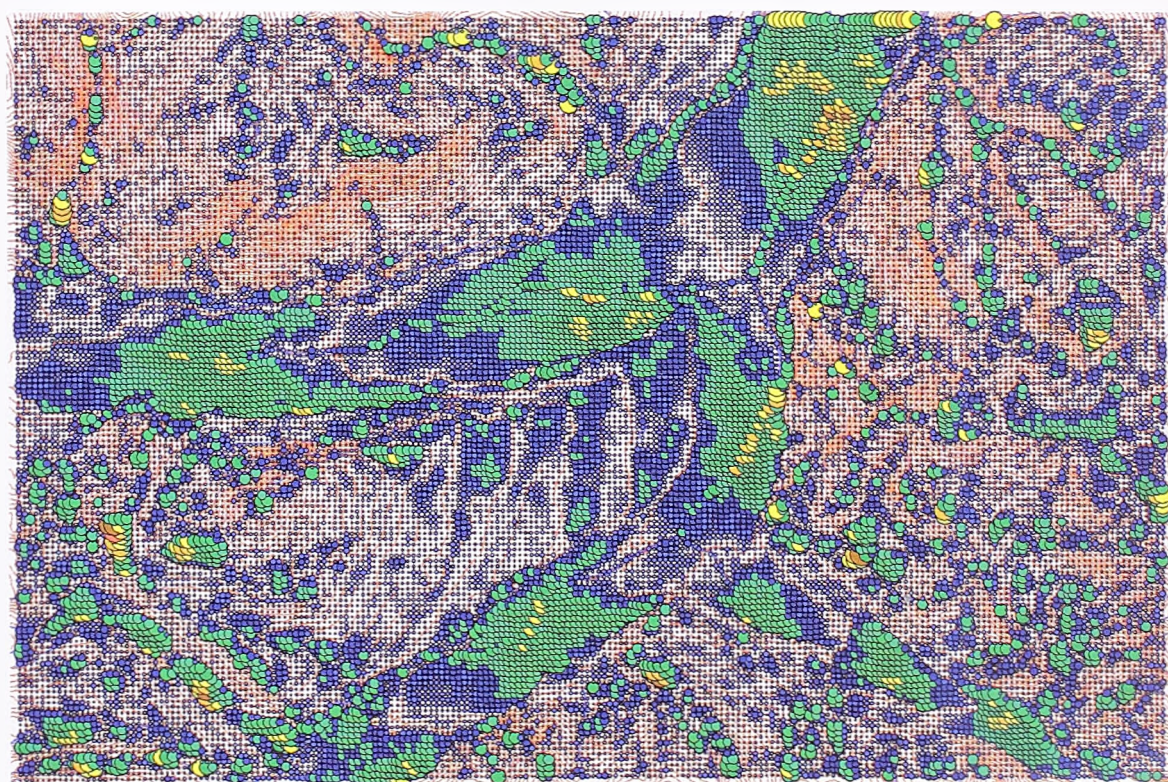


Slika B.37 : Greške dobijene korišćenjem interpolacije po metodi konačnih razlika sa uslovom odvodnjavanja (ANUDEM algoritam, TopoToRaster); veličina kruga za prikaz greške je ograničena





Slika B.38 : Greške dobijene korišćenjem interpolacije po metodi radijalnih baznih funkcija; za baznu funkciju je izabrana multikvadratna funkcija (RBF-MQ)

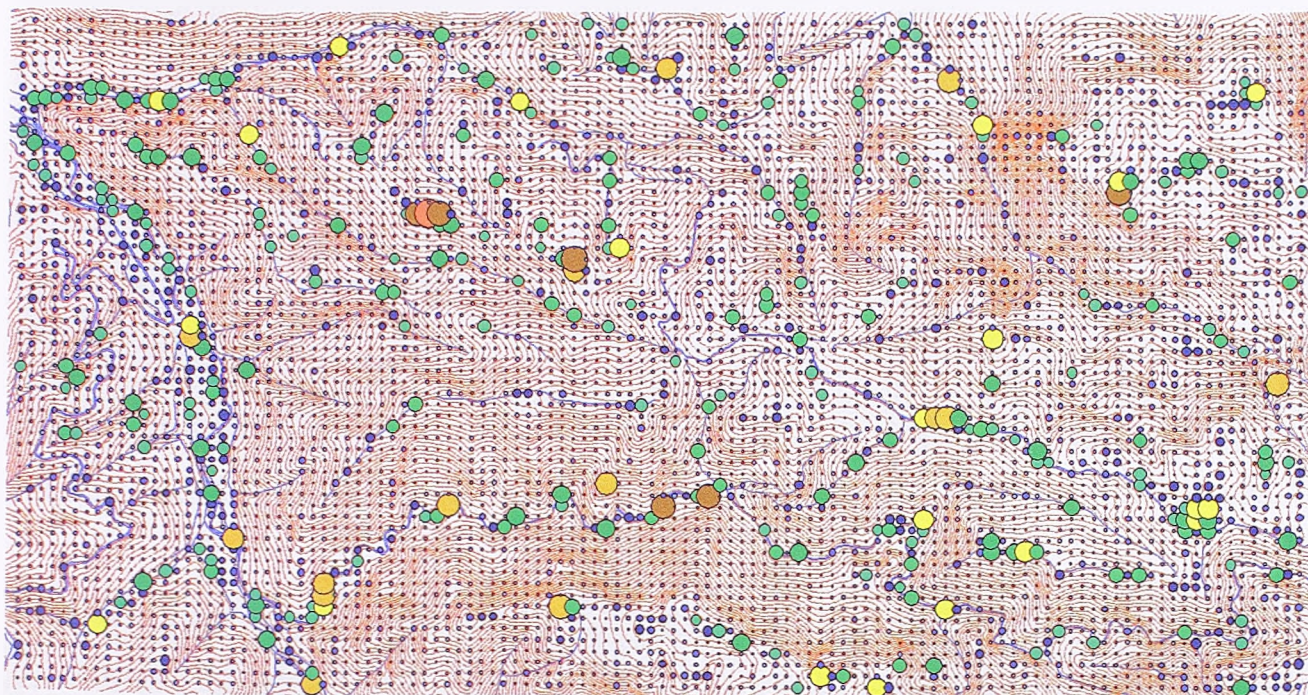


Slika B.39 : Greške dobijene korišćenjem interpolacije po metodi radijalnih baznih funkcija; za baznu funkciju je izabran splajn sa tenzijom (RBF-ST)

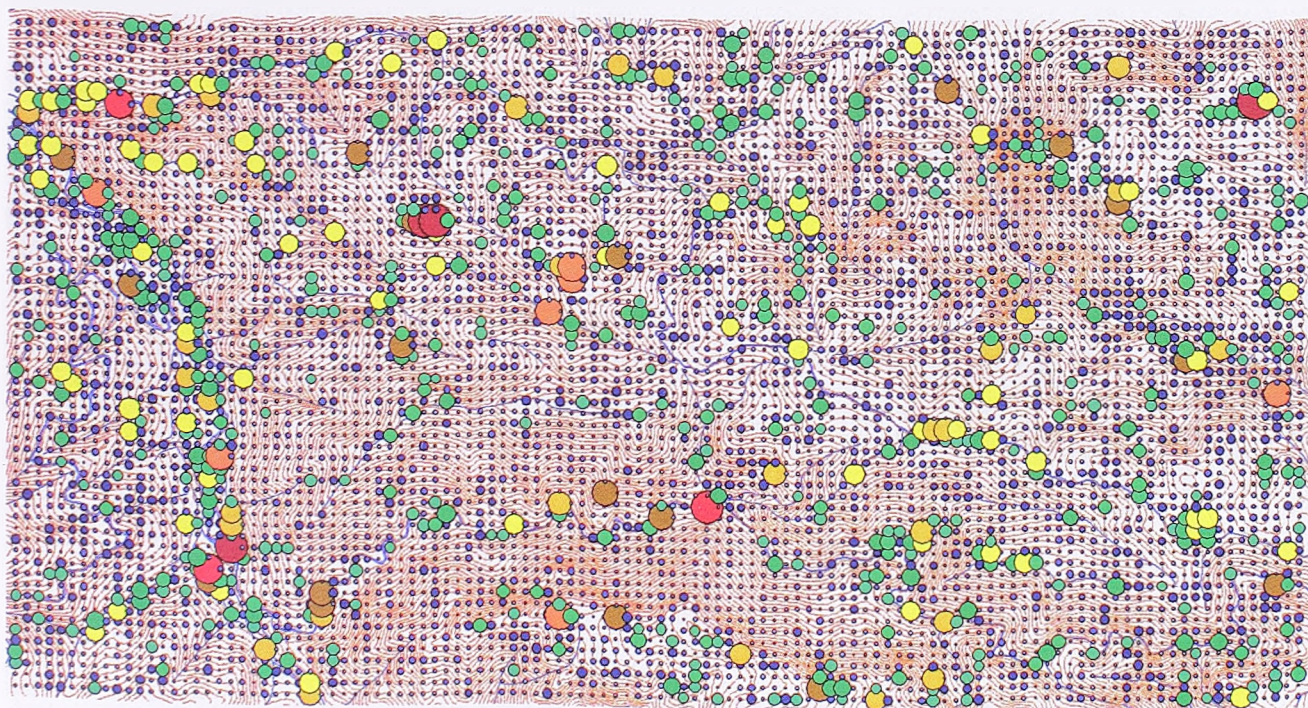


## B.4.2 Test područje Valjevo

**NAPOMENA** : Predstavljene su greške dobijene postupcima opisanim u poglavlju B.3.2 (Tabela B-13). Greške su prikazane korišćenjem boja (Tabela B-11) i veličine simbola.

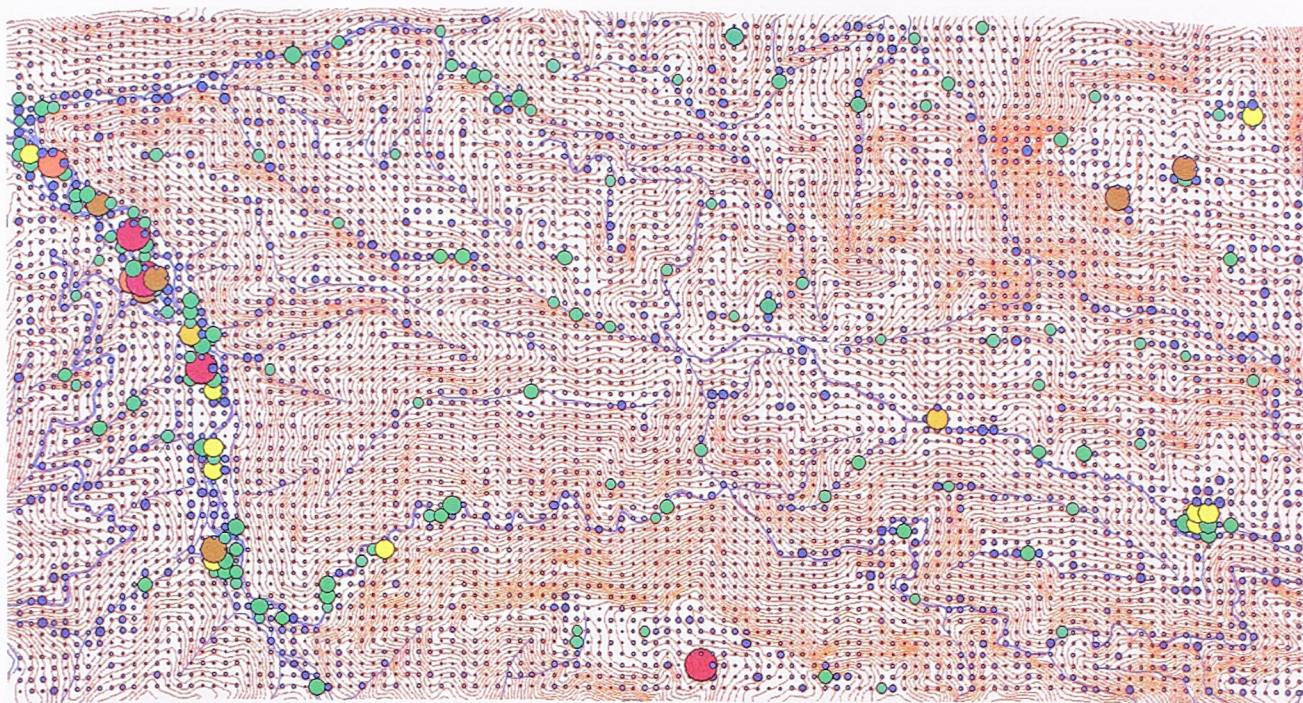


Slika B.40 : Greške dobijene korišćenjem interpolacije po metodi prirodnog suseda (NN, grid 5m)

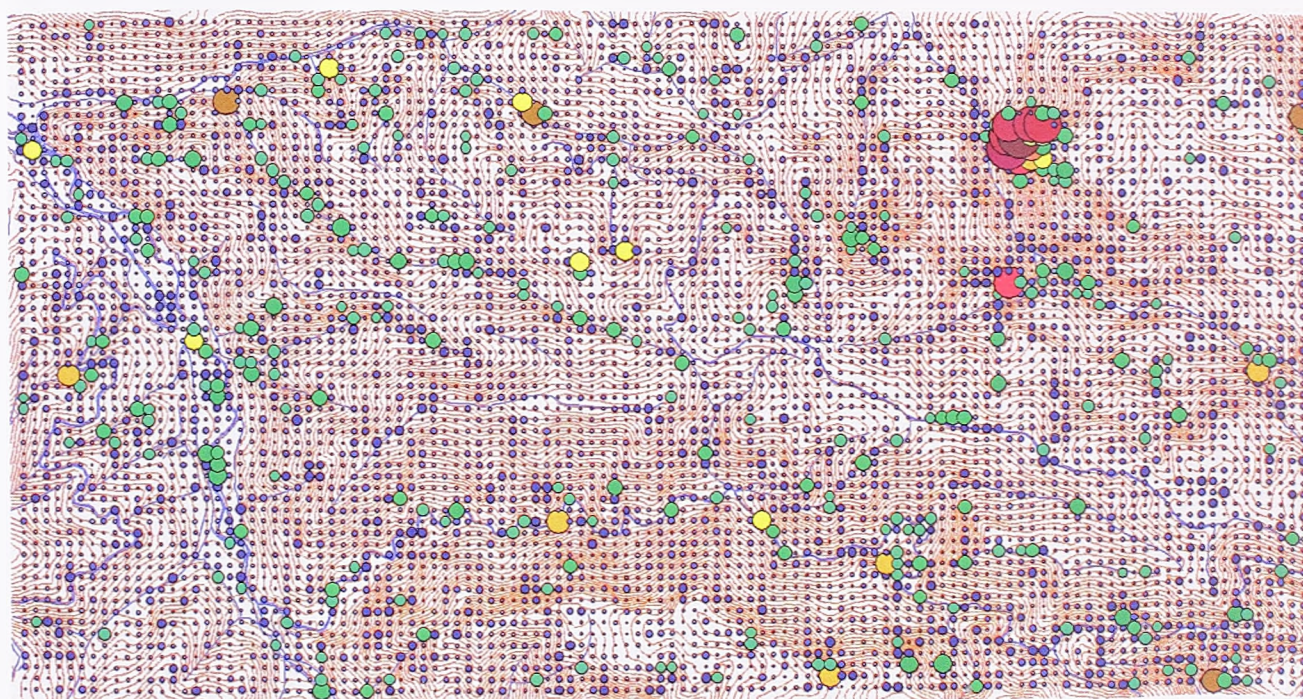


Slika B.41 : Greške dobijene korišćenjem interpolacije po metodi inverznih odstojanja (IDWN12)



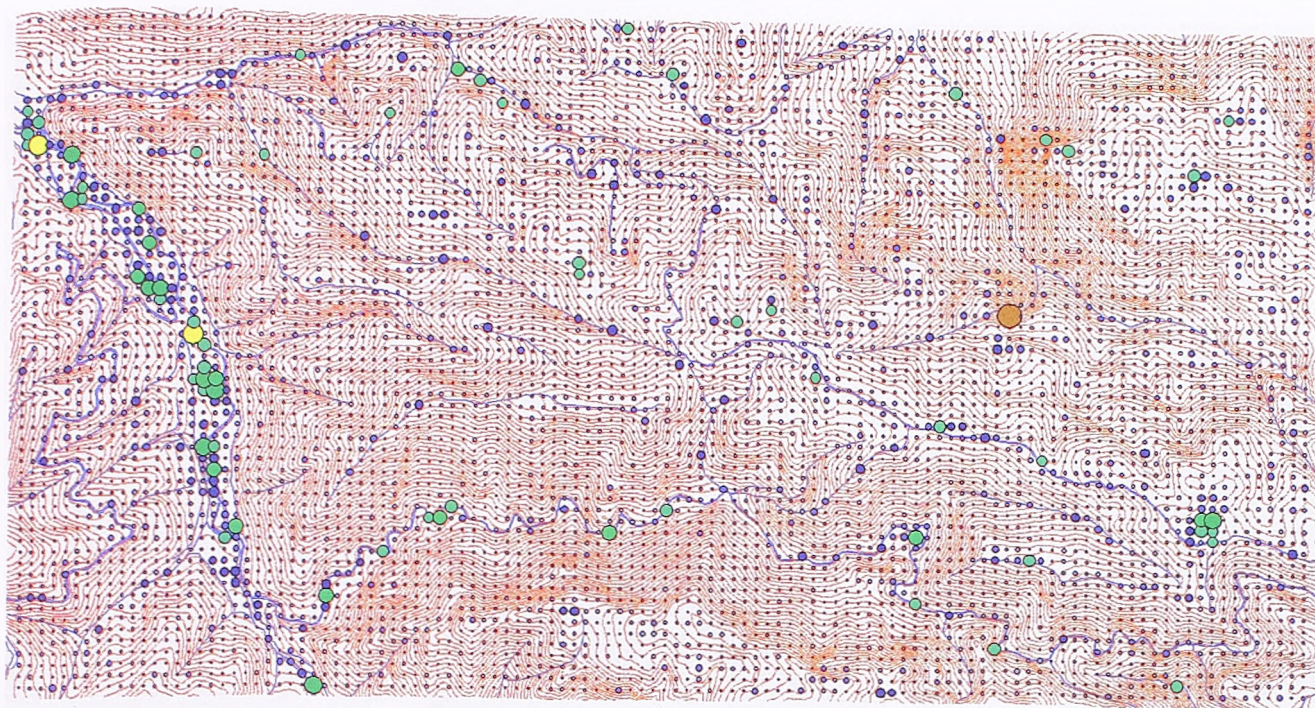


Slika B.42 : Greške dobijene korišćenjem interpolacije po metodi univerzalnog kriginga (Univerzalni kriging)

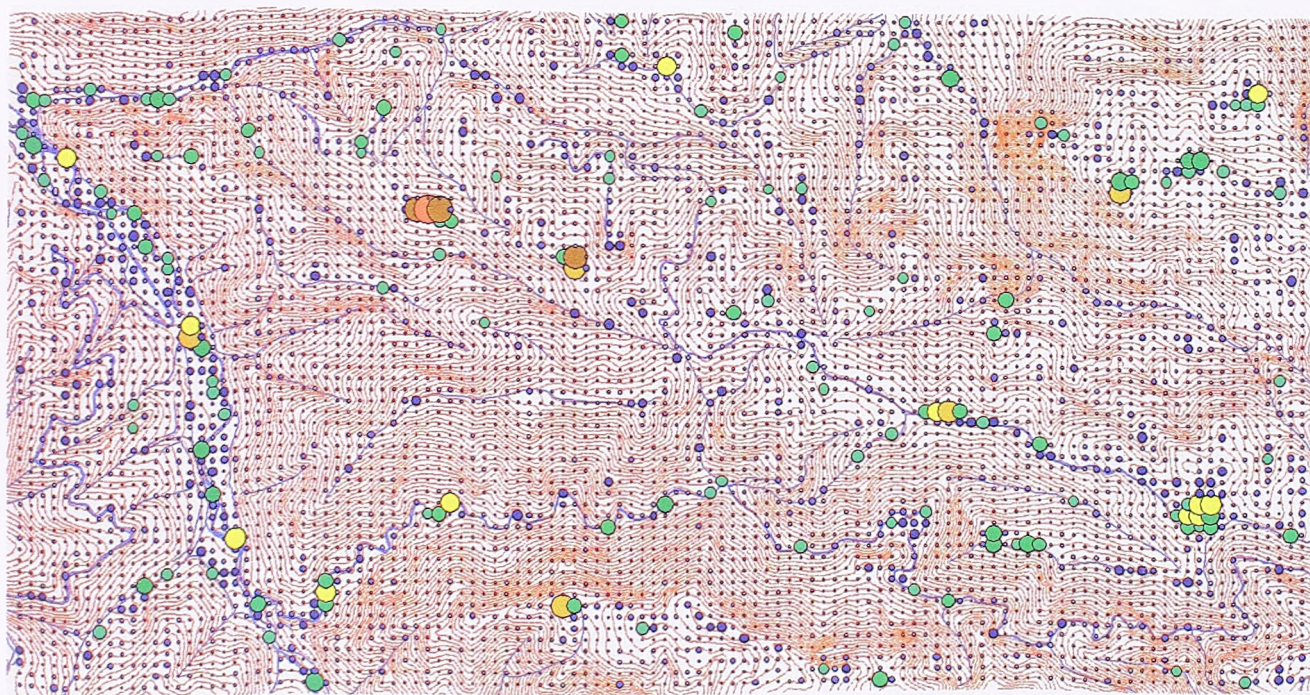


Slika B.43 : Greške dobijene korišćenjem interpolacije po metodi konačnih razlika sa uslovom odvodnjavanja (ANUDEM algoritam, TopoToRaster)



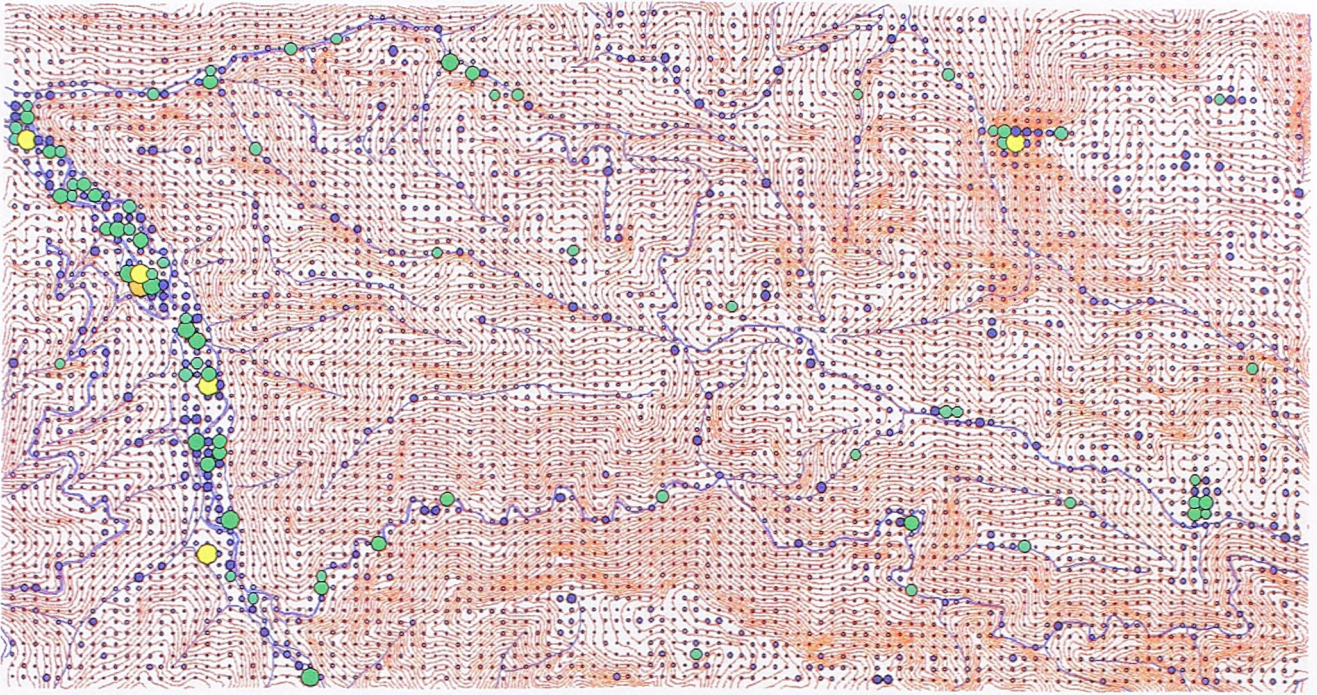


*Slika B.44 : Greške dobijene korišćenjem interpolacije po metodi radijalnih baznih funkcija; za baznu funkciju je izabrana multikvadratna funkcija (RBF-MQ2)*

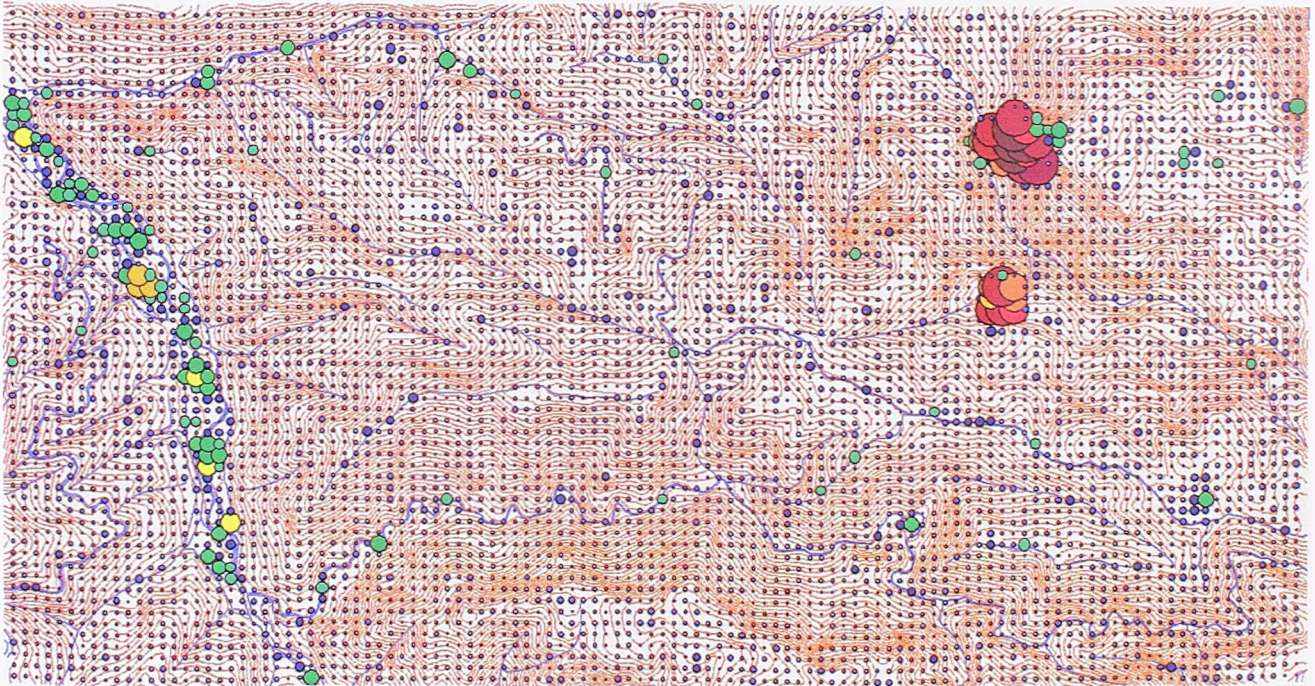


*Slika B.45 : Greške dobijene korišćenjem interpolacije po metodi radijalnih baznih funkcija; za baznu funkciju je izabran splajn sa tenzijom (RBF-ST)*





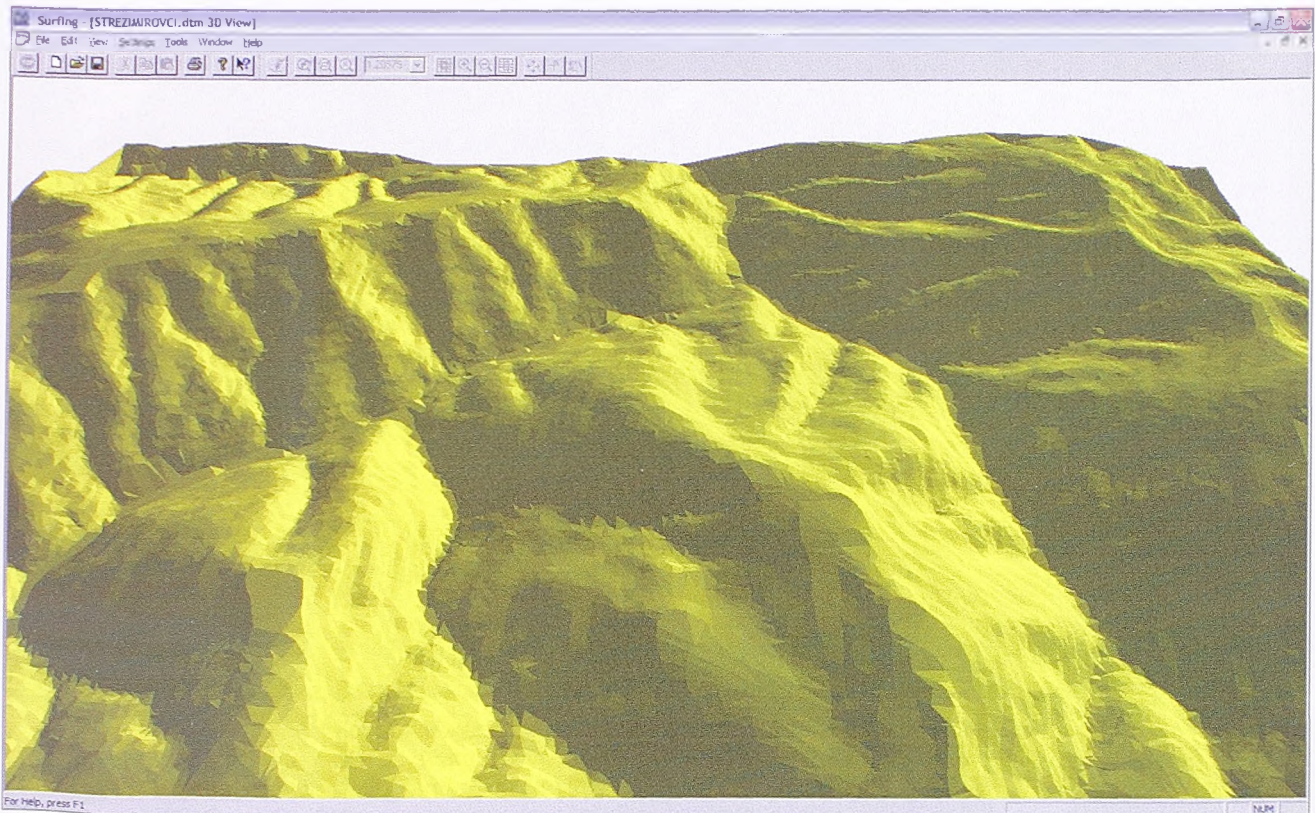
*Slika B.46 : Greške dobijene korišćenjem interpolacije po metodi splajna sa tenzijom (T01N50); parametar težina iznosi 0.1, a broj tačaka za proračun je 50*



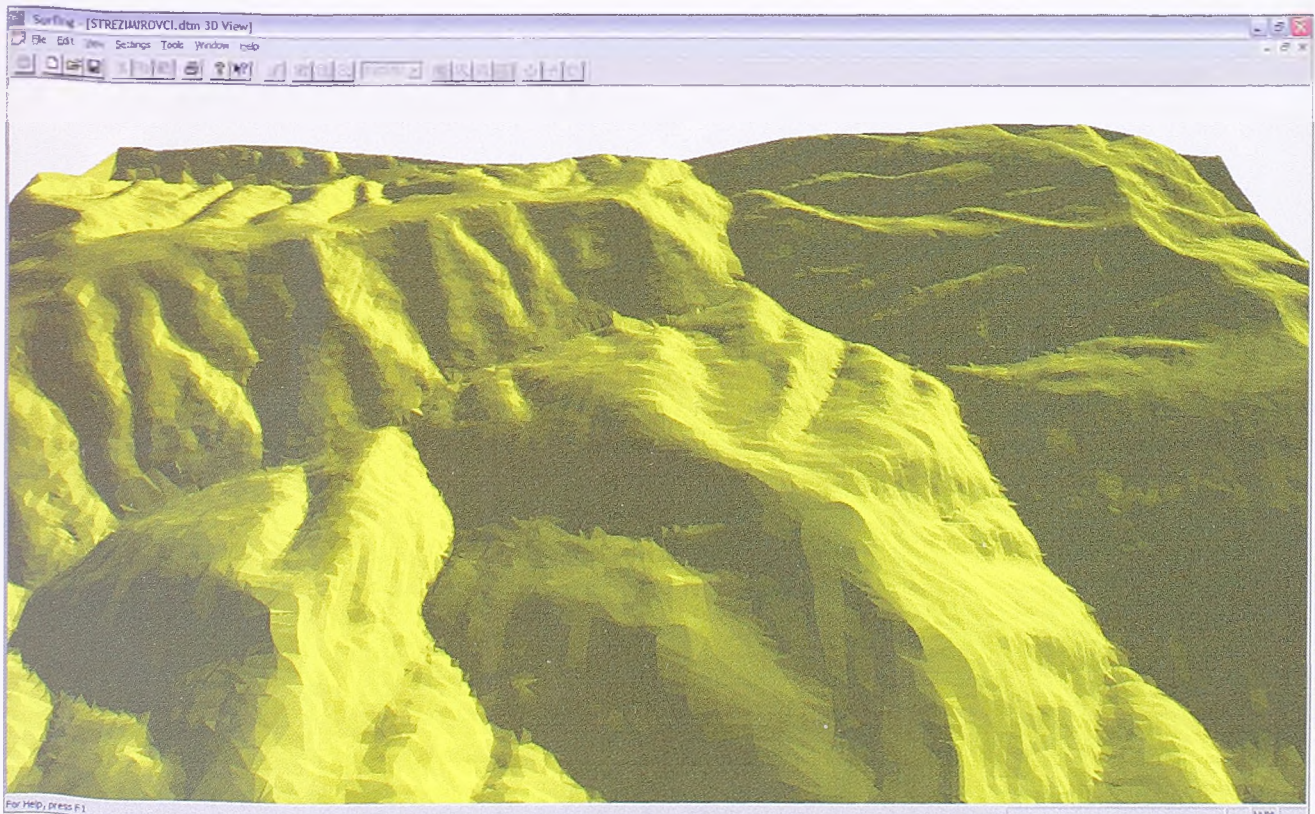
*Slika B.47 : Greške dobijene korišćenjem interpolacije po metodi splajna sa tenzijom (T01N100); parametar težina iznosi 0.1, a broj tačaka za proračun je 100*



## B.5 Prikaz modela formiranih korišćenjem razvijenih postupaka i softvera

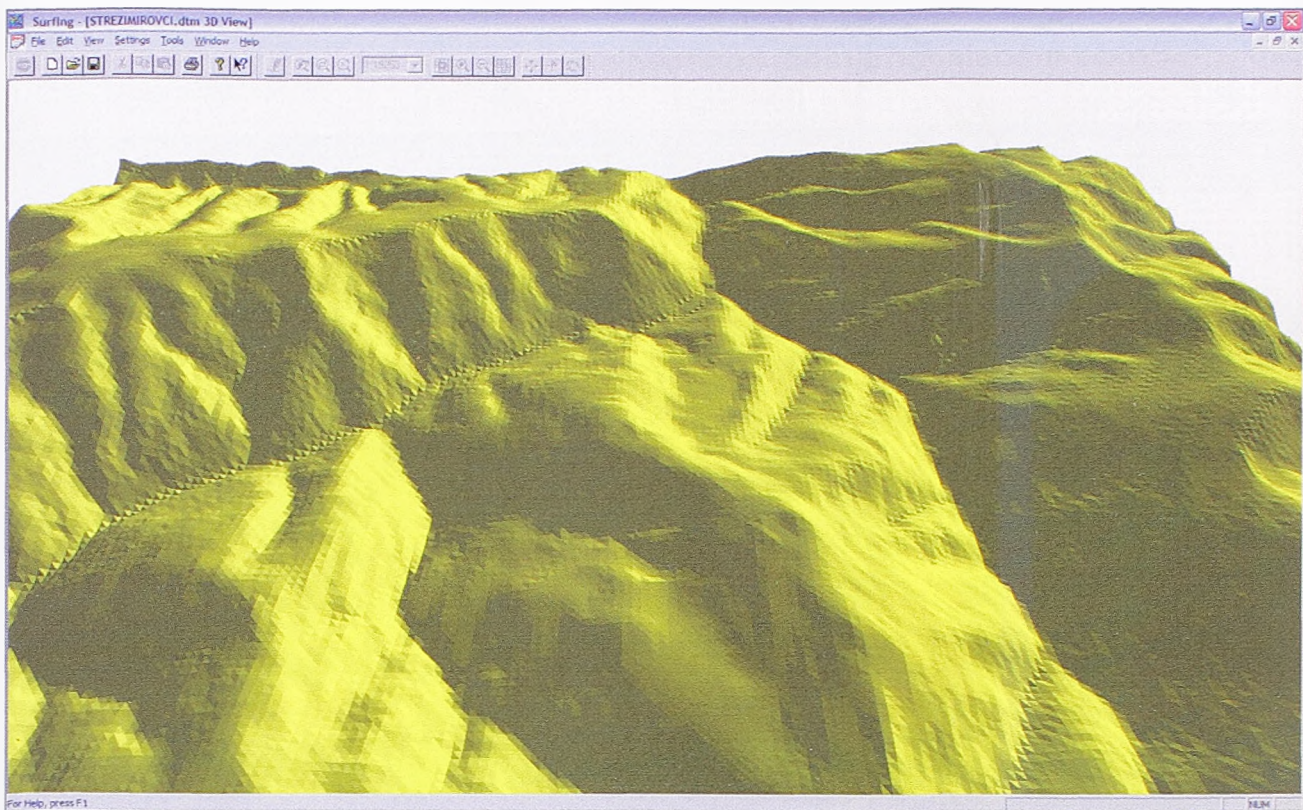


Slika B.48 : 3D prikaz DMT-a korišćenjem trougaonih faceta TIN-a; korišćene su FLAT senke; DMT je formiran samo na osnovu digitalizovanih izohipsi i bez detekcije i ugradnje struktumih linija terena

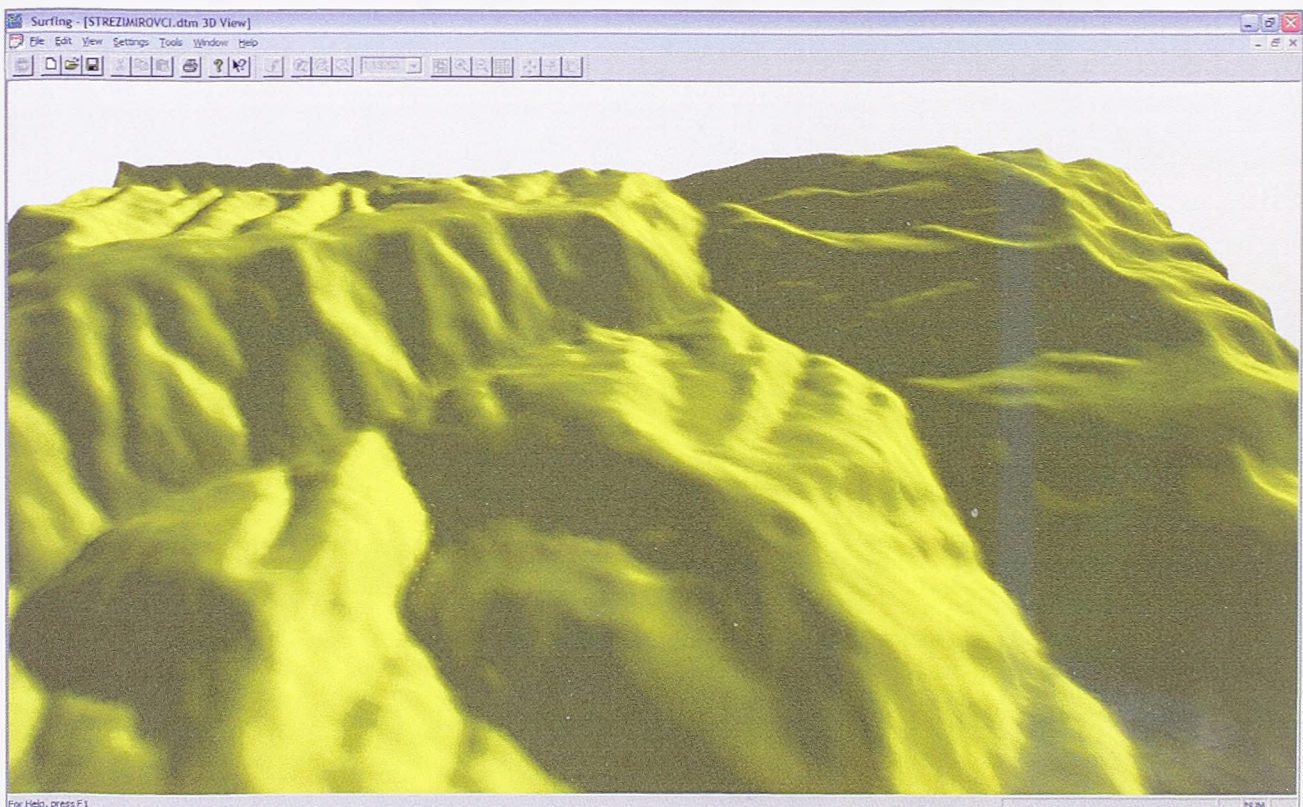


Slika B.49 : 3D prikaz DMT-a korišćenjem trougaonih faceta TIN-a; korišćene su FLAT senke; DMT je formiran samo na osnovu digitalizovanih izohipsi i sa detekcijom i ugradnjom struktumih linija terena (algoritam VS)



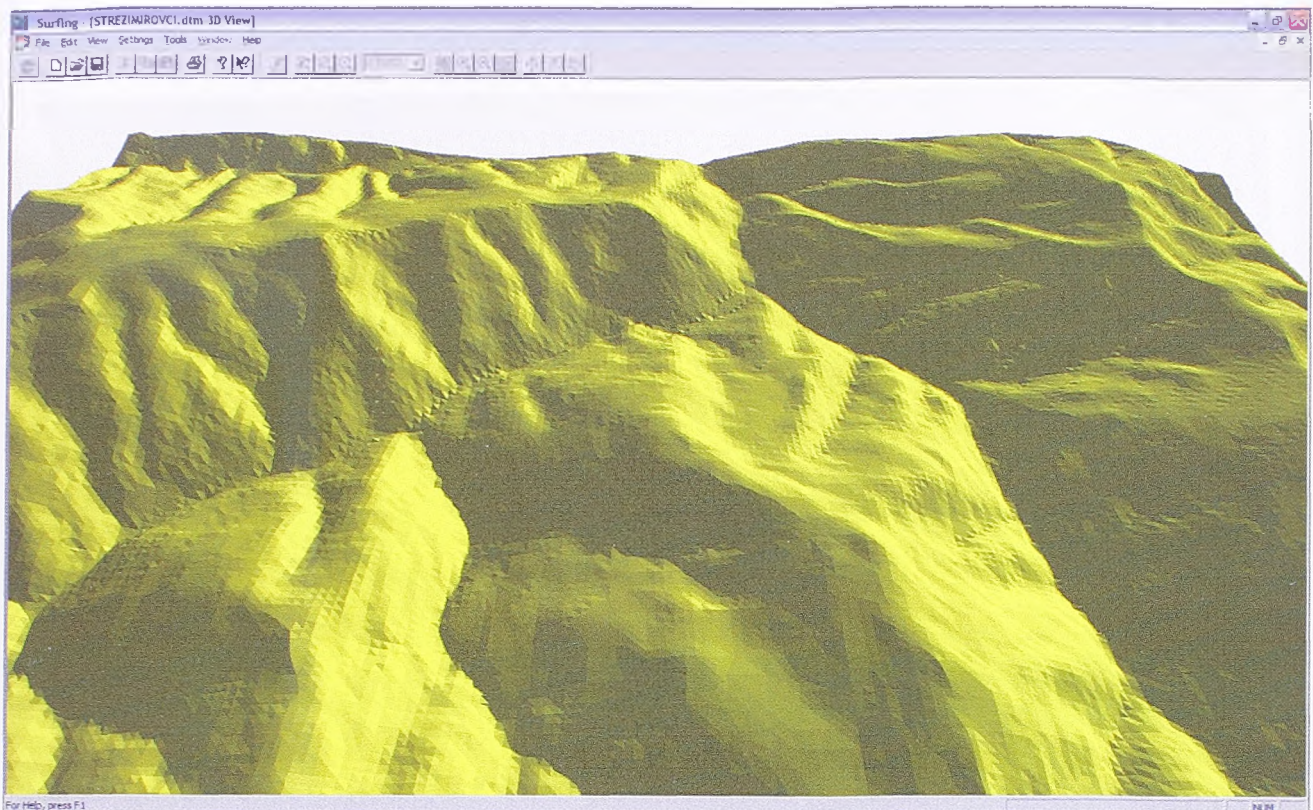


Slika B.50 : 3D prikaz terena korišćenjem trougaonih faceta TIN-a; korišćene su FLAT senke; DMT je formiran na osnovu tačaka pravilnog grida na rastojanju od 25m; grid je interpolovan iz DMT-a formiranog na osnovu digitalizovanih izohipsi i sa detekcijom i ugradnjom strukturnih linija terena (algoritam VS) (Slika B.49)

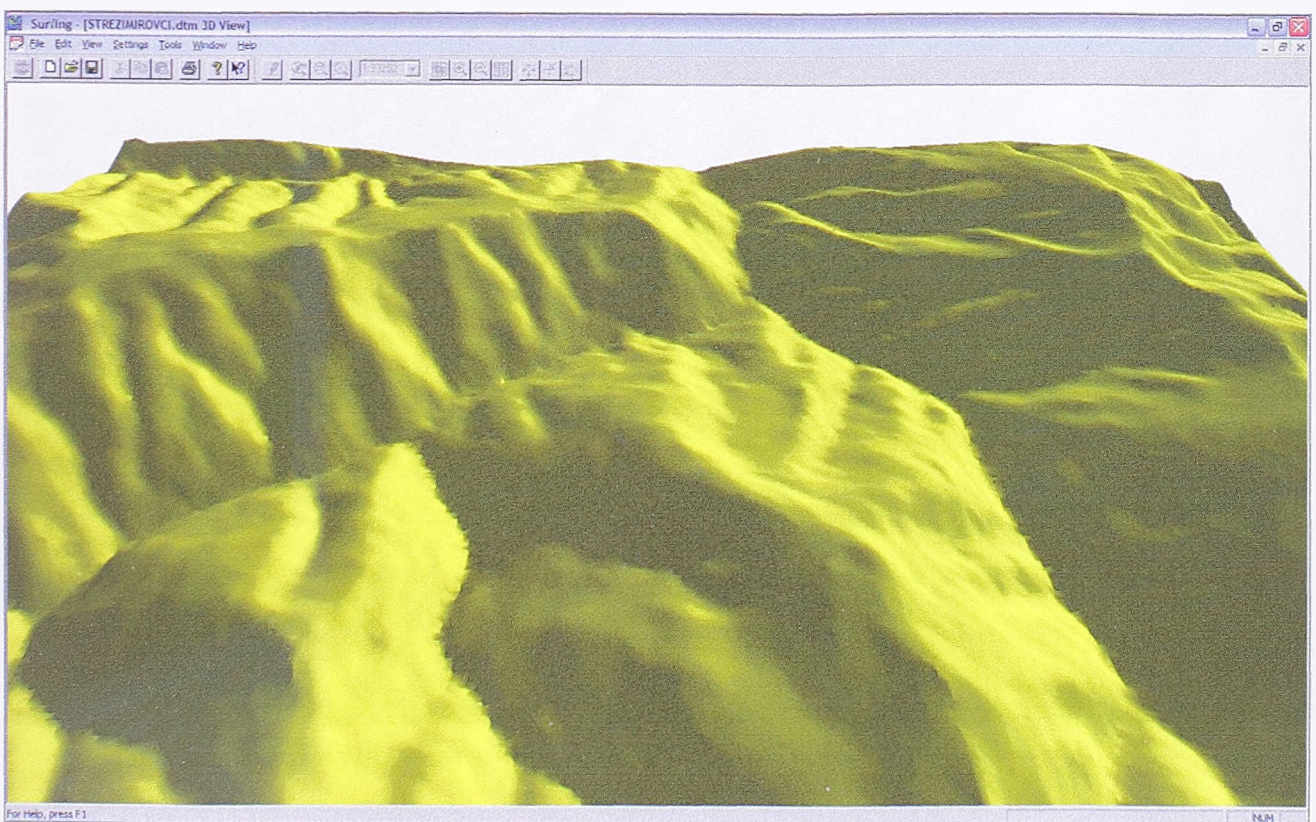


Slika B.51 : 3D prikaz terena korišćenjem trougaonih faceta TIN-a; korišćene su GOURAUD senke; DMT je formiran na osnovu tačaka pravilnog grida na rastojanju od 25m; grid je interpolovan iz DMT-a formiranog na osnovu digitalizovanih izohipsi i sa detekcijom i ugradnjom strukturnih linija terena (algoritam VS) (Slika B.49)





Slika B.52 : 3D prikaz terena korišćenjem trougaonih faceta TIN-a; korišćene su FLAT senke; DMT je formiran na osnovu tačaka varijabilnog grida (25m) i uz dodatak detektovanih struktumih linija; grid i linije su dobijene iz DMT-a formiranog na osnovu digitalizovanih izohipsi i sa detekcijom i ugradnjom struktumih linija terena (algoritam VS, Slika B.49); grid je redukovan korišćenjem algoritma sa 4 profila



Slika B.53 : 3D prikaz terena korišćenjem trougaonih faceta TIN-a; korišćene su GOURAUD senke; DMT je formiran na osnovu tačaka varijabilnog grida (25m) i uz dodatak detektovanih struktumih linija; grid i linije su dobijene iz DMT-a formiranog na osnovu digitalizovanih izohipsi i sa detekcijom i ugradnjom struktumih linija terena (algoritam VS, Slika B.49); grid je redukovan korišćenjem algoritma sa 4 profila



## **B.6 Formiranje modela sa više miliona tačaka**



*Slika B.54 : Formiranje DMT-a za područje koje pokriva list 478-Valjevo karte 1:100000  
(2999501 tačaka, 5998996 trouglova )*



## **C. POSTOJEĆI PODACI ZA FORMIRANJE NACIONALNOG DMT-a**

Dodatak sadrži priloge sa informacijama o raspoloživost i kvalitetu postojećih visinskih podataka koji bi se mogli iskoristiti za formiranje nacionalnog DMT-a.

Kvalitet visinskih podataka sa TK25 je ocenjivan korišćenjem interpolacije visina iz DMT-ova formiranih korišćenjem razvijenih postupaka i softvera na osnovu podataka:

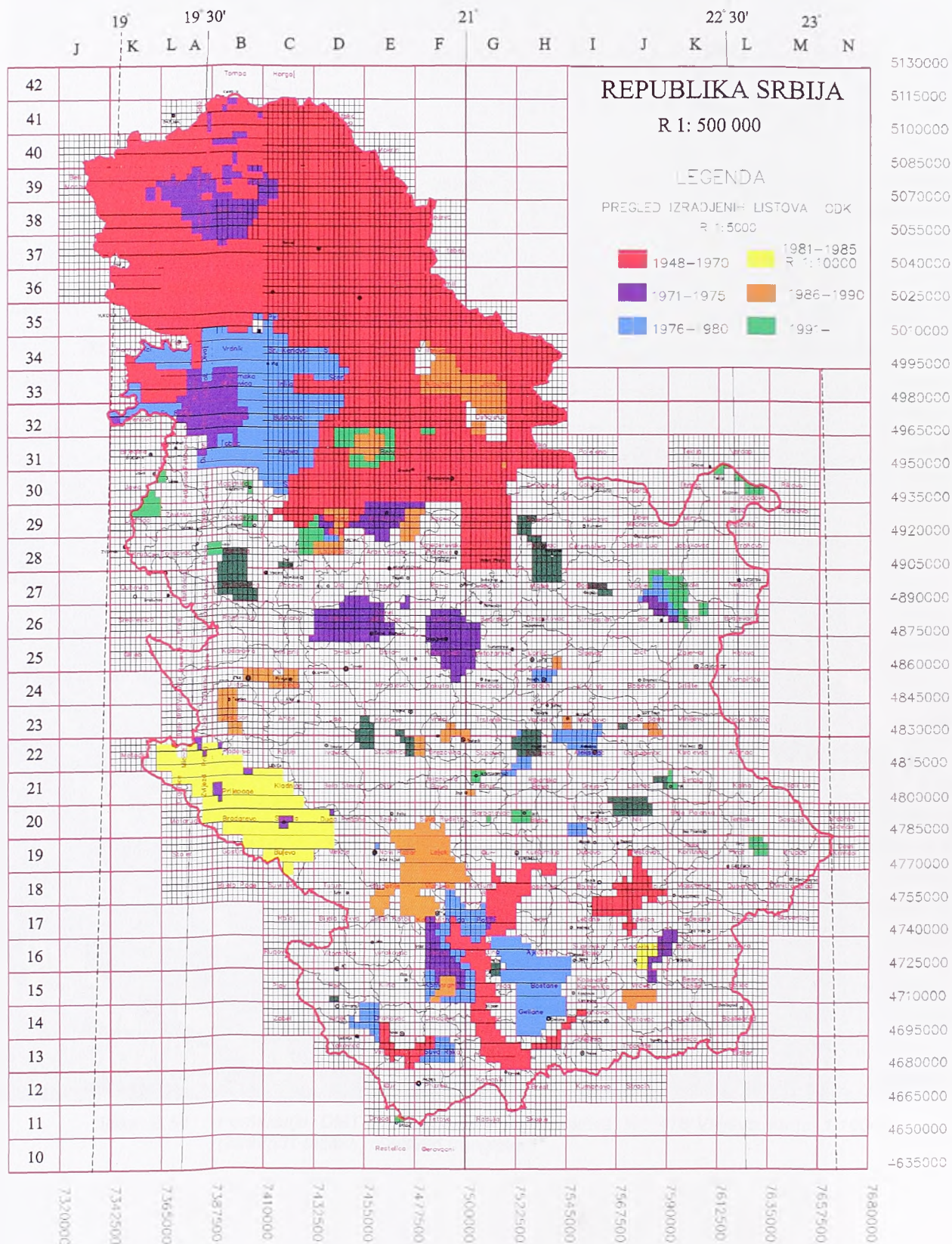
- prikupljenih u okviru projekata izrade digitalnog ortofotoa razmere 1:5000 (DOF5);
- prikupljenih u okviru projekata izrade digitalne topografske karte 1:5000 (DTK5);
- prikupljenih u okviru topografskog premera 1:1000 grada Kragujevca (TP1).

Visine dobijene direktnom digitalizacijom tačaka sa TK25 (trigonometri, kote i tačke izohipsi) su upoređivane sa visinama interpolovanim iz formiranog DMT-a. U ovom dodatku dati su tabelarno i preko detaljnih izveštaja rezultati tog upoređenja sa odgovarajućim statističkim pokazateljima.



C.1 Raspoloživost podloga

KOORDINATNI SISTEM BR. 7



Slika C-1 : Pregled statusa radova na izradi Osnovne državne karte za teritoriju Srbije



## C.2 Deformacije i tačnost georeferenciranja TK25

Oznaka TK25	A4 (Afina - 4 tačke)		AS (Afina - sve tačke)		CF (Kolokacija - sve tačke)		Razlike CF - A4		Objektivna greška A4	
	my	mx	my	mx	my	mx	my	mx	my	mx
Sjenica 579-1-1	1,24	2,26	3,00	2,88	1,60	1,35	4,14	2,53	3,82	2,14
Sjenica 579-1-2	1,85	1,65	2,71	3,06	1,12	0,90	3,01	2,84	2,79	2,69
Sjenica 579-1-3	1,11	3,17	3,89	2,74	1,48	0,98	4,57	2,32	4,32	2,10
Sjenica 579-1-4	1,24	2,26	3,00	2,88	1,60	1,35	6,70	2,53	6,50	2,14
Sjenica 579-2-1	1,24	0,85	3,10	2,36	1,33	0,76	2,34	3,18	1,92	3,08
Sjenica 579-2-2	3,20	0,16	3,11	3,04	0,94	0,53	3,27	2,86	3,13	2,81
Sjenica 579-2-3										
Sjenica 579-2-4	5,15	1,16	3,37	2,55	0,89	0,78	5,00	3,75	4,92	3,67
Sjenica 579-3-1	1,40	0,82	3,51	2,63	1,57	0,55	4,15	3,08	3,84	3,03
Sjenica 579-3-2	1,01	2,32	3,36	2,97	1,74	0,49	3,38	3,24	2,89	3,21
Sjenica 579-3-3	2,37	2,46	2,85	2,91	1,21	0,72	3,75	2,86	3,55	2,77
Sjenica 579-3-4	1,97	0,35	2,82	2,29	1,73	0,70	4,83	2,17	4,51	2,05
Sjenica 579-4-1	2,48	1,38	3,26	2,73	1,68	0,92	4,42	2,57	4,08	2,40
Sjenica 579-4-2	0,24	0,78	3,16	3,16	1,53	1,22	4,59	3,37	4,33	3,14
Sjenica 579-4-3	1,98	2,40	2,71	2,84	1,25	1,60	4,47	3,65	4,29	3,28
Sjenica 579-4-4	1,56	0,38	2,78	2,20	1,48	0,94	3,88	3,16	3,59	3,02
Srednja vrednost									3,90	2,77
Oznaka TK25	A4 (Afina - 4 tačke)		AS (Afina - sve tačke)		CF (Kolokacija - sve tačke)		Razlike CF - A4		Objektivna greška A4	
	my	mx	my	mx	my	mx	my	mx	my	mx
Beograd 429-1-1	1,62	5,24	3,20	3,17	1,37	1,29	2,99	4,19	2,66	3,98
Beograd 429-1-2	0,43	4,34	3,31	2,72	1,09	1,10	3,55	2,99	3,38	2,79
Beograd 429-1-3	0,87	8,13	3,98	3,49	1,59	1,47	4,77	3,04	4,50	2,66
Beograd 429-1-4	4,64	0,36	3,23	2,85	1,05	1,57	4,31	3,01	4,18	2,56
Beograd 429-2-1	3,70	0,84	3,52	2,83	1,83	0,52	4,52	3,84	4,14	3,81
Beograd 429-2-2	0,95	1,23	2,72	2,12	0,55	0,80	4,91	3,00	4,88	2,89
Beograd 429-2-3	1,38	0,27	3,29	2,48	0,78	1,10	4,65	2,05	4,58	1,73
Beograd 429-2-4	4,56	1,06	3,48	1,76	1,91	0,72	4,76	1,85	4,36	1,71
Beograd 429-3-1	1,56	1,25	2,96	2,43	1,36	0,69	6,55	3,11	6,40	3,03
Beograd 429-3-2	2,80	1,00	2,92	2,46	0,98	0,74	4,12	3,62	4,00	3,54
Beograd 429-3-3	2,42	1,97	3,07	2,27	1,23	0,91	5,00	3,71	4,85	3,60
Beograd 429-3-4	3,60	3,05	3,49	2,86	1,32	1,35	4,69	3,36	4,50	3,08
Beograd 429-4-1	2,78	0,37	3,30	2,52	2,10	1,35	2,88	2,36	1,97	1,94
Beograd 429-4-2	3,09	2,51	3,66	1,92	1,43	1,09	5,19	2,26	4,99	1,97
Beograd 429-4-3	1,72	2,31	4,10	2,68	1,37	1,07	4,05	3,82	3,81	3,67
Beograd 429-4-4	1,09	3,54	2,75	2,53	0,84	1,06	3,65	2,63	3,55	2,40
Srednja vrednost									4,17	2,84
Oznaka TK25	A4 (Afina - 4 tačke)		AS (Afina - sve tačke)		CF (Kolokacija - sve tačke)		Razlike CF - A4		Objektivna greška A4	
	my	mx	my	mx	my	mx	my	mx	my	mx
Novi Sad 378-1-1	1,67	0,82	3,60	2,85	1,53	0,59	3,41	3,37	3,05	3,31
Novi Sad 378-1-2	3,72	3,67	3,04	3,69	2,06	1,36	4,62	5,56	4,14	5,39
Novi Sad 378-1-3	0,22	2,31	3,08	2,24	1,26	0,78	4,72	2,91	4,55	2,80
Novi Sad 378-1-4	0,57	5,64	3,40	3,24	1,58	0,95	7,02	4,57	6,84	4,47
Novi Sad 378-2-1	0,33	3,54	3,15	2,46	1,66	1,47	3,13	3,14	2,65	2,78
Novi Sad 378-2-2	2,81	1,05	3,07	2,20	1,28	0,70	5,08	3,00	4,91	2,92
Novi Sad 378-2-3	2,05	1,71	2,88	3,82	1,16	1,19	3,83	5,80	3,65	5,67
Novi Sad 378-2-4	0,02	3,51	2,80	2,81	1,60	1,15	3,52	3,77	3,14	3,59
Novi Sad 378-3-1	0,78	2,31	2,80	2,03	0,98	0,87	4,72	2,43	4,62	2,27
Novi Sad 378-3-2	0,84	2,81	3,82	1,79	2,06	0,96	4,86	2,08	4,40	1,85
Novi Sad 378-3-3	2,45	4,18	3,35	2,35	1,15	0,67	4,77	2,30	4,63	2,20
Novi Sad 378-3-4	1,54	3,53	3,36	1,65	1,68	0,68	6,67	1,77	6,45	1,63
Novi Sad 378-4-1	0,77	3,50	3,67	2,85	1,77	0,66	6,99	3,24	6,76	3,17
Novi Sad 378-4-2	2,02	0,44	3,00	2,88	1,80	1,35	4,98	3,90	4,64	3,66
Novi Sad 378-4-3	2,14	2,62	3,16	3,32	1,27	1,03	6,35	4,96	6,22	4,85
Novi Sad 378-4-4	3,38	7,95	3,00	2,79	0,91	0,88	3,50	3,37	3,38	3,25
Srednja vrednost									4,63	3,36
Maks. vredn.	5,15	8,13	4,10	3,82	2,10	1,60	7,02	5,80	6,84	5,67
Srednje vredn.	1,93	2,33	3,21	2,67	1,40	0,98	4,49	3,17	4,24	2,99
Položajne greške		3,02		4,17		1,71		5,50		5,19

Tabela C-1 : Upoređenje deformacija za izabrane listove karata TK25 utvrđenih afinom transformacijom i kolokacijom; sve vrednosti su date u [m]



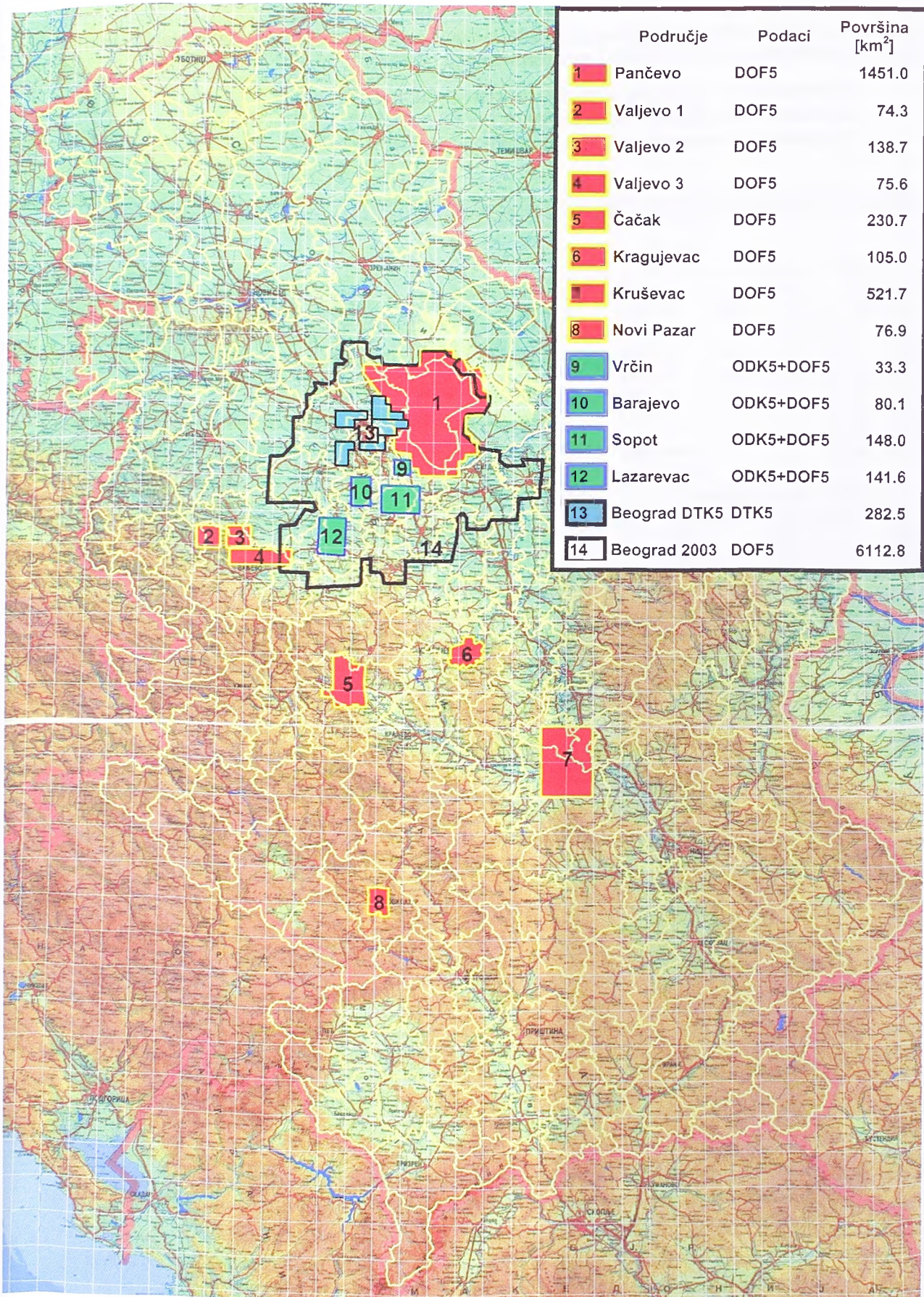
## C.3 Količine podataka visinske predstave TK25

Karta 1:100000	Kote i trigonometri	Tačke izohipsi	Izohipse
277-Bacalmas	512	190,327	4,177
278-Subotica	737	131,854	3,220
279-Segedin	879	65,945	1,464
326-Osijek	739	102,251	1,617
327-Sombor	1,711	462,040	10,930
328-Bačka Topola	1,825	355,642	8,904
329-Kikinda	1,840	235,453	5,168
330-Zombolj	786	65,741	1,179
376-Vinkovci	453	59,788	848
377-Bačka Palanka	1,980	361,187	5,115
378-Novi Sad	2,276	744,577	9,553
379-Zrenjanin	2,819	378,366	6,797
380-Alibunar	1,679	254,625	5,570
381-Vršac	838	290,706	2,977
427-Bijeljina	2,679	943,338	8,171
428-Šabac	2,327	763,727	8,189
429-Beograd	2,285	558,777	6,661
430-Smederevo	2,533	803,174	9,991
431-Požarevac	2,517	1,011,393	17,819
432-Veliko Gradište	1,410	1,542,626	15,471
433-Orsava	835	1,151,720	11,909
434-Kladovo	466	342,317	3,030
477-Zvornik	2,619	3,729,350	40,769
478-Vajjevo	2,790	3,010,118	33,946
479-Lazarevac	2,816	2,211,167	24,395
480-Kragujevac	8731	1,383,200	13,290
481-Lapovo	2,718	1,082,768	12,653
482-Žagubica	2,512	3,280,080	39,736
483-Bor	2,731	2,737,523	27,766
484-Negotin	579	274,480	3,578
526-Goražde*	158	215,555	1,084
527-Višegrad	2,418	3,550,484	38,150
528-Užice	2,628	3,797,823	33,431
529-Čačak	2,895	3,221,680	36,973
530-Kraljevo	3,009	2,840,682	24,841
531-Kruševac	2,913	1,695,274	17,655
532-Aleksinac	2,934	2,513,765	32,750
533-Zaječar	2,748	2,243,968	20,197
534-Vidin	94	201,916	1,662
576-Gacko	1,513	3,572,697	63,942
577-Pljevlja	2,586	3,732,819	67,923
578-Prijepolje	2,526	3,225,523	43,005
579-Sjenica	2,757	2,599,959	27,799
580-Novi Pazar*	2,922	3,724,379	34,623
581-Kuršumlija*	2,383	2,744,802	24,271
582-Niš*	2,721	1,577,083	15,897
583-Bela Palanka*	2,785	2,703,817	32,086
584-Pirot*	2,026	2,332,825	24,670
625-Trebinje*	606	787,447	17,523
626-Nikšić*	2,651	8,566,381	62,131
627-Danilovgrad*	2,530	5,041,657	87,035
628-Berane*	1,994	4,102,133	41,345
629-Peć*	2,449	3,188,892	34,958
630-Kos Mitrovica*	2,464	2,776,992	21,008
631-Priština*	2,570	2,369,895	23,104
632-Leskovac*	2,601	5,919,938	26,834
633-Vlasotince*	2,392	3,441,522	29,614
634-Breznik*	618	744,843	8,911
675-Sutorina*	110	70,159	925
676-Cetinje*	1,108	1,657,587	32,870
677-Podgorica*	1,893	2,229,786	38,538
678-Skadar*	347	221,083	3,680
679-Đakovica*	696	539,543	5,222
680-Prizren*	2,335	2,675,354	27,250
681-Uroševac*	2,543	2,508,018	21,404
682-Kumanovo	1,741	1,682,646	12,369
683-Kriva Palanka*	1,333	1,617,394	18,362
684-Custendil*	100	142,187	1,079
727-Ulcinj*	302	175,728	2,163
730-Gostivar	525	1,241,225	9,849
	130,046	123,709,720	1,512,026

Tabela C-2 : Količine podataka dobijenih digitalizacijom podataka visinske predstave TK25 za celu teritoriju SCG, po celinama od po 16 karata (područje jedne karte razmere 1:100000)



C.4 Podaci korišćeni za ocenu i verifikaciju visinskih podataka TK25



Slika C-2 : Test područja za koja su podaci visinske predstave TK25 verifikovani i ocenjivani



## C.5 Detaljni izveštaji sa statističkim pokazateljima upoređenja visina digitalizovanih sa TK25 sa visinama interpolovanim iz modela terena dobijenih iz DOF5, DTK5 i TP1

Izveštaji koji slede sadrže statističke pokazatelje dobijene upoređenjem visina digitalizovanih sa TK25 i visina dobijenih interpolacijom iz DMT-ova formiranih u okviru:

- projekata izrade digitalnog ortofotoa razmere 1:5000 (DOF5),
- projekata izrade digitalne karte razmere 1:5000 (DTK5) i
- topografskog premera 1:1000 grada Kragujevca (TP1).

Kruševac, trigonometri							
CUBIC interpolation statistics							
Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum	
4.378	295	3.583	3.090	1.411	-4.825	16.801	
0.0	5.0	203	2.921	2.836	0.796	-4.281	16.801
5.0	10.0	69	4.292	3.550	2.403	-4.825	11.585
10.0	15.0	14	4.890	4.077	2.651	-4.019	7.486
15.0	20.0	5	7.422	5.874	4.157	-1.676	10.456
20.0	25.0	1	-	-	11.888	11.888	11.888
30.0	35.0	3	7.906	2.141	6.369	5.032	7.589
LINEAR REGRESSION							
	Intercept	StdErr	Slope	StdErr			
RMSE	2.522	0.025	11.287	0.216			
STDEV	2.800	0.037	3.685	0.316			
LINEAR interpolation statistics							
Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum	
4.787	295	4.222	3.440	1.979	-4.799	19.145	
0.0	5.0	203	3.368	3.138	1.225	-4.233	19.145
5.0	10.0	69	4.943	3.888	3.037	-4.799	12.130
10.0	15.0	14	6.552	4.762	4.368	-1.618	10.522
15.0	20.0	5	8.008	5.946	4.896	-1.017	11.362
20.0	25.0	1	-	-	16.083	16.083	16.083
30.0	35.0	3	10.370	4.020	7.931	4.806	11.915
LINEAR REGRESSION							
	Intercept	StdErr	Slope	StdErr			
RMSE	2.816	0.021	14.660	0.182			
STDEV	3.002	0.028	5.344	0.245			
ERROR DISTRIBUTION							
		CUBIC		LINEAR			
Range	No. pts	%	No. pts	%			
0.0m - 1.0m	85	28.8%	76	25.8%			
1.0m - 2.0m	78	26.4%	75	25.4%			
2.0m - 5.0m	90	30.5%	89	30.2%			
5.0m - 10.0m	36	12.2%	44	14.9%			
10.0m - 15.0m	5	1.7%	9	3.1%			
15.0m - 19.1m	1	0.3%	2	0.7%			
<b>PRIMEDBA: Primetna sistematska greška - visine iz TK25 su više. Veliki broj velikih odstupanja je pozitivnog znaka. Ovo važi za kote, za trigonometre i za izohipse.</b>							

Izveštaj C-1 : Upoređenje visina trigonometara digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DOF5 DMT-a za područje Kruševca

Kruševac, kote							
CUBIC interpolation statistics							
Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum	
5.982	328	3.397	3.249	0.405	-12.786	13.533	
0.0	5.0	192	2.628	2.666	-0.144	-8.238	12.883
5.0	10.0	72	4.205	3.962	1.411	-12.786	13.533
10.0	15.0	41	4.105	4.094	0.434	-8.488	8.672
15.0	20.0	14	4.690	3.549	3.003	-2.375	9.622
20.0	25.0	4	7.282	7.256	1.086	-8.235	7.327
25.0	30.0	1	-	-	-0.961	-0.961	-0.961
30.0	35.0	2	4.980	4.466	-2.461	-4.980	0.058
35.0	40.0	1	-	-	5.501	5.501	5.501
45.0	50.0	1	-	-	-4.821	-4.821	-4.821
LINEAR REGRESSION							
	Intercept	StdErr	Slope	StdErr			
RMSE	2.440	0.037	8.381	0.262			
STDEV	2.533	0.039	6.694	0.273			
LINEAR interpolation statistics							
Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum	
6.324	328	3.611	3.439	0.600	-13.506	15.022	
0.0	5.0	192	2.737	2.741	0.003	-8.302	13.397
5.0	10.0	72	4.659	4.315	1.755	-13.506	15.022
10.0	15.0	41	4.384	4.325	0.780	-8.374	9.047
15.0	20.0	14	4.632	3.616	2.844	-2.607	9.696
20.0	25.0	4	7.281	7.284	0.934	-8.567	6.953
25.0	30.0	1	-	-	-0.949	-0.949	-0.949
30.0	35.0	2	5.594	4.884	-2.714	-5.592	0.164
35.0	40.0	1	-	-	5.516	5.516	5.516
45.0	50.0	1	-	-	-4.675	-4.675	-4.675
LINEAR REGRESSION							
	Intercept	StdErr	Slope	StdErr			
RMSE	2.591	0.046	8.855	0.322			
STDEV	2.634	0.045	7.229	0.315			
ERROR DISTRIBUTION							
		CUBIC		LINEAR			
Range	No. pts	%	No. pts	%			
0.0m - 1.0m	88	26.8%	85	25.9%			
1.0m - 2.0m	82	25.0%	77	23.5%			
2.0m - 5.0m	120	36.6%	116	35.4%			
5.0m - 10.0m	34	10.4%	46	14.0%			
10.0m - 15.0m	4	1.2%	3	0.9%			
15.0m - 15.0m	0	0.0%	1	0.3%			

Izveštaj C-2 : Upoređenje visina kota digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DOF5 DMT-a za područje Kruševca



Kruševac, izohipse							
CUBIC interpolation statistics							
Slope		No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
12.243		385647	5.139	4.914	1.173	-35.578	41.639
0.0	5.0	71593	2.917	2.916	-0.064	-23.756	39.413
5.0	10.0	101717	3.755	3.669	0.802	-28.651	38.082
10.0	15.0	87549	4.938	4.802	1.152	-31.846	41.639
15.0	20.0	60695	6.151	5.922	1.661	-35.578	36.472
20.0	25.0	36544	6.877	6.541	2.125	-34.523	37.229
25.0	30.0	17955	7.782	7.203	2.946	-27.363	35.458
30.0	35.0	6618	9.256	8.362	3.968	-28.777	37.245
35.0	40.0	2142	10.348	8.858	5.350	-23.615	35.780
40.0	45.0	619	10.998	8.830	6.552	-21.985	33.407
45.0	50.0	164	10.994	8.271	7.224	-17.004	30.906
50.0	55.0	29	7.533	6.999	2.790	-12.863	15.339
55.0	60.0	8	12.056	12.092	0.339	-12.260	22.280
60.0	65.0	10	9.898	9.790	-1.769	-12.896	17.450
65.0	70.0	2	16.361	10.003	9.419	2.701	16.137
70.0	75.0	2	9.183	8.665	3.101	-2.603	8.806
LINEAR REGRESSION							
Intercept		StdErr	Slope	StdErr			
RMSE		2.500	0.001	10.622	0.002		
STDEV		2.610	0.001	9.338	0.003		
LINEAR interpolation statistics							
Slope		No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
12.102		385647	5.240	4.959	1.357	-34.925	42.764
0.0	5.0	71593	2.990	2.990	0.021	-23.615	40.923
5.0	10.0	101717	3.868	3.746	0.965	-29.752	38.990
10.0	15.0	87549	5.050	4.872	1.330	-31.141	42.764
15.0	20.0	60695	6.249	5.962	1.871	-34.925	38.444
20.0	25.0	36544	6.982	6.554	2.406	-34.090	36.588
25.0	30.0	17955	7.913	7.193	3.298	-27.188	34.427
30.0	35.0	6618	9.375	8.309	4.340	-28.246	36.105
35.0	40.0	2142	10.491	8.772	5.755	-22.989	35.739
40.0	45.0	619	11.212	8.818	6.920	-21.069	33.431
45.0	50.0	164	11.130	8.215	7.490	-17.024	29.915
50.0	55.0	29	7.702	6.846	3.507	-12.652	16.004
55.0	60.0	8	10.954	10.946	1.002	-9.033	21.027
60.0	65.0	10	9.369	9.281	-1.605	-11.612	16.821
65.0	70.0	2	16.612	9.995	9.627	2.896	16.358
70.0	75.0	2	10.352	10.356	2.225	-4.749	9.198
LINEAR REGRESSION							
Intercept		StdErr	Slope	StdErr			
RMSE		2.590	0.001	10.683	0.002		
STDEV		2.708	0.001	9.147	0.003		
ERROR DISTRIBUTION							
CUBIC				LINEAR			
Range		No. pts	%	No. pts	%		
0.0m	- 1.0m	80771	20.9%	78638	20.4%		
1.0m	- 2.0m	74661	19.4%	73059	18.9%		
2.0m	- 5.0m	136880	35.5%	136439	35.4%		
5.0m	- 10.0m	69947	18.1%	72692	18.8%		
10.0m	- 15.0m	16556	4.3%	17757	4.6%		
15.0m	- 20.0m	4779	1.2%	5009	1.3%		
20.0m	- 25.0m	1513	0.4%	1505	0.4%		
25.0m	- 30.0m	404	0.1%	425	0.1%		
30.0m	- 40.0m	134	0.0%	116	0.0%		
40.0m	- 42.8m	2	0.0%	7	0.0%		

Izveštaj C-3 : Upoređenje visina tačaka izohipsi digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DOF5 DMT-a za područje Kruševac

**Kruševac, izohipse, grube greške odstranjene**

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
12.240	385511	5.102	4.881	1.163	-29.977	29.975
-----						
0.0 5.0	71589	2.904	2.903	-0.066	-23.756	28.107
5.0 10.0	101712	3.748	3.661	0.801	-28.651	29.169
10.0 15.0	87532	4.914	4.778	1.146	-28.762	29.871
15.0 20.0	60655	6.096	5.870	1.645	-29.977	29.958
20.0 25.0	36523	6.836	6.502	2.110	-27.912	29.903
25.0 30.0	17936	7.716	7.145	2.915	-27.363	29.975
30.0 35.0	6598	9.095	8.225	3.882	-28.777	29.956
35.0 40.0	2134	10.168	8.709	5.246	-23.615	29.838
40.0 45.0	618	10.924	8.771	6.509	-21.985	29.048
45.0 50.0	163	10.757	8.084	7.079	-17.004	28.833
50.0 55.0	29	7.533	6.998	2.790	-12.863	15.339
55.0 60.0	8	12.056	12.092	0.339	-12.260	22.280
60.0 65.0	10	9.898	9.790	-1.769	-12.896	17.450
65.0 70.0	2	16.361	10.003	9.419	2.701	16.137
70.0 75.0	2	9.183	8.665	3.101	-2.603	8.806

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr
RMSE	2.506	0.001	10.463	0.002
STDEV	2.613	0.001	9.201	0.003

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
12.099	385511	5.204	4.927	1.347	-29.752	33.945
-----						
0.0 5.0	71589	2.976	2.976	0.019	-23.615	28.091
5.0 10.0	101712	3.861	3.738	0.963	-29.752	30.670
10.0 15.0	87532	5.025	4.848	1.324	-28.539	33.945
15.0 20.0	60655	6.196	5.912	1.855	-28.931	30.577
20.0 25.0	36523	6.942	6.517	2.390	-28.094	29.942
25.0 30.0	17936	7.852	7.139	3.268	-27.188	29.984
30.0 35.0	6598	9.218	8.177	4.255	-28.246	31.479
35.0 40.0	2134	10.322	8.635	5.655	-22.989	29.431
40.0 45.0	618	11.140	8.760	6.877	-21.069	29.783
45.0 50.0	163	10.914	8.048	7.352	-17.024	29.608
50.0 55.0	29	7.702	6.846	3.507	-12.652	16.004
55.0 60.0	8	10.954	10.946	1.002	-9.033	21.027
60.0 65.0	10	9.369	9.281	-1.605	-11.612	16.821
65.0 70.0	2	16.612	9.995	9.627	2.896	16.358
70.0 75.0	2	10.352	10.356	2.225	-4.749	9.198

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr
RMSE	2.594	0.001	10.534	0.002
STDEV	2.709	0.001	9.020	0.003

ERROR DISTRIBUTION

Range	CUBIC		LINEAR	
	No.pts	%	No.pts	%
0.0m - 1.0m	80771	21.0%	78638	20.4%
1.0m - 2.0m	74661	19.4%	73059	19.0%
2.0m - 5.0m	136880	35.5%	136439	35.4%
5.0m - 10.0m	69947	18.1%	72692	18.9%
10.0m - 15.0m	16556	4.3%	17757	4.6%
15.0m - 20.0m	4779	1.2%	5009	1.3%
20.0m - 25.0m	1513	0.4%	1505	0.4%
25.0m - 30.0m	404	0.1%	399	0.1%
30.0m - 33.9m	0	0.0%	13	0.0%

Izveštaj C-4 : Upoređenje visina tačaka izohipsi digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DOF5 DMT-a za područje Kruševca – grube greške su prethodno odstranjene



Novi Pazar, izohipse

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
16.873	68003	5.153	4.570	2.338	-18.227	31.468

0.0	5.0	4203	3.164	2.851	1.373	-10.919	21.128
5.0	10.0	10058	3.527	3.060	1.753	-14.987	19.949
10.0	15.0	15354	4.364	3.793	2.157	-15.402	26.291
15.0	20.0	15429	5.267	4.607	2.551	-15.224	31.468
20.0	25.0	12016	5.974	5.296	2.766	-16.198	30.000
25.0	30.0	6969	6.550	5.893	2.858	-18.227	30.244
30.0	35.0	2722	6.847	6.369	2.514	-17.044	27.535
35.0	40.0	871	7.021	6.534	2.569	-16.266	28.714
40.0	45.0	270	6.678	6.384	1.957	-13.289	22.434
45.0	50.0	65	6.928	6.738	1.602	-16.646	24.898
50.0	55.0	27	10.382	9.875	3.145	-15.219	19.581
55.0	60.0	6	14.893	9.624	10.375	3.948	23.278
60.0	65.0	9	8.770	4.046	7.336	0.475	15.810
65.0	70.0	3	12.043	3.949	9.290	5.541	13.413
75.0	80.0	1	-	-	6.248	6.248	6.248

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	2.987	0.003	6.557	0.007		0.316
STDEV	2.522	0.002	6.180	0.006		0.279

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
16.737	68003	5.229	4.583	2.468	-17.043	30.955

0.0	5.0	4203	3.201	2.883	1.390	-11.272	21.128
5.0	10.0	10058	3.608	3.117	1.816	-13.820	19.886
10.0	15.0	15354	4.433	3.824	2.242	-15.483	25.781
15.0	20.0	15429	5.356	4.634	2.685	-14.125	30.955
20.0	25.0	12016	6.074	5.319	2.932	-16.111	29.165
25.0	30.0	6969	6.621	5.861	3.080	-17.043	29.870
30.0	35.0	2722	6.895	6.301	2.800	-16.307	27.599
35.0	40.0	871	7.084	6.460	2.906	-16.020	28.458
40.0	45.0	270	6.681	6.242	2.377	-11.705	22.512
45.0	50.0	65	6.704	6.371	2.070	-14.558	24.814
50.0	55.0	27	10.237	9.549	3.622	-13.209	20.330
55.0	60.0	6	14.893	9.711	10.307	3.384	23.222
60.0	65.0	9	8.242	3.503	7.034	1.028	14.289
65.0	70.0	3	12.063	4.207	9.231	5.130	13.536
75.0	80.0	1	-	-	6.129	6.129	6.129

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	3.065	0.003	6.555	0.008		0.331
STDEV	2.599	0.002	5.995	0.007		0.286

ERROR DISTRIBUTION

Range	CUBIC		LINEAR	
	No. pts	%	No. pts	%
0.0m - 1.0m	12592	18.5%	12455	18.3%
1.0m - 2.0m	11671	17.2%	11370	16.7%
2.0m - 5.0m	24815	36.5%	24658	36.3%
5.0m - 10.0m	14639	21.5%	15007	22.1%
10.0m - 15.0m	3502	5.1%	3685	5.4%
15.0m - 20.0m	648	1.0%	701	1.0%
20.0m - 25.0m	112	0.2%	108	0.2%
25.0m - 30.0m	21	0.0%	18	0.0%
30.0m - 31.5m	3	0.0%	1	0.0%

Izveštaj C-5 : Upoređenje visina kota digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DOF5 DMT-a za područje Novog Pazara

**Valjevo 1, izohipse, grube greške odstranjene**

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum	
15.265	90562	3.971	3.884	0.544	-20.745	23.872	
-----							
0.0	5.0	4865	2.905	2.892	0.274	-16.408	18.186
5.0	10.0	15881	3.099	3.098	0.046	-19.238	21.630
10.0	15.0	26955	3.464	3.461	0.140	-20.003	22.487
15.0	20.0	22269	3.973	3.935	0.551	-20.745	23.194
20.0	25.0	12349	4.712	4.579	1.109	-18.829	23.604
25.0	30.0	5344	5.540	5.216	1.866	-20.409	23.529
30.0	35.0	2043	6.048	5.597	2.292	-15.838	21.728
35.0	40.0	617	7.343	6.615	3.185	-14.995	23.872
40.0	45.0	173	7.490	6.575	3.577	-20.363	20.619
45.0	50.0	44	6.625	6.188	2.340	-10.770	18.293
50.0	55.0	10	10.935	9.924	4.356	-12.925	22.234
55.0	60.0	5	6.361	4.552	3.974	-0.512	11.426
60.0	65.0	4	5.761	2.962	4.279	1.550	7.189
65.0	70.0	1	-	-	2.013	2.013	2.013
70.0	75.0	1	-	-	18.873	18.873	18.873
85.0	90.0	1	-	-	14.038	14.038	14.038

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	2.278	0.001	5.764	0.004		0.166
STDEV	2.422	0.001	5.012	0.003		0.131

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum	
15.084	90562	3.982	3.851	0.795	-20.826	24.758	
-----							
0.0	5.0	4865	2.939	2.890	0.534	-15.815	18.145
5.0	10.0	15881	3.121	3.101	0.354	-19.585	20.703
10.0	15.0	26955	3.469	3.449	0.375	-20.826	22.133
15.0	20.0	22269	3.970	3.896	0.767	-19.074	23.488
20.0	25.0	12349	4.729	4.534	1.343	-17.928	23.275
25.0	30.0	5344	5.562	5.130	2.148	-18.236	22.431
30.0	35.0	2043	6.064	5.461	2.634	-16.525	21.019
35.0	40.0	617	7.378	6.492	3.502	-14.496	24.758
40.0	45.0	173	7.621	6.450	4.048	-17.261	20.645
45.0	50.0	44	7.000	6.194	3.224	-9.291	18.775
50.0	55.0	10	10.976	9.519	5.185	-10.275	24.363
55.0	60.0	5	6.161	4.424	3.836	-0.579	11.055
60.0	65.0	4	5.585	2.965	4.098	1.575	7.776
65.0	70.0	1	-	-	2.116	2.116	2.116
70.0	75.0	1	-	-	18.548	18.548	18.548
85.0	90.0	1	-	-	14.426	14.426	14.426

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	2.289	0.001	5.767	0.004		0.174
STDEV	2.449	0.001	4.814	0.003		0.126

ERROR DISTRIBUTION

Range	CUBIC		LINEAR	
	No. pts	%	No. pts	%
0.0m - 1.0m	23576	26.0%	23285	25.7%
1.0m - 2.0m	19692	21.7%	19334	21.3%
2.0m - 5.0m	31931	35.3%	32307	35.7%
5.0m - 10.0m	12880	14.2%	13219	14.6%
10.0m - 15.0m	2121	2.3%	2060	2.3%
15.0m - 20.0m	321	0.4%	322	0.4%
20.0m - 24.8m	41	0.0%	35	0.0%

Izveštaj C-6 : Upoređenje visina tačaka izohipsi digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DOF5 DMT-a za područje Valjevo 1 – grube greške su prethodno odstranjene



Valjevo 2, izohipse, grube greške odstranjene

CUBIC interpolation statistics							
Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum	
14.253	76927	4.603	4.410	1.197	-23.480	23.668	
-----							
0.0	5.0	5074	3.255	3.203	0.580	-17.872	21.566
5.0	10.0	17502	3.566	3.493	0.719	-18.490	22.992
10.0	15.0	23332	4.216	4.098	0.991	-23.377	23.555
15.0	20.0	16533	4.909	4.691	1.446	-22.238	23.383
20.0	25.0	8535	5.620	5.371	1.655	-21.516	23.173
25.0	30.0	3834	6.359	5.935	2.283	-21.379	22.636
30.0	35.0	1405	7.083	6.504	2.804	-23.480	23.422
35.0	40.0	516	7.802	6.974	3.494	-16.948	23.010
40.0	45.0	136	8.730	6.990	5.212	-10.212	23.668
45.0	50.0	41	8.628	7.713	3.819	-11.488	21.757
50.0	55.0	11	5.993	5.743	1.633	-6.215	9.721
55.0	60.0	3	8.851	8.754	-1.064	-7.324	8.939
60.0	65.0	1	-	-	-10.188	-10.188	-10.188
65.0	70.0	1	-	-	6.704	6.704	6.704
70.0	75.0	1	-	-	6.754	6.754	6.754
75.0	80.0	1	-	-	-7.772	-7.772	-7.772
85.0	90.0	1	-	-	3.951	3.951	3.951
LINEAR REGRESSION							
	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr	
RMSE	2.753	0.001	6.759	0.003		0.111	
STDEV	2.813	0.001	5.865	0.003		0.117	
LINEAR interpolation statistics							
Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum	
14.110	76927	4.630	4.385	1.366	-23.579	24.153	
-----							
0.0	5.0	5074	3.300	3.206	0.782	-17.156	20.146
5.0	10.0	17502	3.607	3.496	0.889	-18.747	22.009
10.0	15.0	23332	4.248	4.097	1.121	-23.579	23.151
15.0	20.0	16533	4.925	4.658	1.601	-21.569	23.136
20.0	25.0	8535	5.638	5.323	1.859	-20.431	23.016
25.0	30.0	3834	6.385	5.860	2.535	-20.182	22.202
30.0	35.0	1405	7.046	6.321	3.112	-22.582	23.936
35.0	40.0	516	7.929	6.858	3.976	-16.683	24.153
40.0	45.0	136	8.760	6.829	5.467	-9.748	23.568
45.0	50.0	41	8.575	7.547	4.020	-8.834	20.887
50.0	55.0	11	5.785	5.409	1.954	-5.651	9.951
55.0	60.0	3	9.113	9.078	-0.652	-6.787	9.776
60.0	65.0	1	-	-	-9.382	-9.382	-9.382
65.0	70.0	1	-	-	6.805	6.805	6.805
70.0	75.0	1	-	-	6.653	6.653	6.653
75.0	80.0	1	-	-	-7.918	-7.918	-7.918
85.0	90.0	1	-	-	3.837	3.837	3.837
LINEAR REGRESSION							
	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr	
RMSE	2.798	0.001	6.699	0.003		0.110	
STDEV	2.850	0.001	5.647	0.003		0.117	
ERROR DISTRIBUTION							
		CUBIC		LINEAR			
Range	No.pts	%	No.pts	%			
0.0m - 1.0m	17404	22.6%	16861	21.9%			
1.0m - 2.0m	14889	19.4%	14736	19.2%			
2.0m - 5.0m	27583	35.9%	27827	36.2%			
5.0m - 10.0m	13588	17.7%	14030	18.2%			
10.0m - 15.0m	2778	3.6%	2798	3.6%			
15.0m - 20.0m	587	0.8%	587	0.8%			
20.0m - 24.2m	98	0.1%	88	0.1%			

Izveštaj C-7 : Upoređenje visina tačaka izohipsi digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DOF5 DMT-a za područje Valjevo 2 – grube greške su prethodno odstranjene

**Valjevo 3, izohipse, grube greške odstranjene**

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
12.155	79917	3.688	3.548	0.852	-17.971	20.907
-----						
0.0 5.0	7631	2.560	2.530	0.391	-17.904	18.493
5.0 10.0	26601	2.864	2.816	0.517	-16.191	19.911
10.0 15.0	24044	3.541	3.468	0.715	-16.841	20.619
15.0 20.0	12404	4.259	4.078	1.228	-16.102	20.601
20.0 25.0	5622	5.157	4.845	1.766	-17.971	19.795
25.0 30.0	2278	5.897	5.519	2.077	-17.740	20.166
30.0 35.0	894	6.616	5.960	2.870	-14.654	20.291
35.0 40.0	329	7.052	6.167	3.414	-15.994	20.835
40.0 45.0	80	8.685	7.124	4.937	-14.442	20.907
45.0 50.0	18	8.798	6.913	5.289	-4.585	20.591
50.0 55.0	13	9.230	6.032	6.713	-4.590	14.407
55.0 60.0	2	12.563	1.504	8.819	7.756	9.883
60.0 65.0	1	-	-	2.220	2.220	2.220

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	1.987	0.001	7.220	0.003		0.117
STDEV	2.085	0.001	6.246	0.004		0.134

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
12.018	79917	3.714	3.536	0.991	-17.866	21.430
-----						
0.0 5.0	7631	2.583	2.522	0.556	-15.961	17.590
5.0 10.0	26601	2.884	2.810	0.648	-15.748	19.421
10.0 15.0	24044	3.557	3.461	0.823	-16.317	19.505
15.0 20.0	12404	4.292	4.067	1.372	-15.492	20.718
20.0 25.0	5622	5.213	4.830	1.959	-17.288	21.430
25.0 30.0	2278	5.954	5.493	2.297	-17.866	20.158
30.0 35.0	894	6.688	5.900	3.147	-15.132	19.577
35.0 40.0	329	7.014	5.970	3.676	-14.965	20.283
40.0 45.0	80	8.355	6.742	4.905	-12.986	20.127
45.0 50.0	18	8.843	6.746	5.556	-4.493	20.754
50.0 55.0	13	9.960	5.892	7.715	-3.335	14.232
55.0 60.0	2	13.231	2.207	9.224	7.664	10.785
60.0 65.0	1	-	-	2.044	2.044	2.044

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	1.999	0.001	7.279	0.003		0.123
STDEV	2.093	0.001	6.166	0.004		0.139

ERROR DISTRIBUTION

Range	CUBIC		LINEAR	
	No. pts	%	No. pts	%
0.0m - 1.0m	21905	27.4%	21378	26.8%
1.0m - 2.0m	18055	22.6%	17898	22.4%
2.0m - 5.0m	28529	35.7%	28933	36.2%
5.0m - 10.0m	9724	12.2%	10035	12.6%
10.0m - 15.0m	1489	1.9%	1456	1.8%
15.0m - 20.0m	205	0.3%	206	0.3%
20.0m - 21.4m	10	0.0%	11	0.0%

Izveštaj C-8 : Upoređenje visina tačaka izohipsi digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DOF5 DMT-a za područje Valjevo 3 – grube greške su prethodno odstranjene



Barajevo, izohipse

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
9.189	27547	2.952	2.944	0.080	-24.008	19.835
-----						
0.0 5.0	7669	2.011	2.007	0.120	-23.265	13.701
5.0 10.0	10617	2.496	2.486	0.224	-23.808	14.747
10.0 15.0	4953	3.491	3.491	0.038	-22.822	18.414
15.0 20.0	2374	3.860	3.857	-0.160	-24.008	13.052
20.0 25.0	1090	4.541	4.527	-0.355	-16.400	17.930
25.0 30.0	501	5.343	5.282	-0.807	-16.539	19.835
30.0 35.0	194	5.794	5.770	-0.527	-16.005	15.944
35.0 40.0	83	5.637	5.628	0.328	-14.678	11.055
40.0 45.0	40	5.075	5.047	-0.529	-17.624	9.196
45.0 50.0	16	4.045	3.863	-1.164	-8.702	5.559
50.0 55.0	6	2.852	2.757	-0.666	-4.245	3.073
55.0 60.0	2	9.024	7.740	3.280	-2.193	8.753
60.0 65.0	1	-	-	-1.938	-1.938	-1.938
65.0 70.0	1	-	-	6.850	6.850	6.850

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	1.772	0.002	6.405	0.012		0.249
STDEV	1.772	0.003	6.361	0.012		0.254

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
8.510	27547	2.924	2.915	0.083	-23.593	19.360
-----						
0.0 5.0	7669	1.983	1.978	0.141	-22.889	13.699
5.0 10.0	10617	2.476	2.465	0.230	-23.593	14.788
10.0 15.0	4953	3.453	3.452	0.028	-22.859	17.010
15.0 20.0	2374	3.840	3.836	-0.174	-23.360	12.663
20.0 25.0	1090	4.498	4.481	-0.386	-16.114	16.699
25.0 30.0	501	5.306	5.243	-0.816	-16.693	19.360
30.0 35.0	194	5.761	5.732	-0.582	-15.985	15.829
35.0 40.0	83	5.495	5.490	0.234	-14.567	11.295
40.0 45.0	40	5.010	4.954	-0.742	-17.427	8.880
45.0 50.0	16	3.957	3.772	-1.157	-8.474	5.611
50.0 55.0	6	2.937	2.670	-1.117	-4.869	3.193
55.0 60.0	2	5.491	5.141	1.365	-2.270	5.000
60.0 65.0	1	-	-	-1.760	-1.760	-1.760
65.0 70.0	1	-	-	6.905	6.905	6.905

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	1.753	0.002	6.347	0.012		0.252
STDEV	1.752	0.003	6.305	0.012		0.257

ERROR DISTRIBUTION

Range	CUBIC		LINEAR	
	No.pts	%	No.pts	%
0.0m - 1.0m	10920	39.6%	11296	41.0%
1.0m - 2.0m	6857	24.9%	6525	23.7%
2.0m - 5.0m	7552	27.4%	7726	28.0%
5.0m - 10.0m	1902	6.9%	1712	6.2%
10.0m - 15.0m	248	0.9%	219	0.8%
15.0m - 20.0m	56	0.2%	57	0.2%
20.0m - 24.0m	12	0.0%	12	0.0%

Izveštaj C-9 : Upoređenje visina tačaka izohipsi digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DOF5 DMT-a za područje Barajevo

**Lazarevac, trigonometri, grube greške odstranjene**

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
3.224	660	1.986	1.798	0.811	-5.635	9.886
0.0 5.0	533	1.900	1.747	0.745	-4.041	9.886
5.0 10.0	91	2.382	2.053	1.201	-5.083	6.464
10.0 15.0	24	2.018	1.950	0.506	-5.635	4.310
15.0 20.0	6	3.216	2.429	1.924	-1.015	4.867
20.0 25.0	3	1.412	0.501	1.078	0.503	1.414
25.0 30.0	1	-	-	1.267	1.267	1.267
30.0 35.0	1	-	-	3.426	3.426	3.426
40.0 45.0	1	-	-	-2.317	-2.317	-2.317

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	1.821	0.010	2.406	0.114		0.161
STDEV	1.721	0.009	1.156	0.099		0.139

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
2.975	660	2.366	1.918	1.343	-5.530	10.470
0.0 5.0	533	2.259	1.907	1.208	-3.775	10.470
5.0 10.0	91	2.873	1.971	2.079	-2.240	7.027
10.0 15.0	24	2.356	2.069	1.104	-5.530	5.361
15.0 20.0	6	3.238	2.430	1.954	-1.030	4.997
20.0 25.0	3	2.031	0.631	1.576	1.136	2.299
25.0 30.0	1	-	-	2.000	2.000	2.000
30.0 35.0	1	-	-	5.945	5.945	5.945
40.0 45.0	1	-	-	2.000	2.000	2.000

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	2.179	0.011	2.647	0.126		0.177
STDEV	1.907	0.006	0.216	0.075		0.106

ERROR DISTRIBUTION

Range	CUBIC		LINEAR	
	No.pts	%	No.pts	%
0.0m - 1.0m	383	58.0%	327	49.5%
1.0m - 2.0m	134	20.3%	143	21.7%
2.0m - 5.0m	119	18.0%	157	23.8%
5.0m - 10.0m	24	3.6%	32	4.8%
10.0m - 10.5m	0	0.0%	1	0.2%

Izveštaj C-10 : Upoređenje visina trigonometara digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DOF5 DMT-a za područje Lazarevca – grube greške su prethodno odstranjene



Lazarevac, kote							
CUBIC interpolation statistics							
Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum	
5.186	319	2.784	2.698	0.117	-10.523	10.072	
0.0	5.0	202	2.062	2.062	-0.000	-7.944	9.766
5.0	10.0	74	3.467	3.397	0.688	-7.456	10.072
10.0	15.0	24	4.189	4.181	-0.238	-10.523	9.626
15.0	20.0	10	4.272	3.632	-2.133	-9.520	3.339
20.0	25.0	5	4.131	4.130	-0.036	-4.235	6.879
25.0	30.0	1	-	-	0.035	0.035	0.035
30.0	35.0	1	-	-	9.202	9.202	9.202
35.0	40.0	1	-	-	3.393	3.393	3.393
45.0	50.0	1	-	-	1.044	1.044	1.044
LINEAR REGRESSION							
	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr	
RMSE	1.786	0.029	9.421	0.236		0.334	
STDEV	1.825	0.030	8.600	0.249		0.354	
LINEAR interpolation statistics							
Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum	
5.278	319	2.973	2.879	0.232	-10.986	11.250	
0.0	5.0	202	2.206	2.205	0.081	-8.501	9.682
5.0	10.0	74	3.782	3.686	0.844	-7.548	11.250
10.0	15.0	24	4.315	4.315	0.015	-10.986	9.872
15.0	20.0	10	4.276	3.806	-1.848	-9.570	3.556
20.0	25.0	5	4.347	4.313	-0.480	-4.206	6.842
25.0	30.0	1	-	-	1.246	1.246	1.246
30.0	35.0	1	-	-	10.366	10.366	10.366
35.0	40.0	1	-	-	3.029	3.029	3.029
45.0	50.0	1	-	-	1.108	1.108	1.108
LINEAR REGRESSION							
	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr	
RMSE	1.955	0.034	9.542	0.276		0.392	
STDEV	1.979	0.034	8.862	0.277		0.393	
ERROR DISTRIBUTION							
		CUBIC		LINEAR			
Range	No.pts	%	No.pts	%			
0.0m - 1.0m	144	45.1%	137	42.9%			
1.0m - 2.0m	73	22.9%	65	20.4%			
2.0m - 5.0m	76	23.8%	89	27.9%			
5.0m - 10.0m	24	7.5%	25	7.8%			
10.0m - 11.3m	2	0.6%	3	0.9%			

Izveštaj C-11 : Upoređenje visina kota digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DOF5 DMT-a za područje Lazarevca

Lazarevac, izohipse							
CUBIC interpolation statistics							
Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum	
10.250	479374	5.426	5.417	-0.224	-102.564	75.679	
0.0	5.0	116528	5.522	5.520	-0.124	-102.564	69.002
5.0	10.0	154404	4.899	4.898	-0.090	-100.276	75.679
10.0	15.0	106301	5.316	5.312	-0.210	-101.393	56.584
25.0	30.0	11194	6.992	6.927	-0.953	-86.887	70.990
15.0	20.0	56697	5.732	5.718	-0.396	-89.385	54.579
20.0	25.0	26875	6.259	6.226	-0.641	-88.926	54.345
30.0	35.0	4353	7.091	6.976	-1.273	-74.217	44.268
35.0	40.0	1688	7.423	7.343	-1.087	-88.245	48.104
40.0	45.0	699	7.168	7.157	-0.380	-21.014	33.137
45.0	50.0	352	7.892	7.823	1.045	-20.938	47.829
50.0	55.0	166	7.596	7.263	2.218	-19.695	26.306
55.0	60.0	70	9.011	8.622	2.601	-14.386	40.768
60.0	65.0	19	11.792	11.147	3.745	-18.319	34.600
65.0	70.0	15	8.804	8.749	0.950	-10.979	17.121
70.0	75.0	11	9.777	9.113	3.376	-9.310	20.622
LINEAR REGRESSION							
	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr	
RMSE	4.923	0.001	2.571	0.004	0.357		
STDEV	4.936	0.001	2.462	0.004	0.352		
LINEAR interpolation statistics							
Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum	
9.960	479374	5.403	5.398	-0.112	-101.981	75.311	
0.0	5.0	116528	5.523	5.522	-0.051	-101.981	68.770
5.0	10.0	154404	4.900	4.900	0.019	-99.891	75.311
10.0	15.0	106301	5.298	5.298	-0.093	-100.706	55.965
15.0	20.0	56697	5.683	5.678	-0.257	-89.021	54.109
20.0	25.0	26875	6.168	6.150	-0.475	-88.630	54.382
25.0	30.0	11194	6.864	6.820	-0.777	-86.571	70.801
30.0	35.0	4353	6.929	6.849	-1.055	-73.832	44.268
35.0	40.0	1688	7.179	7.133	-0.808	-88.391	48.056
40.0	45.0	699	6.871	6.871	-0.070	-19.000	33.139
45.0	50.0	352	7.601	7.495	1.267	-18.525	47.183
50.0	55.0	166	7.411	6.978	2.488	-20.105	23.536
55.0	60.0	70	9.097	8.622	2.879	-10.480	40.995
60.0	65.0	19	11.717	10.977	3.988	-17.715	34.003
65.0	70.0	15	8.666	8.617	0.883	-10.043	17.287
70.0	75.0	11	9.404	8.704	3.395	-8.611	20.819
LINEAR REGRESSION							
	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr	
RMSE	4.950	0.001	2.319	0.004	0.346		
STDEV	4.961	0.001	2.240	0.004	0.342		
ERROR DISTRIBUTION							
CUBIC				LINEAR			
Range	No. pts	%		No. pts	%		
0.0m - 1.0m	149288	31.1%		149607	31.2%		
1.0m - 2.0m	101899	21.3%		100153	20.9%		
2.0m - 5.0m	148525	31.0%		150363	31.4%		
5.0m - 10.0m	61968	12.9%		62198	13.0%		
10.0m - 15.0m	12132	2.5%		11697	2.4%		
15.0m - 20.0m	2772	0.6%		2609	0.5%		
20.0m - 25.0m	686	0.1%		686	0.1%		
25.0m - 30.0m	408	0.1%		382	0.1%		
30.0m - 40.0m	358	0.1%		341	0.1%		
40.0m - 102.6m	1338	0.3%		1338	0.3%		

Izveštaj C-12 : Upoređenje visina tačaka izohipsi digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DOF5 DMT-a za područje Lazarevca



Lazarevac, izohipse, bez grubih grešaka (preko 20m)

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
10.248	476584	3.950	3.943	-0.093	-19.997	19.990
-----						
0.0 5.0	115603	2.663	2.663	-0.011	-19.997	19.990
5.0 10.0	153729	3.390	3.389	0.046	-19.960	19.874
10.0 15.0	105789	4.259	4.258	-0.057	-19.989	19.812
15.0 20.0	56408	5.008	5.000	-0.277	-19.967	19.879
20.0 25.0	26697	5.531	5.507	-0.512	-19.901	19.799
25.0 30.0	11089	6.040	5.987	-0.797	-19.981	19.976
30.0 35.0	4296	6.202	6.103	-1.105	-19.997	19.680
35.0 40.0	1662	6.515	6.449	-0.923	-18.674	19.695
40.0 45.0	691	6.629	6.599	-0.624	-19.937	19.120
45.0 50.0	343	6.633	6.614	0.504	-19.760	19.434
50.0 55.0	164	7.124	6.852	1.941	-19.695	19.182
55.0 60.0	68	6.759	6.554	1.641	-14.386	18.646
60.0 65.0	18	8.765	8.512	2.031	-18.319	19.194
65.0 70.0	15	8.804	8.749	0.950	-10.979	17.121
70.0 75.0	10	7.678	7.478	1.652	-9.310	14.618

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	2.553	0.001	6.829	0.003	0.281	
STDEV	2.563	0.001	6.746	0.003	0.286	

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
9.958	476584	3.930	3.925	0.019	-22.217	20.937
-----						
0.0 5.0	115603	2.680	2.679	0.062	-21.031	20.326
5.0 10.0	153729	3.401	3.398	0.154	-21.290	19.553
10.0 15.0	105789	4.248	4.247	0.059	-21.404	19.776
15.0 20.0	56408	4.961	4.959	-0.138	-22.217	20.937
20.0 25.0	26697	5.441	5.430	-0.347	-21.149	19.870
25.0 30.0	11089	5.907	5.875	-0.621	-20.216	19.898
30.0 35.0	4296	6.049	5.983	-0.894	-21.187	19.618
35.0 40.0	1662	6.269	6.235	-0.654	-19.523	20.114
40.0 45.0	691	6.377	6.370	-0.299	-19.000	18.887
45.0 50.0	343	6.443	6.396	0.772	-17.200	20.642
50.0 55.0	164	7.023	6.653	2.242	-20.105	19.969
55.0 60.0	68	6.840	6.560	1.921	-10.480	18.536
60.0 65.0	18	8.794	8.464	2.320	-17.715	20.442
65.0 70.0	15	8.666	8.617	0.883	-10.043	17.287
70.0 75.0	10	7.078	6.860	1.652	-8.611	14.627

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	2.594	0.001	6.550	0.003	0.281	
STDEV	2.599	0.001	6.500	0.003	0.287	

ERROR DISTRIBUTION

Range	CUBIC		LINEAR	
	No.pts	%	No.pts	%
0.0m - 1.0m	149342	31.3%	149656	31.4%
1.0m - 2.0m	101881	21.4%	100142	21.0%
2.0m - 5.0m	148505	31.2%	150337	31.5%
5.0m - 10.0m	61955	13.0%	62187	13.0%
10.0m - 15.0m	12131	2.5%	11694	2.5%
15.0m - 20.0m	2770	0.6%	2505	0.5%
20.0m - 22.2m	0	0.0%	63	0.0%

Izveštaj C-13 : Upoređenje visina tačaka izohipsi digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DOF5 DMT-a za područje Lazarevca – grube greške su prethodno odstranjene

Sopot, trigonometri

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
4.800	200	1.323	1.210	0.422	-5.042	4.965
0.0 5.0	121	1.348	1.265	0.465	-5.042	4.965
5.0 10.0	61	1.100	1.034	0.373	-2.680	3.852
10.0 15.0	15	1.550	1.482	0.439	-2.751	3.900
15.0 20.0	1	-	-	2.926	2.926	2.926
20.0 25.0	1	-	-	-0.133	-0.133	-0.133
25.0 30.0	1	-	-	-3.913	-3.913	-3.913

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	1.328	0.017	-0.483	0.170	0.134	
STDEV	1.240	0.017	-0.355	0.165	0.130	

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
3.772	200	1.692	1.373	0.967	-4.690	7.183
0.0 5.0	121	1.794	1.492	0.991	-4.690	7.183
5.0 10.0	61	1.380	1.160	0.741	-2.681	4.678
10.0 15.0	15	1.952	1.233	1.462	0.081	3.872
15.0 20.0	1	-	-	3.133	3.133	3.133
20.0 25.0	1	-	-	1.000	1.000	1.000
25.0 30.0	1	-	-	2.246	2.246	2.246

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	1.796	0.024	-1.399	0.240	0.189	
STDEV	1.573	0.010	-2.407	0.100	0.079	

ERROR DISTRIBUTION

Range	CUBIC		LINEAR	
	No.pts	%	No.pts	%
0.0m - 1.0m	139	69.5%	123	61.5%
1.0m - 2.0m	35	17.5%	44	22.0%
2.0m - 5.0m	25	12.5%	30	15.0%
5.0m - 7.2m	1	0.5%	3	1.5%

Izveštaj C-14 : Upoređenje visina trigonometara digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DOF5 DMT-a za područje Sopota



Sopot, izohipse, grube greške odstranjene

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
11.683	90849	2.888	2.886	0.057	-9.997	9.996
-----						
0.0 5.0	14174	1.931	1.929	0.092	-9.995	9.890
5.0 10.0	31283	2.222	2.220	0.094	-9.980	9.959
10.0 15.0	21069	2.957	2.957	0.073	-9.993	9.962
15.0 20.0	12452	3.543	3.543	-0.045	-9.997	9.995
20.0 25.0	6831	4.007	4.006	-0.055	-9.958	9.996
25.0 30.0	2889	4.364	4.363	0.049	-9.950	9.983
30.0 35.0	1275	4.479	4.479	0.040	-9.996	9.994
35.0 40.0	486	4.742	4.741	0.126	-9.942	9.982
40.0 45.0	218	4.859	4.848	0.330	-9.911	9.989
45.0 50.0	102	4.507	4.487	0.415	-9.349	9.676
50.0 55.0	38	4.492	4.450	-0.606	-8.420	9.636
55.0 60.0	18	4.494	4.312	1.230	-6.793	8.744
60.0 65.0	5	5.625	5.046	-2.222	-7.959	5.658
65.0 70.0	5	3.066	2.160	1.946	0.118	4.985
70.0 75.0	2	11.335	11.330	0.248	-7.764	8.259
75.0 80.0	2	2.640	1.657	1.454	0.282	2.625

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	1.777	0.002	4.758	0.006	0.269	
STDEV	1.778	0.002	4.746	0.006	0.275	

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
11.104	90849	2.853	2.852	0.065	-10.759	10.038
-----						
0.0 5.0	14174	1.912	1.909	0.121	-10.005	10.000
5.0 10.0	31283	2.190	2.187	0.106	-10.000	10.000
10.0 15.0	21069	2.916	2.916	0.069	-10.035	10.000
15.0 20.0	12452	3.500	3.499	-0.049	-10.569	9.977
20.0 25.0	6831	3.978	3.977	-0.057	-10.759	10.038
25.0 30.0	2889	4.322	4.322	0.053	-10.000	9.947
30.0 35.0	1275	4.433	4.433	0.040	-10.000	9.962
35.0 40.0	486	4.708	4.706	0.121	-9.869	9.923
40.0 45.0	218	4.816	4.807	0.291	-9.499	9.900
45.0 50.0	102	4.421	4.393	0.490	-8.499	9.595
50.0 55.0	38	4.402	4.351	-0.654	-8.112	9.615
55.0 60.0	18	4.626	4.379	1.450	-6.688	8.703
60.0 65.0	5	5.198	4.640	-2.096	-7.374	4.732
65.0 70.0	5	3.353	2.620	1.872	-0.734	5.626
70.0 75.0	2	11.236	11.217	0.470	-7.462	8.401
75.0 80.0	2	1.734	0.846	1.071	0.472	1.669

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	1.750	0.002	4.722	0.006	0.268	
STDEV	1.750	0.002	4.712	0.006	0.274	

ERROR DISTRIBUTION

Range	CUBIC		LINEAR	
	No. pts	%	No. pts	%
0.0m - 1.0m	31877	35.1%	32758	36.1%
1.0m - 2.0m	21412	23.6%	20904	23.0%
2.0m - 5.0m	28958	31.9%	29344	32.3%
5.0m - 10.0m	8602	9.5%	7835	8.6%
10.0m - 10.8m	0	0.0%	8	0.0%

Izveštaj C-15 : Upoređenje visina tačaka izohipsi digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DOF5 DMT-a za područje Sopota – grube greške su prethodno odstranjene

Vrčin, izohipse, grube greške odstranjene

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
10.944	18348	3.414	3.405	-0.151	-18.744	18.257
-----						
0.0 5.0	3399	2.279	2.279	-0.055	-11.301	18.257
5.0 10.0	5882	2.761	2.756	-0.167	-17.423	13.131
10.0 15.0	4502	3.584	3.583	-0.085	-18.006	14.897
15.0 20.0	2858	4.145	4.145	-0.056	-17.886	17.489
20.0 25.0	1234	4.788	4.760	-0.523	-17.876	15.216
25.0 30.0	348	5.781	5.689	-1.026	-18.744	16.171
30.0 35.0	94	6.442	6.350	-1.081	-15.594	14.587
35.0 40.0	15	4.609	4.602	0.241	-9.849	7.113
40.0 45.0	11	5.088	4.474	2.310	-9.125	6.103
45.0 50.0	2	5.556	5.412	-0.889	-4.716	2.938
50.0 55.0	1	-	-	3.505	3.505	3.505
60.0 65.0	1	-	-	9.680	9.680	9.680
65.0 70.0	1	-	-	-3.976	-3.976	-3.976

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	1.943	0.002	6.944	0.009		0.143
STDEV	1.955	0.002	6.852	0.009		0.151

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
10.643	18348	3.387	3.381	-0.055	-18.455	18.202
-----						
0.0 5.0	3399	2.275	2.275	-0.005	-11.295	18.033
5.0 10.0	5882	2.743	2.742	-0.093	-17.088	13.481
10.0 15.0	4502	3.549	3.549	0.013	-17.818	13.705
15.0 20.0	2858	4.133	4.132	0.076	-17.754	18.202
20.0 25.0	1234	4.720	4.711	-0.297	-18.455	15.484
25.0 30.0	348	5.663	5.600	-0.842	-17.104	16.101
30.0 35.0	94	6.379	6.286	-1.082	-15.485	14.625
35.0 40.0	15	4.524	4.508	0.376	-8.599	7.045
40.0 45.0	11	5.233	4.650	2.290	-9.456	6.434
45.0 50.0	2	5.621	5.512	-0.780	-4.678	3.117
50.0 55.0	1	-	-	3.505	3.505	3.505
60.0 65.0	1	-	-	9.655	9.655	9.655
65.0 70.0	1	-	-	-4.057	-4.057	-4.057

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	1.943	0.002	6.823	0.008		0.138
STDEV	1.952	0.002	6.757	0.009		0.145

ERROR DISTRIBUTION

Range	CUBIC		LINEAR	
	No.pts	%	No.pts	%
0.0m - 1.0m	5600	30.5%	5625	30.7%
1.0m - 2.0m	4265	23.2%	4200	22.9%
2.0m - 5.0m	6248	34.1%	6311	34.4%
5.0m - 10.0m	1971	10.7%	1969	10.7%
10.0m - 15.0m	217	1.2%	203	1.1%
15.0m - 18.7m	47	0.3%	40	0.2%

Izveštaj C-16 : Upoređenje visina tačaka izohipsi digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DOF5 DMT-a za područje Vrčina – grube greške su prethodno odstranjene



Pančevo, trigonometri

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum	
2.931	701	1.868	1.632	0.735	-12.736	22.206	
0.0	5.0	576	1.265	1.137	0.555	-3.007	6.214
5.0	10.0	68	2.012	1.787	0.917	-3.514	7.013
10.0	15.0	31	5.442	5.143	1.750	-12.736	22.206
15.0	20.0	12	4.240	2.901	2.961	-1.153	8.236
20.0	25.0	9	3.009	1.209	2.598	1.296	5.136
25.0	30.0	1	-	-	6.857	6.857	6.857
30.0	35.0	2	5.388	1.325	3.693	2.756	4.630
35.0	40.0	1	-	-	3.171	3.171	3.171
40.0	45.0	1	-	-	2.640	2.640	2.640

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	0.834	0.029	10.864	0.285		0.556
STDEV	0.904	0.036	7.089	0.348		0.679

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum	
2.807	701	2.062	1.700	0.954	-11.914	22.560	
0.0	5.0	576	1.404	1.214	0.706	-2.997	6.327
5.0	10.0	68	2.330	1.897	1.343	-3.089	7.013
10.0	15.0	31	5.767	5.252	2.344	-11.914	22.560
15.0	20.0	12	4.863	2.787	3.816	-0.213	8.507
20.0	25.0	9	3.932	1.312	3.494	2.000	5.949
25.0	30.0	1	-	-	6.739	6.739	6.739
30.0	35.0	2	5.721	0.767	4.009	3.467	4.551
35.0	40.0	1	-	-	3.151	3.151	3.151
40.0	45.0	1	-	-	2.804	2.804	2.804

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	0.912	0.028	12.352	0.276		0.538
STDEV	0.998	0.037	6.850	0.357		0.696

ERROR DISTRIBUTION

Range	CUBIC		LINEAR	
	No.pts	%	No.pts	%
0.0m - 1.0m	488	69.6%	465	66.3%
1.0m - 2.0m	107	15.3%	110	15.7%
2.0m - 5.0m	88	12.6%	103	14.7%
5.0m - 10.0m	15	2.1%	20	2.9%
10.0m - 15.0m	2	0.3%	2	0.3%
15.0m - 20.0m	0	0.0%	0	0.0%
20.0m - 22.6m	1	0.1%	1	0.1%

Izveštaj C-17 : Upoređenje visina trigonometara digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DOF5 DMT-a za područje Pančeva

Pančevo, kote							
CUBIC interpolation statistics							
Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum	
1.728	354	1.153	1.034	0.260	-5.440	6.212	
0.0	5.0	331	1.027	0.993	0.261	-5.440	6.212
5.0	10.0	13	2.116	1.910	0.876	-3.023	4.270
10.0	15.0	5	1.741	0.869	-1.349	-2.706	-0.430
15.0	20.0	1	-	-	5.032	5.032	5.032
20.0	25.0	2	2.492	1.272	1.516	0.616	2.415
40.0	45.0	1	-	-	-4.079	-4.079	-4.079
80.0	85.0	1	-	-	-2.741	-2.741	-2.741
LINEAR REGRESSION							
	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr	
RMSE	0.803	0.011	5.478	0.178		0.128	
STDEV	0.921	0.014	2.052	0.219		0.157	
LINEAR interpolation statistics							
Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum	
1.685	354	1.156	1.065	0.265	-5.442	6.240	
0.0	5.0	331	1.039	1.002	0.277	-5.442	6.240
5.0	10.0	13	2.451	2.257	0.918	-4.131	4.706
10.0	15.0	5	1.739	0.860	-1.352	-2.658	-0.398
15.0	20.0	1	-	-	1.000	1.000	1.000
20.0	25.0	2	2.437	1.275	1.469	0.567	2.370
40.0	45.0	1	-	-	-4.036	-4.036	-4.036
80.0	85.0	1	-	-	-2.849	-2.849	-2.849
LINEAR REGRESSION							
	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr	
RMSE	0.799	0.017	6.015	0.259		0.185	
STDEV	0.908	0.019	2.704	0.302		0.216	
ERROR DISTRIBUTION							
		CUBIC		LINEAR			
Range	No. pts	%	No. pts	%			
0.0m - 1.0m	278	78.5%	274	77.4%			
1.0m - 2.0m	48	13.6%	53	15.0%			
2.0m - 5.0m	25	7.1%	25	7.1%			
5.0m - 6.2m	3	0.8%	2	0.6%			

Izveštaj C-18 : Upoređenje visina kota digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DOF5 DMT-a za područje Pančeva



**Pančevo, izohipse, grube greške odstranjene**

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
4.431	301984	2.368	2.362	-0.099	-30.916	26.798
-----						
0.0 5.0	218587	1.398	1.397	-0.040	-30.916	23.492
5.0 10.0	41860	2.970	2.964	-0.190	-25.239	24.482
10.0 15.0	20697	3.815	3.811	-0.185	-25.381	26.798
15.0 20.0	9834	4.577	4.562	-0.371	-23.450	24.075
20.0 25.0	4931	5.271	5.261	-0.323	-22.046	23.351
25.0 30.0	2635	6.171	6.155	-0.441	-23.394	21.722
30.0 35.0	1579	6.698	6.688	-0.363	-23.042	22.499
35.0 40.0	865	6.862	6.819	-0.766	-21.900	18.051
40.0 45.0	493	6.310	6.137	-1.466	-23.892	17.659
45.0 50.0	279	6.480	6.337	-1.356	-18.041	14.613
50.0 55.0	128	6.224	5.967	-1.761	-17.697	13.123
55.0 60.0	52	7.308	6.886	-2.425	-16.490	12.654
60.0 65.0	27	8.043	7.333	-3.242	-18.121	15.068
65.0 70.0	10	6.508	5.233	-3.670	-12.492	3.674
70.0 75.0	7	6.976	6.975	-0.113	-9.437	7.469

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	1.197	0.001	8.905	0.007		0.482
STDEV	1.204	0.001	8.791	0.007		0.497

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
4.275	301984	2.349	2.344	-0.091	-30.986	26.496
-----						
0.0 5.0	218587	1.386	1.386	-0.038	-30.986	21.966
5.0 10.0	41860	2.955	2.950	-0.181	-25.240	24.874
10.0 15.0	20697	3.785	3.782	-0.157	-25.534	26.496
15.0 20.0	9834	4.539	4.527	-0.322	-23.190	23.944
20.0 25.0	4931	5.218	5.210	-0.287	-22.040	22.934
25.0 30.0	2635	6.109	6.096	-0.408	-23.312	21.553
30.0 35.0	1579	6.613	6.606	-0.319	-22.603	22.452
35.0 40.0	865	6.768	6.728	-0.735	-21.641	18.014
40.0 45.0	493	6.257	6.083	-1.466	-24.332	17.666
45.0 50.0	279	6.375	6.214	-1.420	-17.884	13.943
50.0 55.0	128	6.152	5.891	-1.765	-17.682	13.456
55.0 60.0	52	7.088	6.653	-2.420	-15.731	12.364
60.0 65.0	27	7.902	7.169	-3.262	-17.845	14.158
65.0 70.0	10	6.540	5.200	-3.763	-12.886	3.629
70.0 75.0	7	6.997	6.995	-0.126	-9.299	7.727

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	1.190	0.001	8.808	0.007		0.481
STDEV	1.197	0.001	8.705	0.007		0.495

ERROR DISTRIBUTION

Range	CUBIC		LINEAR	
	No.pts	%	No.pts	%
0.0m - 1.0m	181619	60.1%	182670	60.5%
1.0m - 2.0m	57033	18.9%	56303	18.6%
2.0m - 5.0m	47667	15.8%	47893	15.9%
5.0m - 10.0m	13281	4.4%	12849	4.3%
10.0m - 15.0m	1919	0.6%	1835	0.6%
15.0m - 20.0m	374	0.1%	345	0.1%
20.0m - 25.0m	77	0.0%	74	0.0%
25.0m - 30.0m	9	0.0%	11	0.0%
30.0m - 31.0m	5	0.0%	4	0.0%

Izveštaj C-19 : Upoređenje visina tačaka izohipsi digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DOF5 DMT-a za područje Pančeva – grube greške su prethodno odstranjene

**Kragujevac, izohipse, grube greške odstranjene**

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum	
8.224	40973	2.340	2.318	-0.266	-22.609	17.291	
-----							
0.0	5.0	13982	1.629	1.628	-0.072	-18.515	16.178
5.0	10.0	15414	2.209	2.188	-0.310	-22.041	11.039
10.0	15.0	6871	2.843	2.802	-0.479	-22.609	15.453
15.0	20.0	2642	3.134	3.112	-0.366	-20.234	13.771
20.0	25.0	1096	3.759	3.722	-0.531	-17.039	11.017
25.0	30.0	484	3.957	3.925	-0.501	-17.417	17.291
30.0	35.0	244	3.798	3.791	0.228	-11.550	11.162
35.0	40.0	114	4.141	4.127	-0.336	-14.592	9.469
40.0	45.0	67	3.901	3.870	-0.485	-9.802	13.871
45.0	50.0	21	2.711	2.636	0.619	-3.732	6.388
50.0	55.0	21	4.685	4.654	0.533	-8.026	14.208
55.0	60.0	8	3.298	3.186	-0.798	-4.737	4.751
60.0	65.0	3	2.415	2.414	-0.054	-2.316	2.487
65.0	70.0	4	6.769	6.118	-2.508	-11.412	1.554
70.0	75.0	1	-	-	-11.192	-11.192	-11.192
75.0	80.0	1	-	-	5.963	5.963	5.963

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	1.598	0.002	4.451	0.009	0.241	
STDEV	1.591	0.002	4.372	0.009	0.234	

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum	
8.093	40973	2.326	2.305	-0.263	-22.550	17.247	
-----							
0.0	5.0	13982	1.624	1.622	-0.070	-18.515	16.173
5.0	10.0	15414	2.198	2.176	-0.307	-22.052	11.000
10.0	15.0	6871	2.828	2.787	-0.478	-22.550	15.385
15.0	20.0	2642	3.113	3.091	-0.367	-20.240	13.817
20.0	25.0	1096	3.732	3.693	-0.534	-17.046	11.043
25.0	30.0	484	3.923	3.891	-0.498	-17.422	17.247
30.0	35.0	244	3.784	3.777	0.234	-11.578	11.140
35.0	40.0	114	4.057	4.048	-0.276	-14.516	9.401
40.0	45.0	67	3.826	3.792	-0.508	-9.734	13.738
45.0	50.0	21	2.717	2.649	0.589	-3.781	6.551
50.0	55.0	21	4.637	4.613	0.458	-7.000	14.158
55.0	60.0	8	2.776	2.739	-0.421	-3.913	4.755
60.0	65.0	3	2.605	2.600	-0.131	-2.716	2.483
65.0	70.0	4	6.379	6.167	-1.411	-9.975	3.869
70.0	75.0	1	-	-	-10.756	-10.756	-10.756
75.0	80.0	1	-	-	6.481	6.481	6.481

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	1.595	0.002	4.389	0.010	0.242	
STDEV	1.588	0.002	4.317	0.009	0.234	

ERROR DISTRIBUTION

Range	CUBIC		LINEAR	
	No.pts	%	No.pts	%
0.0m - 1.0m	17721	43.3%	17892	43.7%
1.0m - 2.0m	11311	27.6%	11271	27.5%
2.0m - 5.0m	10117	24.7%	10021	24.5%
5.0m - 10.0m	1684	4.1%	1652	4.0%
10.0m - 15.0m	109	0.3%	106	0.3%
15.0m - 20.0m	26	0.1%	26	0.1%
20.0m - 22.6m	5	0.0%	5	0.0%

Izveštaj C-20 : Upoređenje visina tačaka izohipsi digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DOF5 DMT-a za područje Kragujevca – grube greške su prethodno odstranjene



Čačak, trigonometri

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
4.974	115	2.444	1.840	1.307	-3.579	9.491
0.0 5.0	77	1.628	1.604	0.740	-3.579	4.120
5.0 10.0	23	3.153	2.208	2.217	-1.499	8.086
10.0 15.0	10	4.998	3.529	3.390	-0.842	9.491
15.0 20.0	3	3.834	1.967	2.898	1.808	4.544
20.0 25.0	1	-	-	-1.927	-1.927	-1.927
35.0 40.0	1	-	-	1.680	1.680	1.680

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr
RMSE	1.046	0.057	14.786	0.522
STDEV	1.338	0.048	6.725	0.446

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
5.709	115	2.963	2.049	1.814	-3.637	10.990
0.0 5.0	77	1.913	1.565	1.104	-3.637	5.473
5.0 10.0	23	4.192	2.662	3.178	-0.670	10.818
10.0 15.0	10	5.549	3.804	3.867	-0.277	10.990
15.0 20.0	3	5.132	1.975	4.028	2.414	5.046
20.0 25.0	1	-	-	-1.944	-1.944	-1.944
35.0 40.0	1	-	-	1.686	1.686	1.686

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr
RMSE	1.232	0.062	18.360	0.573
STDEV	1.269	0.060	8.610	0.555

ERROR DISTRIBUTION

Range	CUBIC		LINEAR	
	No. pts	%	No. pts	%
0.0m - 1.0m	51	44.3%	48	41.7%
1.0m - 2.0m	29	25.2%	18	15.7%
2.0m - 5.0m	28	24.3%	39	33.9%
5.0m - 10.0m	7	6.1%	8	7.0%
10.0m - 11.0m	0	0.0%	2	1.7%

Izveštaj C-21 : Upoređenje visina trigonometara digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DOF5 DMT-a za područje Čačka

Čačak, izohipse, grube greške odstranjene

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum	
13.201	163155	4.980	4.888	0.871	-29.974	29.981	
0.0	5.0	24325	2.359	2.325	0.400	-26.402	26.919
5.0	10.0	45590	3.182	3.082	0.790	-29.893	29.981
10.0	15.0	37945	4.095	3.950	1.079	-29.419	28.624
15.0	20.0	22740	5.379	5.214	1.325	-29.974	27.388
20.0	25.0	14421	6.657	6.519	1.350	-29.714	29.091
25.0	30.0	9513	7.892	7.874	0.544	-29.960	29.013
30.0	35.0	5416	9.918	9.918	-0.070	-29.255	29.734
35.0	40.0	2280	11.014	11.014	0.095	-29.692	29.347
40.0	45.0	691	11.466	11.462	0.294	-26.396	29.798
45.0	50.0	154	9.481	9.447	0.841	-26.422	28.808
50.0	55.0	37	11.359	10.722	3.735	-23.628	26.014
55.0	60.0	22	9.244	8.473	3.678	-18.626	18.810
60.0	65.0	12	14.303	12.313	7.018	-23.589	15.651
65.0	70.0	5	14.353	6.108	11.723	5.400	18.357
70.0	75.0	4	14.941	9.654	9.952	-0.369	18.452

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr
RMSE	1.690	0.001	11.705	0.005
STDEV	1.592	0.002	11.681	0.006

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum	
13.076	163155	4.967	4.851	0.987	-30.791	31.715	
0.0	5.0	24325	2.328	2.285	0.449	-26.445	26.832
5.0	10.0	45590	3.163	3.038	0.878	-30.126	29.809
10.0	15.0	37945	4.082	3.908	1.179	-30.791	28.617
15.0	20.0	22740	5.367	5.162	1.470	-29.847	27.095
20.0	25.0	14421	6.645	6.465	1.536	-29.544	30.119
25.0	30.0	9513	7.903	7.865	0.780	-30.752	29.251
30.0	35.0	5416	9.875	9.873	0.169	-30.074	29.637
35.0	40.0	2280	11.009	11.006	0.268	-29.432	31.715
40.0	45.0	691	11.490	11.483	0.392	-26.904	31.279
45.0	50.0	154	9.291	9.256	0.852	-27.856	28.834
50.0	55.0	37	11.535	10.953	3.604	-24.203	25.938
55.0	60.0	22	9.157	8.336	3.768	-18.279	18.724
60.0	65.0	12	14.481	12.447	7.134	-22.637	15.625
65.0	70.0	5	14.036	6.205	11.370	4.901	17.740
70.0	75.0	4	14.522	9.222	9.795	-0.335	18.465

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr
RMSE	1.667	0.001	11.730	0.005
STDEV	1.544	0.002	11.701	0.006

ERROR DISTRIBUTION

Range	CUBIC		LINEAR	
	No.pts	%	No.pts	%
0.0m - 1.0m	43088	26.4%	42672	26.2%
1.0m - 2.0m	32929	20.2%	33107	20.3%
2.0m - 5.0m	53331	32.7%	53326	32.7%
5.0m - 10.0m	24725	15.2%	25087	15.4%
10.0m - 15.0m	5750	3.5%	5674	3.5%
15.0m - 20.0m	2099	1.3%	2082	1.3%
20.0m - 25.0m	897	0.5%	880	0.5%
25.0m - 30.0m	336	0.2%	316	0.2%
30.0m - 31.7m	0	0.0%	11	0.0%

Izveštaj C-22 : Upoređenje visina tačaka izohipsi digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DOF5 DMT-a za područje Čačka – grube greške su prethodno odstranjene



Beograd DTK5, trigonometri							
CUBIC interpolation statistics							
Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum	
4.343	193	1.558	1.254	0.796	-5.522	8.671	
-----							
0.0	5.0	140	1.434	1.292	0.619	-5.522	8.671
5.0	10.0	36	1.389	1.059	0.887	-1.255	4.912
10.0	15.0	8	2.834	1.866	1.995	-0.929	4.522
15.0	20.0	1	-	-	0.306	0.306	0.306
20.0	25.0	2	1.063	0.365	0.706	0.448	0.964
25.0	30.0	4	3.567	0.696	3.030	2.106	3.794
30.0	35.0	1	-	-	1.188	1.188	1.188
35.0	40.0	1	-	-	3.991	3.991	3.991
LINEAR REGRESSION							
	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr	
RMSE	1.242	0.028	3.461	0.238		0.286	
STDEV	1.331	0.018	-0.999	0.148		0.178	
LINEAR interpolation statistics							
Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum	
4.429	193	1.617	1.250	0.903	-5.588	8.589	
-----							
0.0	5.0	140	1.478	1.298	0.704	-5.588	8.589
5.0	10.0	36	1.460	0.967	1.078	-0.660	4.910
10.0	15.0	8	3.061	1.964	2.196	-0.481	5.341
15.0	20.0	1	-	-	0.308	0.308	0.308
20.0	25.0	2	0.983	0.310	0.660	0.441	0.879
25.0	30.0	4	3.615	0.654	3.079	2.224	3.812
30.0	35.0	1	-	-	1.195	1.195	1.195
35.0	40.0	1	-	-	4.090	4.090	4.090
LINEAR REGRESSION							
	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr	
RMSE	1.288	0.031	3.584	0.260		0.312	
STDEV	1.332	0.021	-1.134	0.178		0.214	
ERROR DISTRIBUTION							
Range		CUBIC		LINEAR			
	No.pts	%	No.pts	%			
0.0m - 1.0m	119	61.7%	113	58.5%			
1.0m - 2.0m	49	25.4%	50	25.9%			
2.0m - 5.0m	23	11.9%	27	14.0%			
5.0m - 8.7m	2	1.0%	3	1.6%			

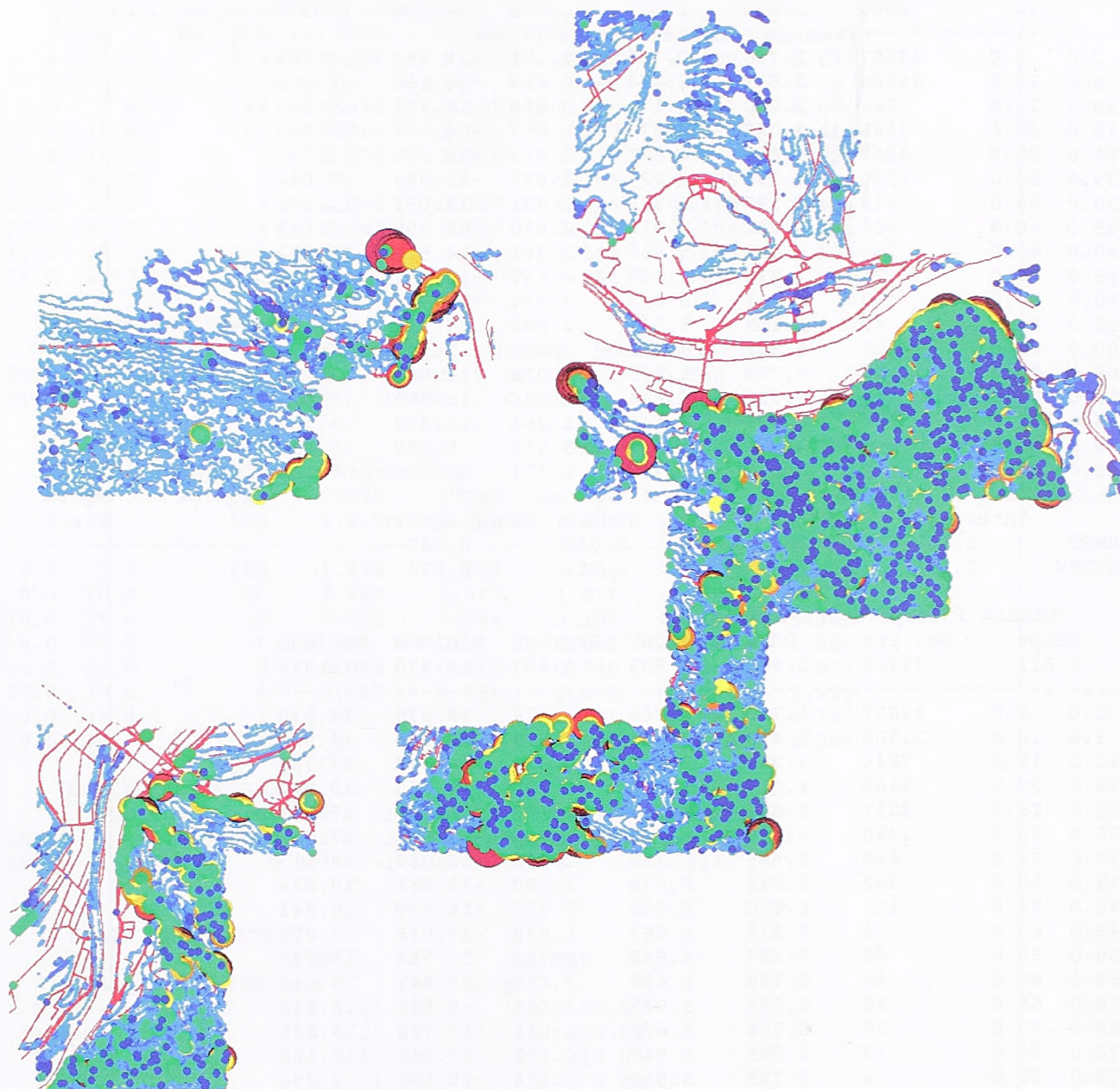
Izveštaj C-23 : Upoređenje visina trigonometara digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DTK5 DMT-a za područje Beograda (centar, Borča, Kumodraž, Ostružnica i Zemun)

Beograd DTK5, izohipse, grube greške odstranjene							
CUBIC interpolation statistics							
Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum	
6.574	79966	2.598	2.519	0.445	-19.950	19.930	
0.0	5.0	42657	1.796	1.788	0.171	-19.950	19.566
5.0	10.0	21306	2.511	2.476	0.417	-16.196	18.518
10.0	15.0	7644	3.280	3.171	0.838	-16.484	19.443
15.0	20.0	3485	4.037	3.836	1.257	-14.351	19.930
20.0	25.0	2231	4.625	4.321	1.648	-16.281	17.211
25.0	30.0	1330	4.996	4.724	1.627	-12.083	17.044
30.0	35.0	619	5.597	5.362	1.601	-16.096	19.594
35.0	40.0	302	6.061	5.710	2.030	-15.998	18.619
40.0	45.0	152	6.650	5.960	2.941	-14.517	18.852
45.0	50.0	74	7.813	6.257	4.647	-16.962	17.170
50.0	55.0	60	6.611	5.668	3.374	-11.790	19.724
55.0	60.0	40	6.131	5.591	2.485	-9.911	19.532
60.0	65.0	26	6.621	6.042	2.655	-9.346	19.018
65.0	70.0	20	5.778	5.672	1.078	-12.736	13.707
70.0	75.0	13	6.850	6.844	-0.286	-15.888	10.073
75.0	80.0	4	6.799	6.640	-1.268	-10.892	4.156
80.0	85.0	1	-	-	-5.638	-5.638	-5.638
85.0	90.0	2	4.323	3.789	1.471	-1.209	4.150
LINEAR REGRESSION							
Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr		
RMSE	1.967	0.003	3.590	0.012	0.627		
STDEV	1.958	0.002	3.244	0.011	0.573		
LINEAR interpolation statistics							
Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum	
6.529	79966	2.585	2.503	0.453	-19.970	19.942	
0.0	5.0	42657	1.789	1.780	0.176	-19.970	19.570
5.0	10.0	21306	2.490	2.454	0.423	-16.126	18.558
10.0	15.0	7644	3.258	3.145	0.852	-16.487	19.382
15.0	20.0	3485	4.010	3.799	1.282	-14.350	19.942
20.0	25.0	2231	4.625	4.309	1.680	-16.361	17.103
25.0	30.0	1330	4.989	4.705	1.656	-12.077	17.037
30.0	35.0	619	5.585	5.352	1.596	-16.059	19.617
35.0	40.0	302	6.011	5.670	1.990	-15.981	18.634
40.0	45.0	152	6.610	5.923	2.925	-14.529	18.843
45.0	50.0	74	7.816	6.267	4.638	-17.018	17.276
50.0	55.0	60	6.627	5.688	3.372	-11.754	19.628
55.0	60.0	40	6.159	5.627	2.473	-9.841	19.540
60.0	65.0	26	6.528	5.949	2.635	-8.941	18.530
65.0	70.0	20	5.764	5.670	1.012	-12.772	13.696
70.0	75.0	13	6.955	6.948	-0.301	-16.041	10.133
75.0	80.0	4	6.729	6.539	-1.374	-10.903	3.764
80.0	85.0	1	-	-	-5.583	-5.583	-5.583
85.0	90.0	2	4.069	3.602	1.338	-1.209	3.885
LINEAR REGRESSION							
Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr		
RMSE	1.956	0.003	3.575	0.012	0.624		
STDEV	1.946	0.002	3.225	0.011	0.568		
ERROR DISTRIBUTION							
		CUBIC		LINEAR			
Range	No. pts	%	No. pts	%			
0.0m - 1.0m	38190	47.8%	38395	48.0%			
1.0m - 2.0m	19277	24.1%	19238	24.1%			
2.0m - 5.0m	17293	21.6%	17157	21.5%			
5.0m - 10.0m	4557	5.7%	4539	5.7%			
10.0m - 15.0m	571	0.7%	558	0.7%			
15.0m - 20.0m	78	0.1%	79	0.1%			

Izveštaj C-24 : Upoređenje visina tačaka izohipsi digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DTK5 DMT-a za područje Beograda (centar, Borča, Kumodraž, Ostružnica i Zemun) – grube greške su prethodno odstranjene



C.6 Grafički prikaz upoređenja visina digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz digitalnih modela terena dobijenih iz DTK5



Slika C-3 : Greške upoređenja visina tačaka izohipsi digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DTK5 DMT-a za područje Beograda (centar, Borča, Kumodraž, Ostružnica i Zemun) – grube greške su prethodno odstranjene (Izveštaj C-24)

**C.7 Sažeti prikaz rezultata upoređenja visina interpolovanih iz modela terena dobijenih iz DOF5, ODK5, DTK5 i TP1 sa visinama digitalizovanim sa TK25**

Projekat	Tip prostornog entiteta	Izbačene grube greške	Tip interpolacije	Prosečan nagib terena	Broj tačaka	Srednja kvadratna greška (RMSE)[m]	Standardna devijacija ( $\sigma$ ) [m]	Prosečna greška[m]	Minimalna greška[m]	Maksimalna greška[m]
Kruševac (DOF10)	Kote	Ne	KUB	5.982	328	3.397	3.249	0.405	-12.786	13.533
			LIN	6.324	328	3.611	3.439	0.600	-13.506	15.022
	Izohipse	Ne	KUB	12.243	385647	5.139	4.914	1.173	-35.578	41.639
			LIN	12.102	385647	5.240	4.959	1.357	-34.925	42.764
	Izohipse	Da	KUB	12.240	385511	5.102	4.881	1.163	-29.977	29.975
			LIN	12.099	385511	5.204	4.927	1.347	-29.752	33.945
	Trigonometri	Ne	KUB	4.378	295	3.583	3.090	1.411	-4.825	16.801
			LIN	4.787	295	4.222	3.440	1.979	-4.799	19.145
Novi Pazar (DOF5)	Kote	Ne	KUB	11.701	44	5.404	4.306	2.662	-4.744	16.771
			LIN	10.288	44	4.646	3.837	2.224	-4.884	13.769
	Izohipse	Ne	KUB	16.873	68003	5.153	4.570	2.338	-18.227	31.468
			LIN	16.737	68003	5.229	4.583	2.468	-17.043	30.955
Trigonometri	Ne	KUB	9.369	36	4.583	1.852	3.375	-0.321	14.322	
		LIN	10.110	36	5.303	2.154	4.047	-0.277	13.808	
Valjevo 1 (DOF5)	Kote	Ne	KUB	5.163	63	1.702	1.637	-0.235	-4.310	4.521
			LIN	5.992	63	1.830	1.786	0.031	-3.646	5.621
	Izohipse	Ne	KUB	15.266	90596	4.041	3.954	0.540	-51.426	35.691
			LIN	15.085	90596	4.050	3.919	0.791	-49.725	35.281
	Izohipse	Da	KUB	15.265	90562	3.971	3.884	0.544	-20.745	23.872
			LIN	15.084	90562	3.982	3.851	0.795	-20.826	24.758
Trigonometri	Ne	KUB	5.483	35	1.384	1.146	0.683	-1.196	3.640	
		LIN	6.467	35	2.217	1.308	1.679	-0.396	4.645	
Valjevo 2 (DOF5)	Kote	Ne	KUB	7.734	52	3.811	3.651	1.106	-9.519	13.376
			LIN	8.168	52	3.978	3.762	1.317	-9.492	13.536
	Izohipse	Ne	KUB	14.256	76949	4.622	4.428	1.200	-25.986	28.981
			LIN	14.113	76949	4.647	4.402	1.369	-25.578	27.602
	Izohipse	Da	KUB	14.253	76927	4.603	4.410	1.197	-23.480	23.668
			LIN	14.110	76927	4.630	4.385	1.366	-23.579	24.153
Trigonometri	Ne	KUB	3.992	37	2.315	1.983	1.209	-1.361	7.119	
		LIN	4.166	37	2.908	2.251	1.834	-1.224	9.180	
Valjevo 3 (DOF5)	Kote	Ne	KUB	5.650	72	3.069	2.712	0.843	-8.773	11.502
			LIN	6.137	72	3.301	2.848	1.125	-8.743	11.420
	Izohipse	Ne	KUB	12.160	79938	3.707	3.563	0.858	-17.971	27.662
			LIN	12.023	79938	3.732	3.549	0.996	-17.866	27.720
	Izohipse	Da	KUB	12.155	79917	3.688	3.548	0.852	-17.971	20.907
			LIN	12.018	79917	3.714	3.536	0.991	-17.866	21.430
Trigonometri	Ne	KUB	3.547	42	2.543	2.081	1.437	-1.772	7.521	
		LIN	4.077	42	2.963	2.105	2.054	-1.545	8.670	



Projekat	Tip prostornog entiteta	Izbačene grube greške	Tip interpolacije	Prosečan nagib terena	Broj tačaka	Srednja kvadratna greška (RMSE) [m]	Standardna devijacija (σ) [m]	Prosečna greška[m]	Minimalna greška[m]	Maksimalna greška[m]
Barajevo (ODK5 i DOF5)	Kote	Ne	KUB	3.868	24	1.550	1.378	0.088	-4.100	3.199
			LIN	2.724	24	1.774	1.655	-0.100	-4.456	3.137
	Izohipse	Ne	KUB	9.189	27547	2.952	2.944	0.080	-24.008	19.835
			LIN	8.510	27547	2.924	2.915	0.083	-23.593	19.360
	Trigonometri	Ne	KUB	3.568	85	1.103	0.970	0.498	-2.530	4.157
			LIN	2.634	85	1.299	0.951	0.863	-0.834	4.000
Lazarevac (ODK5 - DOF5)	Kote	Ne	KUB	5.186	319	2.784	2.698	0.117	-10.523	10.072
			LIN	5.278	319	2.973	2.879	0.232	-10.986	11.250
	Izohipse	Ne	KUB	10.250	479374	5.426	5.417	-0.224	-102.564	75.679
			LIN	9.960	479374	5.403	5.398	-0.112	-101.981	75.311
	Izohipse	Da	KUB	10.248	476584	3.950	3.943	-0.093	-19.997	19.990
			LIN	9.958	476584	3.930	3.925	0.019	-22.217	20.937
	Trigonometri	Ne	KUB	3.227	664	2.906	2.773	0.794	-32.537	29.039
			LIN	2.976	664	3.156	2.834	1.325	-31.183	28.860
	Trigonometri	Da	KUB	3.224	660	1.986	1.798	0.811	-5.635	9.886
			LIN	2.975	660	2.366	1.918	1.343	-5.530	10.470
Sopot (ODK5 - DOF5)	Kote	Ne	KUB	6.093	77	2.454	2.295	0.193	-6.465	11.648
			LIN	4.197	77	2.445	2.334	-0.151	-6.735	11.420
	Izohipse	Ne	KUB	11.751	91783	3.126	3.123	0.018	-19.427	39.398
			LIN	11.159	91783	3.085	3.082	0.026	-19.223	38.877
	Izohipse	Da	KUB	11.683	90849	2.888	2.886	0.057	-9.997	9.996
			LIN	11.104	90849	2.853	2.852	0.065	-10.759	10.038
Trigonometri	Ne	KUB	4.800	200	1.323	1.210	0.422	-5.042	4.965	
		LIN	3.772	200	1.692	1.373	0.967	-4.690	7.183	
Vrcin (ODK5 - DOF5)	Kote	Ne	KUB	3.955	13	1.987	1.976	0.489	-2.805	3.712
			LIN	3.842	13	2.227	2.203	0.567	-2.720	4.748
	Izohipse	Ne	KUB	10.945	18362	3.469	3.459	-0.168	-26.091	18.257
			LIN	10.644	18362	3.440	3.434	-0.072	-25.787	18.202
	Izohipse	Da	KUB	10.944	18348	3.414	3.405	-0.151	-18.744	18.257
			LIN	10.643	18348	3.387	3.381	-0.055	-18.455	18.202
Trigonometri	Ne	KUB	6.319	42	2.835	1.849	1.630	-1.269	12.104	
		LIN	6.287	42	3.457	2.038	2.391	-1.283	12.791	
Pančevo (DOF5)	Kote	Ne	KUB	1.728	354	1.153	1.034	0.260	-5.440	6.212
			LIN	1.685	354	1.156	1.065	0.265	-5.442	6.240
	Izohipse	Ne	KUB	4.432	301987	2.383	2.376	-0.099	-99.316	42.443
			LIN	4.275	301987	2.363	2.358	-0.092	-99.431	26.496
	Izohipse	Da	KUB	4.431	301984	2.368	2.362	-0.099	-30.916	26.798
			LIN	4.275	301984	2.349	2.344	-0.091	-30.986	26.496
Trigonometri	Ne	KUB	2.931	701	1.868	1.632	0.735	-12.736	22.206	
		LIN	2.807	701	2.062	1.700	0.954	-11.914	22.560	

Projekat	Tip prostornog entiteta	Izbačene grube greške	Tip interpolacije	Prosečan nagib terena	Broj tačaka	Srednja kvadratna greška (RMSE)[m]	Standardna devijacija ( $\sigma$ ) [m]	Prosečna greška[m]	Minimalna greška[m]	Maksimalna greška[m]
Kragujevac (TP1)	Kote	Ne	KUB	6.452	21	1.401	1.379	-0.138	-3.307	2.268
			LIN	6.281	21	1.408	1.385	-0.128	-3.279	2.349
	Izohipse	Ne	KUB	8.227	40975	2.403	2.336	-0.269	-108.618	17.291
			LIN	8.097	40975	2.603	2.334	-0.271	-211.355	17.247
	Izohipse	Da	KUB	8.224	40973	2.340	2.318	-0.266	-22.609	17.291
			LIN	8.093	40973	2.326	2.305	-0.263	-22.550	17.247
	Trigonometri	Ne	KUB	3.229	89	1.359	1.257	0.388	-4.104	7.844
			LIN	3.278	89	1.400	1.301	0.411	-4.178	8.478
Čačak (DOF5)	Kote	Ne	KUB	5.598	114	3.772	3.187	1.137	-6.504	21.113
			LIN	5.707	114	4.083	3.351	1.311	-6.360	21.505
	Kote	Da	KUB	5.372	112	2.681	2.460	0.798	-6.504	8.930
			LIN	5.480	112	2.944	2.649	0.951	-6.360	9.333
	Izohipse	Ne	KUB	13.211	163289	5.070	4.982	0.860	-43.611	41.194
			LIN	13.086	163289	5.055	4.944	0.977	-43.352	40.117
	Izohipse	Da	KUB	13.201	163155	4.980	4.888	0.871	-29.974	29.981
			LIN	13.076	163155	4.967	4.851	0.987	-30.791	31.715
	Trigonometri	Ne	KUB	4.974	115	2.444	1.840	1.307	-3.579	9.491
			LIN	5.709	115	2.963	2.049	1.814	-3.637	10.990
Beograd (DTK5)	Kote	Ne	KUB	4.961	78	1.477	1.404	0.485	-5.532	4.031
			LIN	5.153	78	1.449	1.374	0.483	-5.532	4.093
	Izohipse	Ne	KUB	6.590	80052	2.919	2.821	0.484	-19.950	135.882
			LIN	6.544	80052	2.898	2.799	0.492	-19.970	121.700
	Izohipse	Da	KUB	6.574	79966	2.598	2.519	0.445	-19.950	19.930
			LIN	6.529	79966	2.585	2.503	0.453	-19.970	19.942
	Trigonometri	Ne	KUB	4.343	193	1.558	1.254	0.796	-5.522	8.671
			LIN	4.429	193	1.617	1.250	0.903	-5.588	8.589

Tabela C-3 : Statistički pokazatelji upoređenja visina digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DMT-ova dobijenih iz DOF5 i DTK5 projekata, digitalizacije visinske predstave sa ODK5 i topografskog premera Kragujevca 1:1000 (TP1)

**NAPOMENA:** Kod izbacivanja grubih grešaka primenjen je princip da se za prag grubih grešaka usvaja trostruka vrednost srednje kvadratne greške dobijene za najveći nagib terena, pod uslovom da je ta greška određena sa dovoljnim brojem tačaka.



### C.8 Upoređenje visina interpolovanih iz modela terena dobijenih iz DOF5, ODK5, DTK5 i TP1 sa visinama digitalizovanim sa TK25 – prikaz po nagibima terena

Nagib terena		Kruševac		Novi Pazar		Valjevo 1		Valjevo 2		Valjevo 3		Pantčevo		Čačak	
od	do	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV
0.0	5.0	2.904	2.903	3.164	2.851	2.905	2.892	3.255	3.203	2.560	2.530	1.398	1.397	2.359	2.325
5.0	10.0	3.748	3.661	3.527	3.060	3.099	3.098	3.566	3.493	2.864	2.816	2.970	2.964	3.182	3.082
10.0	15.0	4.914	4.778	4.364	3.793	3.464	3.461	4.216	4.098	3.541	3.468	3.815	3.811	4.095	3.950
15.0	20.0	6.096	5.870	5.267	4.607	3.973	3.935	4.909	4.691	4.259	4.078	4.577	4.562	5.379	5.214
20.0	25.0	6.836	6.502	5.974	5.296	4.712	4.579	5.620	5.371	5.157	4.845	5.271	5.261	6.657	6.519
25.0	30.0	7.716	7.145	6.550	5.893	5.540	5.216	6.359	5.935	5.897	5.519	6.171	6.155	7.892	7.874
30.0	35.0	9.095	8.225	6.847	6.369	6.048	5.597	7.083	6.504	6.616	5.960	6.698	6.688	9.918	9.918
35.0	40.0	10.168	8.709	7.021	6.534	7.343	6.615	7.802	6.974	7.052	6.167	6.862	6.819	11.014	11.014
40.0	45.0	10.924	8.771	6.678	6.384	7.490	6.575	8.730	6.990	8.685	7.124	6.310	6.137	11.466	11.462
		5.099	4.879	5.146	4.564	3.967	3.882	4.600	4.408	3.685	3.547	2.355	2.350	4.969	4.879

Nagib terena		Broj merenja (broj visina tačaka)										Prosečna greška sa težinama		Prosečna greška bez težina	
od	do	KŠ	NP	VA-1	VA-2	VA-3	PA	ČA	Σ	od	do	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV
0.0	5.0	71593	4203	4865	5074	7631	218587	24325	336278	0.0	5.0	2.006	1.994	2.714	2.644
5.0	10.0	101717	10058	15881	17502	26601	41860	45590	259209	5.0	10.0	3.390	3.307	3.294	3.180
10.0	15.0	87549	15354	26955	23332	24044	20697	37945	235876	10.0	15.0	4.311	4.177	4.085	3.930
15.0	20.0	60695	15429	22269	16533	12404	9834	22740	159904	15.0	20.0	5.318	5.098	4.969	4.748
20.0	25.0	36544	12016	12349	8535	5622	4931	14421	94418	20.0	25.0	6.180	5.884	5.793	5.526
25.0	30.0	17955	6969	5344	3834	2278	2635	9513	48528	25.0	30.0	7.119	6.730	6.641	6.308
30.0	35.0	6618	2722	2043	1405	894	1579	5416	20677	30.0	35.0	8.412	7.980	7.591	7.176
35.0	40.0	2142	871	617	516	329	865	2280	7620	35.0	40.0	9.326	8.732	8.329	7.716
40.0	45.0	619	270	173	136	80	493	691	2462	40.0	45.0	9.506	8.696	8.807	7.834
		385432	67892	90496	76867	79883	301481	162921	1164972			4.311	4.143	6.163	5.753

Tabela C-4 : Raspodela grešaka po nagibima terena; greške su dobijene iz upoređenja visina tačaka izohipsi digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DMT-ova dobijenih iz DOF5 projekata

Eksperimentalna ocena kvaliteta postojećih podataka za formiranje nacionalnog DMT-a

Nagib terena		Barajevo		Lazarevac		Sopot		Vrčin	
od	do	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV
0.0	5.0	2.011	2.007	2.663	2.663	1.931	1.929	2.279	2.279
5.0	10.0	2.496	2.486	3.390	3.389	2.222	2.220	2.761	2.756
10.0	15.0	3.491	3.491	4.259	4.258	2.957	2.957	3.584	3.583
15.0	20.0	3.860	3.857	5.008	5.000	3.543	3.543	4.145	4.145
20.0	25.0	4.541	4.527	5.531	5.507	4.007	4.006	4.788	4.760
25.0	30.0	5.343	5.282	6.040	5.987	4.364	4.363	5.781	5.689
30.0	35.0	5.794	5.770	6.202	6.103	4.479	4.479	6.442	6.350
		<b>2.936</b>	<b>2.928</b>	<b>3.928</b>	<b>3.921</b>	<b>2.864</b>	<b>2.863</b>	<b>3.412</b>	<b>3.404</b>

Nagib terena		Broj merenja (broj visina tačaka)				
od	do	Barajevo	Lazarevac	Sopot	Vrčin	Σ
0.0	5.0	7669	115603	14174	3399	140845
5.0	10.0	10617	153729	31283	5882	201511
10.0	15.0	4953	105789	21069	4502	136313
15.0	20.0	2374	56408	12452	2858	74092
20.0	25.0	1090	26697	6831	1234	35852
25.0	30.0	501	11089	2899	348	14827
30.0	35.0	194	4296	1275	94	5859
		<b>27398</b>	<b>473611</b>	<b>89973</b>	<b>18317</b>	<b>609299</b>

Nagib terena		Prosečna greška sa težinama		Prosečna greška bez težina	
od	do	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV
0.0	5.0	2.558	2.557	2.239	2.238
5.0	10.0	3.176	3.174	2.751	2.747
10.0	15.0	4.037	4.036	3.603	3.602
15.0	20.0	4.727	4.720	4.175	4.172
20.0	25.0	5.221	5.200	4.749	4.731
25.0	30.0	5.722	5.676	5.420	5.365
30.0	35.0	5.861	5.781	5.779	5.721
		<b>3.734</b>	<b>3.727</b>	<b>4.281</b>	<b>4.257</b>

Nagib terena		Kragujevac		Broj merenja	
od	do	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV
0.0	5.0	1.629	1.628	218587	218587
5.0	10.0	2.209	2.188	41860	41860
10.0	15.0	2.843	2.802	20697	20697
15.0	20.0	3.134	3.112	9834	9834
20.0	25.0	3.759	3.722	4931	4931
25.0	30.0	3.957	3.925	2635	2635
30.0	35.0	3.798	3.791	1579	1579
35.0	40.0	4.141	4.127	865	865
		<b>1.994</b>	<b>1.983</b>	<b>300988</b>	<b>300988</b>

Nagib terena		Beograd DTK5		Broj merenja	
od	do	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV
0	5	1.796	1.788	42657	42657
5.0	10.0	2.511	2.476	21306	21306
10.0	15.0	3.280	3.171	7644	7644
15.0	20.0	4.037	3.836	3485	3485
20.0	25.0	4.625	4.321	2231	2231
25.0	30.0	4.996	4.724	1330	1330
30.0	35.0	5.597	5.362	619	619
35.0	40.0	6.061	5.710	302	302
		<b>2.562</b>	<b>2.492</b>	<b>79574</b>	<b>79574</b>

Tabela C-5 : Raspodela grešaka po nagibima terena; greške su dobijene iz upoređenja visina tačaka izohipsi digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DMT-ova dobijenih iz DOF5 i ODK5 (Barajevo, Lazarevac, Sopot i Vrčin), topografskog premera 1:1000 (Kragujevac) i DTK5 projekata (Beograd)



Eksperimentalna ocena kvaliteta postojećih podataka za formiranje nacionalnog DMT-a

Nagib terena		Kruševac		Novi Pazar		Valjevo 1		Valjevo 2		Valjevo 3		Pančevo		Čačak	
od	do	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV
0.0	5.0	2.921	2.836	2.736	1.930	1.348	1.223	2.388	2.044	2.471	2.109	1.265	1.137	1.628	2.325
5.0	10.0	4.292	3.550	3.067	1.697	0.923	0.812	2.334	1.749	3.120	2.102	2.012	1.787	3.153	3.082
10.0	15.0	4.890	4.077	6.769	1.529	2.407	1.620	-	-	-	-	5.442	5.143	4.998	3.950
15.0	20.0	7.422	5.874	5.066	2.591	-	-	-	-	-	-	4.240	2.901	3.834	1.967
		3.524	3.161	3.985	1.947	1.455	1.190	2.381	2.006	2.593	2.108	1.842	1.655	2.536	2.665

Broj merenja (broj visina tačaka)											
Nagib terena		KŠ	NP	VA-1	VA-2	VA-3	PA	ČA	Σ		
od	do	203	12	19	31	34	576	77	952		
0.0	5.0	69	12	10	5	7	68	23	194		
5.0	10.0	14	4	5	0	0	31	10	64		
10.0	15.0	5	6	0	0	0	12	3	26		
15.0	20.0	291	34	34	36	41	687	113	1236		

Nagib terena				Prosečna greška sa težinama				Prosečna greška bez težina			
od	do	RMSE	STDEV	od	do	RMSE	STDEV	od	do	RMSE	STDEV
0.0	5.0	5.0	1.881	1.818	2.200	2.021					
5.0	10.0	10.0	3.204	2.679	2.875	2.278					
10.0	15.0	15.0	5.176	4.386	5.101	3.568					
15.0	20.0	20.0	5.149	3.538	5.325	3.657					
			2.506	2.221	4.108	2.974					

Nagib terena				Barajevo				Lazarevac				Sopot				Vrčin			
od	do	RMSE	STDEV	od	do	RMSE	STDEV	od	do	RMSE	STDEV	od	do	RMSE	STDEV	od	do	RMSE	STDEV
0.0	5.0	1.123	1.040	1.900	1.747	1.348	1.265	1.765	1.508										
5.0	10.0	0.977	0.671	2.382	2.053	1.100	1.034	1.545	1.178										
10.0	15.0	1.758	0.660	2.018	1.950	1.550	1.482	6.107	3.868										
15.0	20.0	0.000	0.000	3.216	2.429	0.000	0.000	5.257	1.651										
20.0	25.0	0.000	0.000	1.412	0.501	0.000	0.000	0.000	0.000										
		1.118	0.978	1.992	1.804	1.294	1.217	3.086	1.961										

Nagib terena				Broj merenja (broj visina tačaka)									
od	do	RMSE	STDEV	Barajevo		Lazarevac		Sopot		Vrčin		Σ	
0.0	5.0	5.0	67	533	121	20	741						
5.0	10.0	10.0	15	91	61	13	180						
10.0	15.0	15.0	2	24	15	6	47						
15.0	20.0	20.0	0	6	0	3	9						
20.0	25.0	25.0	0	3	0	0	3						
			84	657	197	42	980						

Nagib terena				Prosečna greška sa težinama				Prosečna greška bez težina			
od	do	RMSE	STDEV	od	do	RMSE	STDEV	od	do	RMSE	STDEV
0.0	5.0	1.758	1.617	1.566	1.415						
5.0	10.0	1.879	1.622	1.599	1.334						
10.0	15.0	2.782	2.138	3.423	2.313						
15.0	20.0	4.013	2.200	4.358	2.077						
20.0	25.0	1.412	0.501	0.998	0.354						
		1.874	1.651	2.710	1.647						

Nagib terena				Kragujevac				Broj merenja	
od	do	RMSE	STDEV	od	do	RMSE	STDEV		
0.0	5.0	1.362	1.338	76					
5.0	10.0	1.184	0.550	10					
		1.343	1.272	86					

Nagib terena				Beograd DTK5				Broj merenja	
od	do	RMSE	STDEV	od	do	RMSE	STDEV		
0	5	1.434	1.292	140					
5.0	10.0	1.389	1.059	36					
10.0	15.0	2.834	1.866	8					
		1.514	1.281	184					

Tabela C-6 : Raspodela grešaka po nagibima terena; greške su dobijene iz upoređenja visina trigonometara digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DMT-ova dobijenih iz DOF5 (Kruševac, Novi Pazar, Valjevo 1, 2 i 3, Pančevo i Čačak), DOF5 i ODK5 (Barajevo, Lazarevac, Sopot i Vrčin), TP1 (Kragujevac) i DTK5 projekata (Beograd)



Ekperimentalna ocena kvaliteta postojećih podataka za formiranje nacionalnog DMT-a

Nagib terena		Kruševac		Novi Pazar		Valjevo 1		Valjevo 2		Valjevo 3		Pančevo		Čačak	
od	do	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV
0.0	5.0	2.628	2.666	4.378	3.218	1.488	1.389	3.829	3.555	1.858	1.830	1.027	0.993	2.047	2.022
5.0	10.0	4.205	3.962	3.525	2.992	2.035	1.990	4.163	4.010	3.968	3.849	2.116	1.910	3.242	3.215
10.0	15.0	4.105	4.094	7.666	5.351	2.226	2.223	2.481	2.470	4.463	3.580	1.714	0.869	3.387	2.801
15.0	20.0	4.690	3.549	4.688	4.570	2.805	2.795	5.255	4.923	9.933	2.370	-	-	4.021	4.352
		3.358	3.245	4.964	4.001	1.777	1.713	3.976	3.772	3.367	2.787	1.100	1.040	2.661	2.586

Broj merenja (broj visina tačaka)										
Nagib terena		KŠ	NP	VA-1	VA-2	VA-3	PA	ČA	Σ	
0.0	5.0	192	11	39	19	41	331	63	696	
5.0	10.0	72	12	15	20	22	13	35	189	
10.0	15.0	41	7	7	6	5	10	83	83	
15.0	20.0	14	12	2	5	2	0	2	37	
Σ		319	42	63	51	71	349	110	1005	

Nagib terena		Prosečna greška sa težinama			Prosečna greška bez težina		
od	do	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV
0.0	5.0	1.954	1.901	2.716	2.404		
5.0	10.0	3.711	3.529	3.429	3.240		
10.0	15.0	4.149	3.680	4.159	3.335		
15.0	20.0	5.081	4.070	5.690	5.721		
Σ		2.758	2.564	4.148	3.877		

Nagib terena		Barajevo		Lazarevac		Sopot		Vrčin	
od	do	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV
0.0	5.0	1.405	1.360	2.062	2.062	1.685	1.681	2.253	2.176
5.0	10.0	2.250	1.605	3.467	3.397	3.412	3.212	1.164	0.578
10.0	15.0	-	-	4.189	4.181	2.498	2.495	-	-
15.0	20.0	-	-	4.272	3.632	-	-	-	-
20.0	23.0	-	-	4.131	4.130	-	-	-	-
		1.626	1.417	2.782	2.731	2.417	2.336	2.111	2.000

Nagib terena		Broj merenja (broj visina tačaka)				
od	do	Barajevo	Lazarevac	Sopot	Vrčin	Σ
0.0	5.0	18	202	42	10	272
5.0	10.0	5	74	21	2	102
10.0	15.0	0	24	11	0	35
15.0	20.0	0	10	0	0	10
20.0	25.0	0	5	0	0	5
Σ		23	315	74	12	424

Nagib terena		Prosečna greška sa težinama		Prosečna greška bez težina	
od	do	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV
0.0	5.0	1.978	1.972	1.880	1.848
5.0	10.0	3.375	3.260	2.742	2.488
10.0	15.0	3.741	3.734	3.449	3.443
15.0	20.0	4.272	3.632	4.272	3.632
20.0	25.0	4.131	4.130	4.131	4.130
		2.653	2.592	3.414	3.216

Nagib terena		Kragujevac		Broj merenja	
od	do	RMSE	STDEV	od	do
0.0	5.0	1.212	1.194	11	
5.0	10.0	1.741	1.736	7	
		1.441	1.429	18	

Nagib terena		Broj merenja		Beograd DTK5	
od	do	RMSE	STDEV	od	do
0	5	1.384	1.296	60	
5.0	10.0	2.317	2.263	9	
10.0	15.0	0.849	0.098	2	
		1.523	1.438	71	

Tabela C-7 : Raspodela grešaka po nagibima terena; greške su dobijene z uporedjenja visina kota digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DMT-ova dobijenih iz DOF5 (Kruševac, Novi Pazar, Valjevo 1,2 i 3, Pančevo i Čačak), DOF5 i ODK5 (Barajevo, Lazarevac, Sopot i Vrčin), TP1 (Kragujevac) i DTK5 projekata (Beograd)





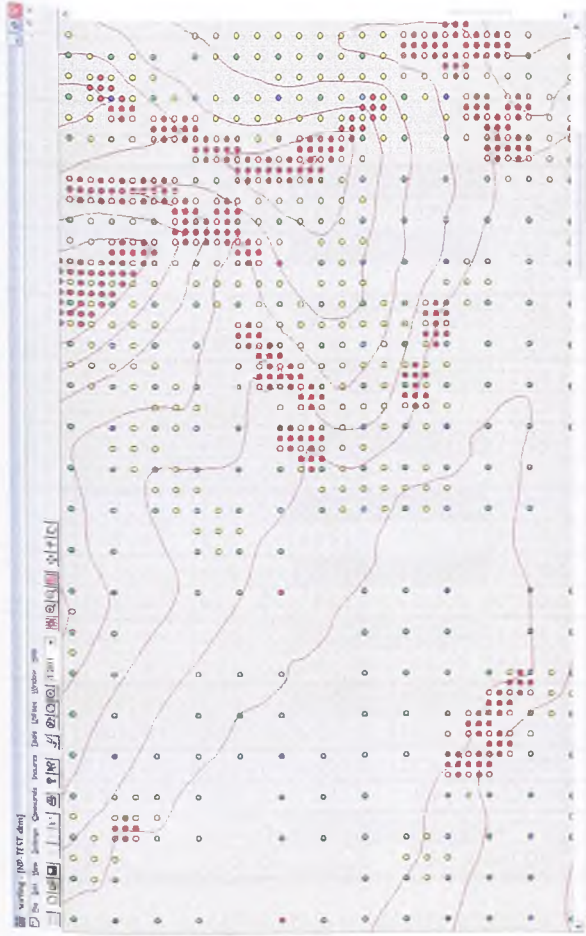
## D. REDUKCIJA PODATAKA

Test podaci	Podaci za formiranje DMT-a i način redukcije podataka	Tip interpolacije	Prosečan nagib terena	Broj tačaka	Srednja kvadratna greška (RMSE) [m]	Standardna devijacija ( $\sigma$ ) [m]	Prosečna greška [m]	Minimalna greška [m]	Maksimalna greška [m]	
Visinske tačke	Grid 10m (194381 visina)	CUBIC	9,363	7485	0,211	0,210	-0,007	-2,062	5,806	
		LINEAR	9,343	7485	0,229	0,228	-0,002	-2,108	5,591	
	Grid 10m + PS 1m (78911 visina)	CUBIC	9,342	7485	0,220	0,220	-0,006	-2,150	5,806	
		LINEAR	9,323	7485	0,247	0,246	-0,005	-2,167	5,591	
	Grid 25m (31170 visina)	CUBIC	9,344	7485	0,377	0,375	0,010	-3,060	4,919	
		LINEAR	9,317	7485	0,494	0,491	0,026	-4,120	4,991	
	Grid 25m + PS 2m (21024 visina)	CUBIC	9,340	7485	0,398	0,396	0,009	-3,054	4,919	
		LINEAR	9,308	7485	0,516	0,512	0,019	-4,120	4,991	
	Grid 25m + PS 2m + DSL (27205 visina)	CUBIC	9,522	7485	0,548	0,420	-0,006	-29,757	5,792	
		LINEAR	9,532	7485	0,611	0,496	0,007	-29,710	5,846	
	Grid 25m + PS 2m + DSL (bez grubih grešaka)	CUBIC	9,513	7483	0,392	0,385	0,000	-8,610	5,792	
		LINEAR	9,524	7483	0,475	0,466	0,013	-9,677	5,846	
Strukturne linije	Grid 10m (194381 visina)	CUBIC	9,995	6517	0,447	0,439	-0,063	-4,153	5,942	
		LINEAR	10,176	6517	0,527	0,515	-0,088	-4,426	5,794	
	Grid 10m + PS 1m (78911 visina)	CUBIC	9,978	6517	0,451	0,443	-0,059	-4,153	5,942	
		LINEAR	10,142	6517	0,530	0,519	-0,089	-4,426	5,794	
	Grid 25m (31170 visina)	CUBIC	9,803	6517	0,933	0,923	-0,115	-7,065	8,927	
		LINEAR	10,040	6517	1,186	1,165	-0,197	-8,052	8,100	
	Grid 25m + PS 2m (21024 visina)	CUBIC	9,816	6517	0,940	0,929	-0,119	-7,065	8,927	
		LINEAR	10,050	6517	1,190	1,168	-0,206	-8,052	8,100	
	Grid 25m + PS 2m + DSL (27205 visina)	CUBIC	11,016	6517	0,723	0,719	-0,054	-9,833	7,561	
		LINEAR	11,106	6517	0,797	0,791	-0,075	-10,373	7,393	
	Grid 25m	Grid 10m (194381 visina)	CUBIC	9,523	28085	0,224	0,223	-0,013	-4,533	5,256
			LINEAR	9,502	28085	0,245	0,244	-0,013	-4,821	5,136
Grid 10m + PS 1m (78911 visina)		CUBIC	9,510	28085	0,231	0,230	-0,011	-4,533	5,256	
		LINEAR	9,485	28085	0,259	0,257	-0,014	-4,821	5,136	
Grid 25m (31170 visina)		CUBIC	9,053	28085	0,252	0,252	-0,012	-4,430	5,002	
		LINEAR	9,323	28085	0,297	0,296	-0,013	-5,007	4,963	
Grid 25m + PS 2m (21024 visina)		CUBIC	9,072	28085	0,279	0,279	-0,012	-4,429	5,002	
		LINEAR	9,316	28085	0,331	0,330	-0,020	-5,007	4,963	
Grid 25m + PS 2m + DSL (27205 visina)		CUBIC	9,481	28085	0,421	0,415	-0,019	-20,917	5,766	
		LINEAR	9,579	28085	0,450	0,440	-0,020	-20,869	5,765	
Grid 25m + PS 2m + DSL (bez grubih grešaka)		CUBIC	9,472	28074	0,308	0,307	-0,014	-8,913	5,766	
		LINEAR	9,572	28074	0,335	0,334	-0,014	-8,956	5,765	

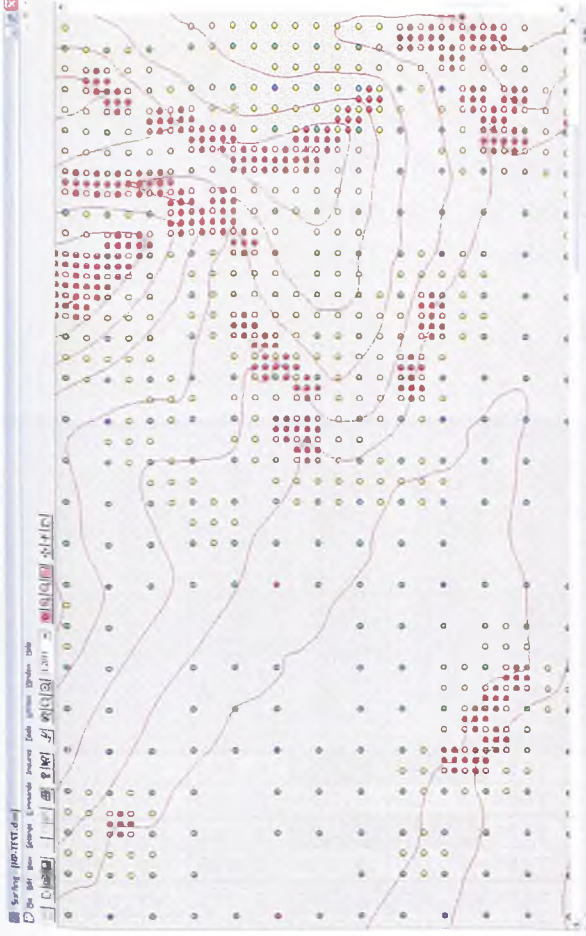
Tabela D-1: Statistički pokazatelji gubitka tačnosti DMT-a zbog prelaska na grid (uniformni ili promenljivi)



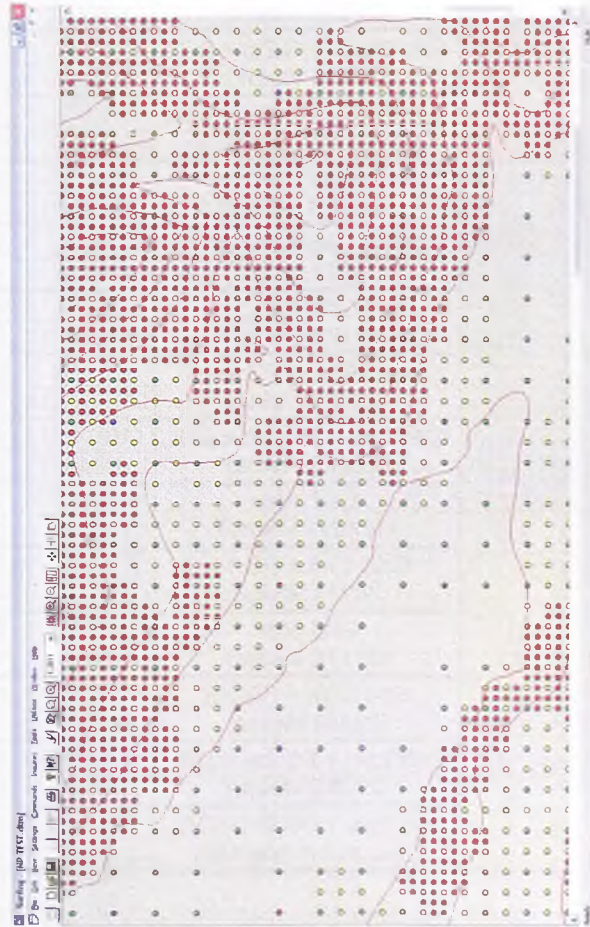
Redukcija podataka



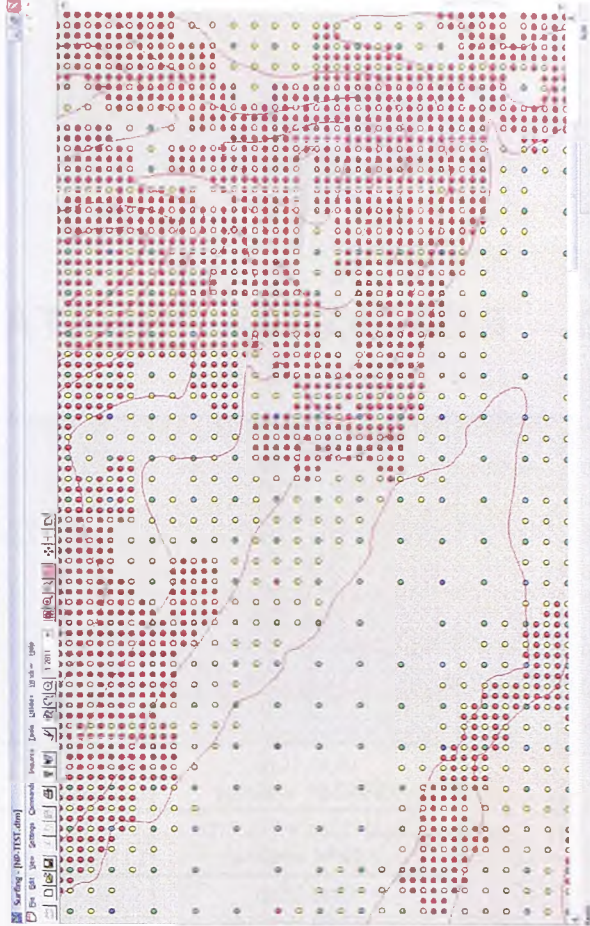
a) Četiri profila, forma kvadratnog stabla



b) Četiri profila, forma restriktivnog kvadratnog stabla



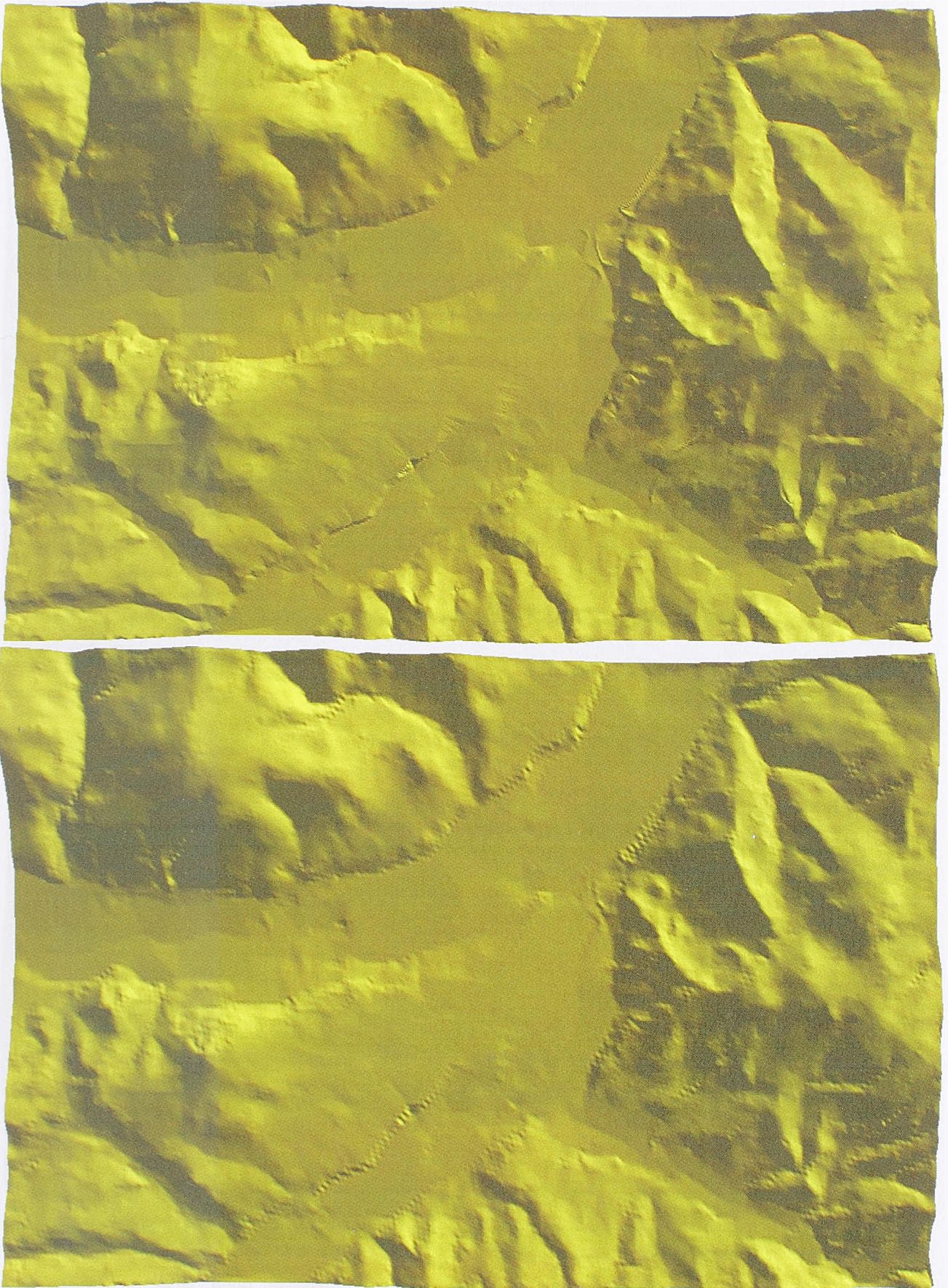
c) Bilinearna površ, forma kvadratnog stabla



d) Bilinearna površ, forma restriktivnog kvadratnog stabla

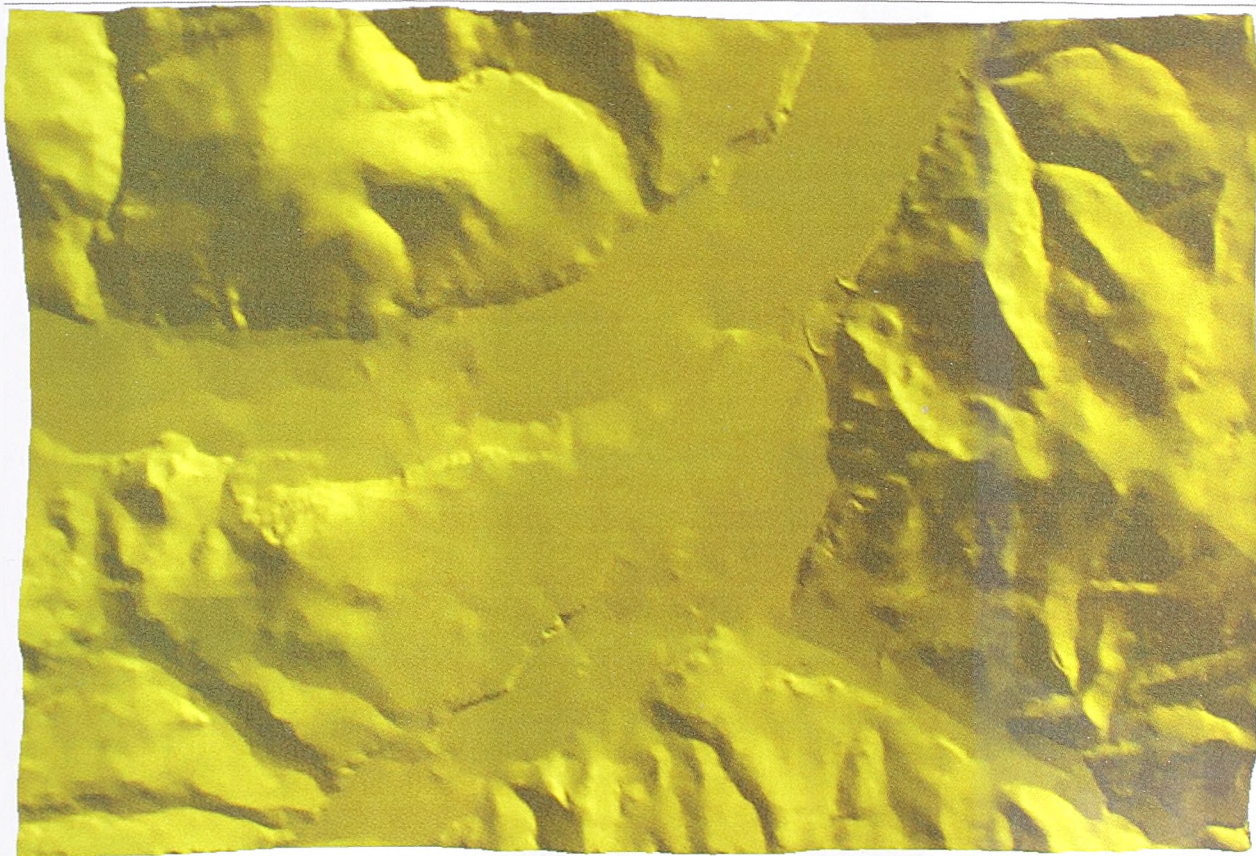
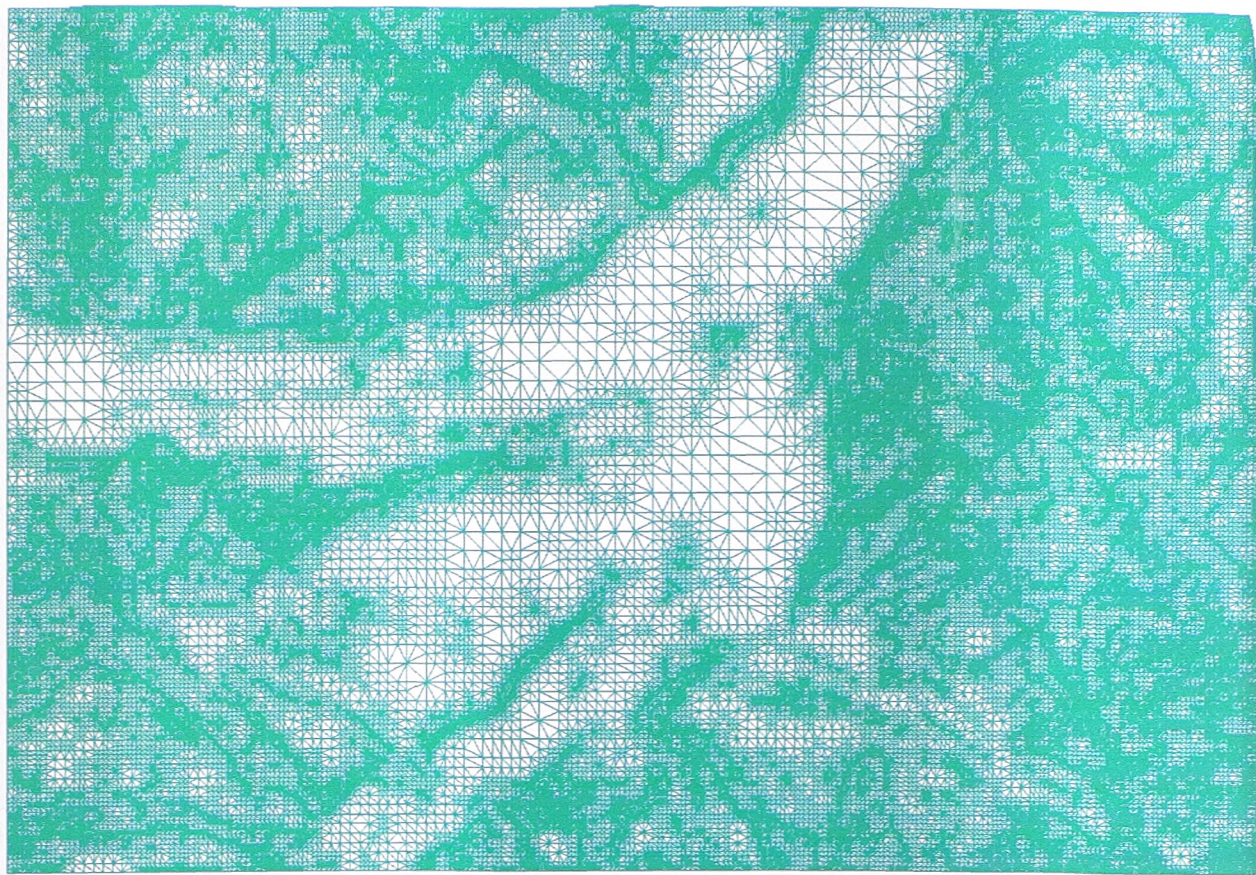
Slika D-1 : Rezultati algoritama za formiranje promerljivojivog grida na osnovu polaznog regularnog grida





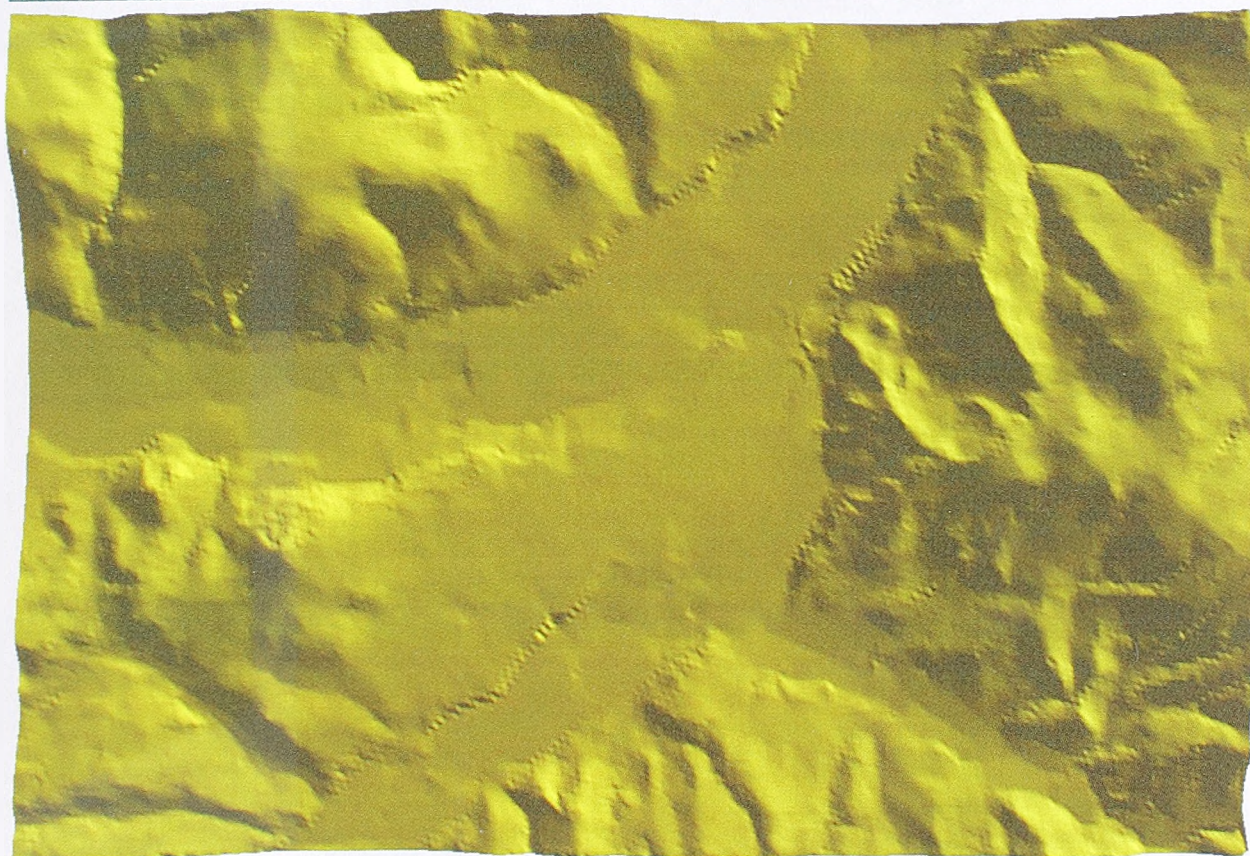
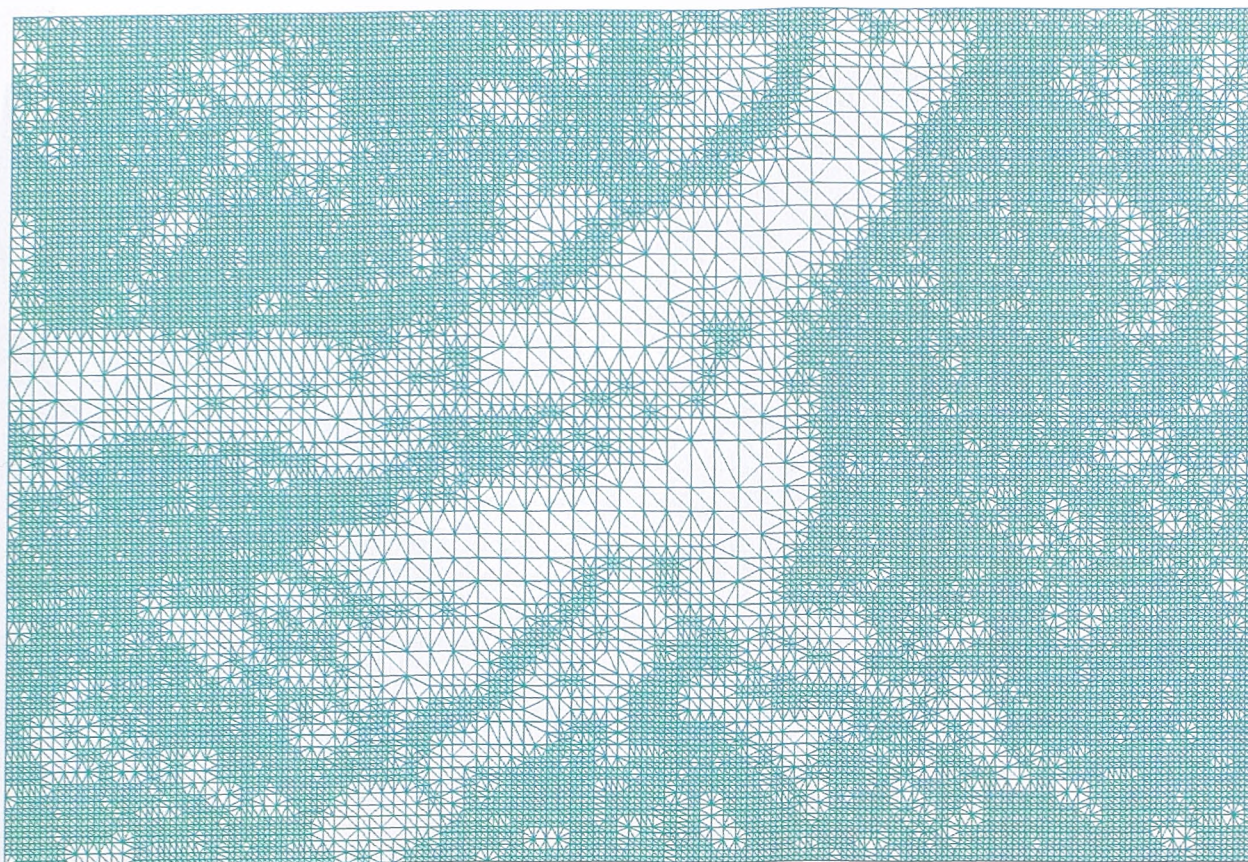
Slika D-2 : TIN DMT formiran na osnovu tačaka pravilnog grida; gore - grid 10m, 194381 visina; dole – grid 25m, 31170 visina





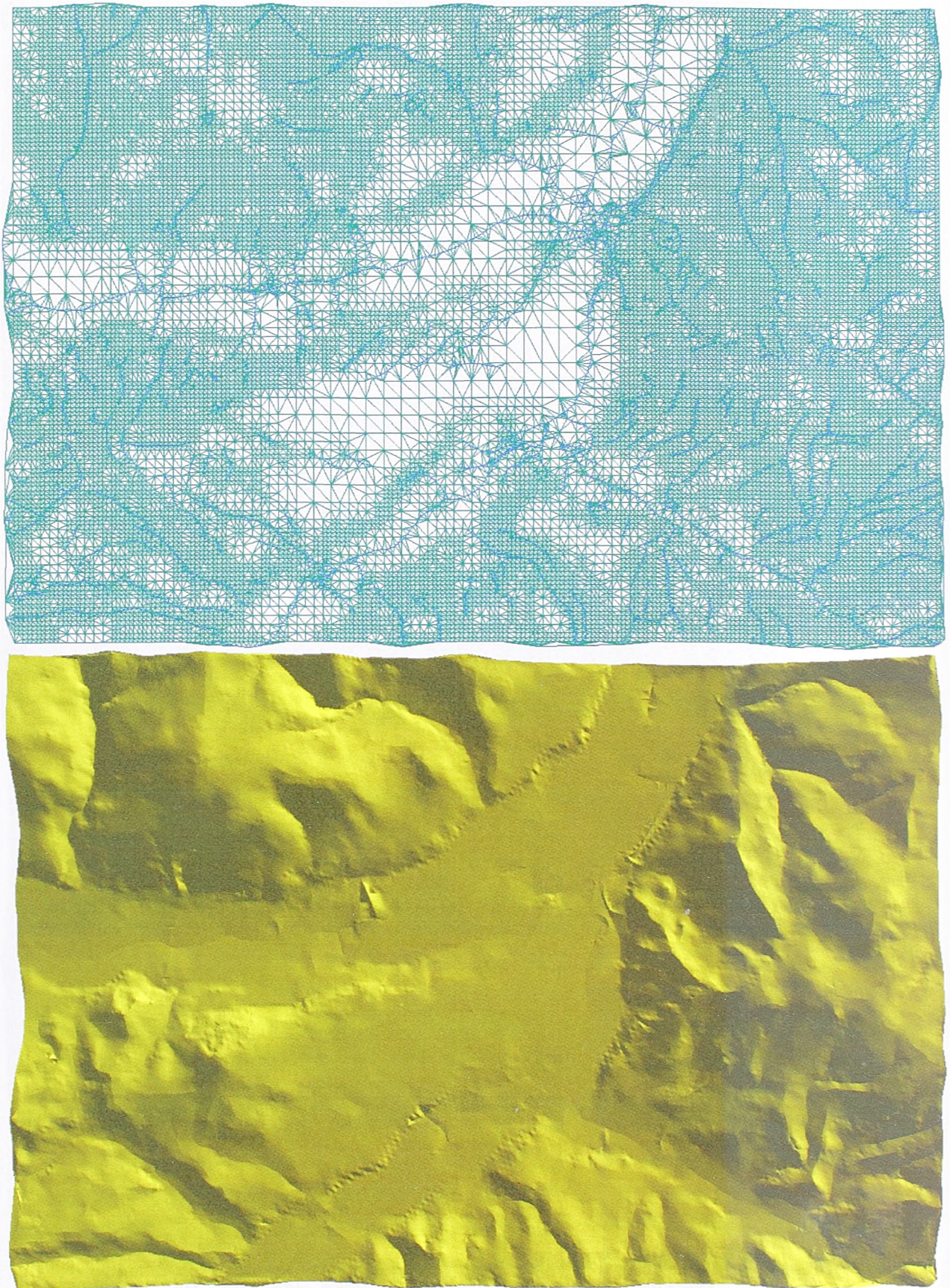
Slika D-3 : TIN DMT formiran na osnovu tačaka promenljivog grida; tačke su dobijene redukcijom broja tačaka pravilnog grida (Slika D-2, gore); parametri obrade: minimalna veličina polaznog grida 10m, maksimalno rastojanje 32x10m, 4 profila, prag za eliminaciju visine 1m, 78911 visina





Slika D-4 : TIN DMT formiran na osnovu tačaka promenljivog grida; tačke su dobijene redukcijom broja tačaka pravilnog grida (Slika D-2, dole); parametri obrade: minimalna veličina grida 25m, maksimalno rastojanje 32x10m, 4 profila, prag za eliminaciju visine 2m, 21024 visina





Slika D-5 : TIN DMT formiran na osnovu tačaka promenljivog grida; tačke su dobijene redukcijom broja tačaka pravilnog grida (Slika D-2, dole); parametri obrade minimalna veličina grida 25m, maksimalno rastojanje 32x10m, 4 profila, prag za eliminaciju visine 2m, sa detektovanim strukturnim linijama, 27205 visina



## E. EKSPERIMENTALNA OCENA KVALITETA DMT25 FORMIRANOG PO PREDLOŽENOJ METODOLOGIJI

Kvalitet DMT-a koji bi se formirao po predloženoj metodologiji, tj. na osnovu podataka digitalizacije TK25 i primenom razvijenih numeričkih postupaka i softvera (DMT25) ocenjivan je korišćenjem podataka:

- prikupljenih u okviru projekata izrade digitalnog ortofotoa razmere 1:5000 (DOF5);
- dobijenih digitalizacijom visinske predstave sa ODK 1:5000 (ODK5) i verifikovanih na digitalnim fotogrametrijskim radnim stanicama za potrebe izrade DOF5;
- prikupljenih u okviru projekata izrade digitalne topografske karte razmere 1:5000 (DTK5) za deo teritorije grada Beograda;
- prikupljenih u okviru topografskog premera (TP1) 1:1000 grada Kragujevca;
- za tačke gradskih poligonskih mreža (PM) Beograda i Kruševca.

Visine iz ovih izvora podataka su upoređivane sa visinama interpolovanim iz DMT-a formiranog na osnovu podataka digitalizacije TK25 u datim tačkama. U ovom dodatku dati su tabelarno i preko detaljnih izveštaja rezultati tog upoređenja sa odgovarajućim statističkim pokazateljima.

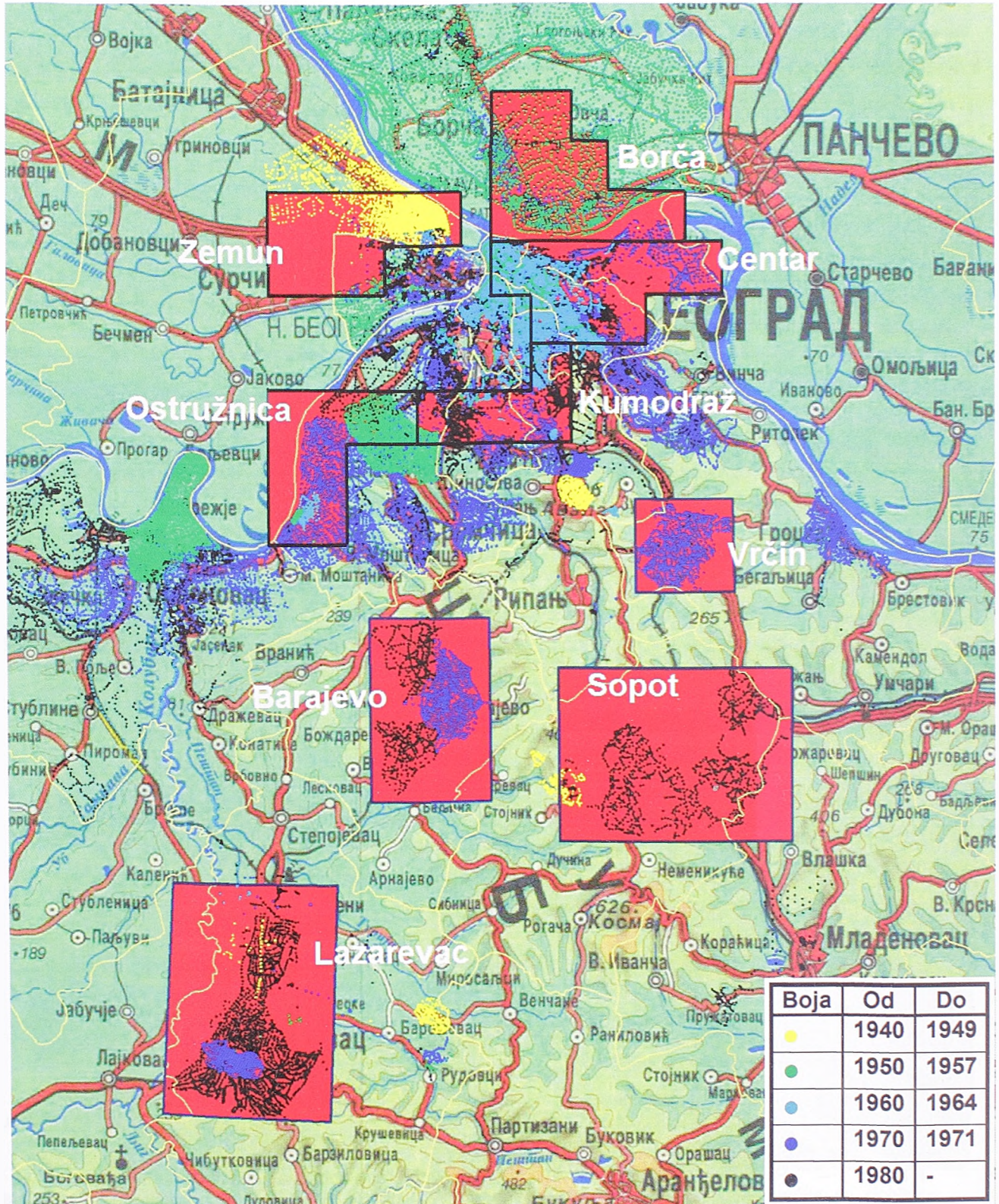
### KORIŠĆENE OZNAKE ZA PARAMETRE PROCESIRANJA:

CFDT	–	Konformna Delaunay-jeva triangulacija.
MCS	–	Maksimalna dužina segmenta izohipse u [m]. Tokom triangulacije ubacuju se nove tačke duž izohipsi da bi se ovo ostvarilo.
DL	–	Korišćeni algoritam za automatsku detekciju strukturnih linija: <ul style="list-style-type: none"><li>ME – središnje tačke linija koje povezuju sredine stranica TIN-a između tačaka iste izohipse,</li><li>GC – osrednjena težišta trouglova,</li><li>CC – centri opisanih kružnica trouglova,</li><li>EM – središnje tačke stranica TIN-a između tačaka iste izohipse,</li><li>VS – srednje ose na osnovu Voronoi skeleta.</li></ul>
LB	–	Tretiranje automatski detektovanih strukturnih linija terena kao prelomnih linija.
LIH	–	Preračunavanje visina za tačke detektovanih strukturnih linija korišćenjem linearne interpolacije između izohipsi.
LINK	–	Povezivanje detektovanih strukturnih linija, tj. produženje detektovane linije do preseka sa izohipsom nagore i nadole.
MaxSDV	–	Prag za interpolaciju visina za tačke detektovanih strukturnih linija u [m]. Ako je odstupanje kubne od linearne površi (SDV) za neki trougao manje od zadate vrednosti koristi se kubna interpolacija. U suprotnom, koristi se linearna interpolacija.
SPLINE	–	Splajnovanje detektovane strukturne primenom B-splajn interpolanta trećeg stepana sa aproksimacijom po metodi najmanjih kvadrata. Vrednost u tabeli predstavlja rastojanje između susednih tačaka na strukturnoj liniji u [m].
RTSDV	–	Profinjavanje TIN-a u delovima gde se površ terena dobijena po kubnoj interpolaciji razlikuje od površi dobijene korišćenjem linearne interpolacije (SDV) više od specificiranog praga. Ova vrednost je u u tabelama u [m].
ITER	–	Maksimalan broj iteracija kod profinjavanja TIN-a.
KOTE	–	Kod formiranja DMT-a pored izohipsi korišćene su i digitalizovane karte sa TK25.



## E.1 Prikaz test područja i raspoloživih podataka

**NAPOMENA** : Prikaz test područja za koja su formirani digitalni modeli terena dat je u poglavlju C.4 (Slika C-2).



Slika E-1 : Prikaz tačaka poligonskih mreža grada Beograda koje su korišćene za ocenu kvaliteta DMT25



## E.2 Upoređenje visina interpolovanih iz DMT25 i visina dobijenih iz DOF5, TP1, ODK5 i PM

**NAPOMENA :** Kod izbacivanja grubih grešaka za sva test područja primenjen je isti princip da se za prag grubih grešaka usvaja trostruka vrednost srednje kvadratne greške dobijene za najveći nagib terena, pod uslovom da je ta greška određena sa dovoljnim brojem tačaka.

### E.2.1 Detaljni izveštaji sa statističkim pokazateljima

Barajevo							
PM - poligonska mreža grada Beograda							
DMT25 - CFDT=da, MCS=10m, DL=VS, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10m, SPLINE=ne, RTSDV=5m, ITER=5, KOTE=ne							
CUBIC interpolation statistics							
Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum	
6.105	1221	2.445	2.348	0.558	-16.789	11.579	
-----							
0.0	5.0	588	2.085	2.056	0.345	-16.789	8.239
5.0	10.0	481	2.461	2.397	0.559	-7.731	11.579
10.0	15.0	101	3.054	2.896	0.966	-10.706	9.174
15.0	20.0	30	3.993	3.397	2.063	-3.025	11.404
20.0	25.0	12	4.655	3.951	2.356	-3.590	7.842
25.0	30.0	3	6.817	6.584	1.442	-6.144	5.661
30.0	35.0	5	4.440	3.447	2.503	-2.061	7.553
35.0	40.0	1	-	-	5.113	5.113	5.113
LINEAR REGRESSION							
	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr	
RMSE	1.775	0.007	5.903	0.054		0.155	
STDEV	1.835	0.007	4.612	0.052		0.150	
LINEAR interpolation statistics							
Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum	
5.997	1221	2.481	2.350	0.659	-16.760	11.806	
-----							
0.0	5.0	588	2.106	2.062	0.427	-16.760	7.935
5.0	10.0	481	2.501	2.417	0.643	-7.287	11.806
10.0	15.0	101	3.012	2.775	1.165	-9.802	9.348
15.0	20.0	30	4.196	3.531	2.229	-3.198	11.386
20.0	25.0	12	5.092	4.149	2.826	-3.080	8.633
25.0	30.0	3	6.444	6.153	1.564	-5.540	5.188
30.0	35.0	5	4.608	2.919	3.189	-0.502	7.568
35.0	40.0	1	-	-	5.843	5.843	5.843
LINEAR REGRESSION							
	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr	
RMSE	1.780	0.008	6.153	0.058		0.166	
STDEV	1.860	0.008	4.404	0.057		0.164	
ERROR DISTRIBUTION							
Range		CUBIC		LINEAR			
		NE.pts	%	NE.pts	%		
0.0m	- 1.0m	556	45.5%	547	44.8%		
1.0m	- 2.0m	305	25.0%	322	26.4%		
2.0m	- 5.0m	302	24.7%	288	23.6%		
5.0m	- 10.0m	52	4.3%	58	4.8%		
10.0m	- 15.0m	5	0.4%	5	0.4%		
15.0m	- 16.8m	1	0.1%	1	0.1%		

Izveštaj E-1: Upoređenje visina iz DMT25 i visina tačaka poligonske mreže grada Beograda za područje Barajevo



**Barajevo**

**DOF5 - visinske tačke**

**DMT25 - CFDT=da, MCS=10m, DL=VS, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10m, SPLINE=ne, RTSDV=5m, ITER=5, KOTE=ne, odstranjene grube greške preko 20m**

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
7.408	8147	4.486	4.439	-0.429	-19.793	19.553
-----						
0.0 5.0	3801	3.686	3.617	-0.710	-19.793	18.316
5.0 10.0	2284	4.324	4.293	-0.523	-19.769	19.162
10.0 15.0	1050	5.298	5.291	0.289	-19.444	18.544
15.0 20.0	531	6.064	6.027	0.669	-17.986	18.741
20.0 25.0	289	6.392	6.329	-0.894	-17.585	19.553
25.0 30.0	98	6.577	6.547	-0.632	-12.878	14.615
30.0 35.0	49	7.182	7.158	-0.573	-17.836	16.180
35.0 40.0	19	6.949	6.814	1.325	-17.626	15.758
40.0 45.0	13	6.710	5.976	2.933	-9.235	11.510
45.0 50.0	2	13.903	13.709	-1.636	-11.330	8.058
50.0 55.0	3	9.869	5.259	6.818	1.239	11.685
55.0 60.0	6	9.410	9.268	1.484	-15.283	12.504
60.0 65.0	1	-	-	1.471	1.471	1.471
70.0 75.0	1	-	-	1.496	1.496	1.496

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	3.490	0.004	6.677	0.023	0.278	
STDEV	3.453	0.005	6.583	0.028	0.326	

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
6.914	8147	4.558	4.492	-0.557	-21.330	19.117
-----						
0.0 5.0	3801	3.769	3.660	-0.899	-20.530	18.075
5.0 10.0	2284	4.465	4.416	-0.657	-21.330	19.059
10.0 15.0	1050	5.307	5.300	0.265	-18.940	18.501
15.0 20.0	531	6.025	5.985	0.692	-17.465	18.638
20.0 25.0	289	6.330	6.272	-0.852	-16.451	19.117
25.0 30.0	98	6.682	6.645	-0.703	-15.710	14.174
30.0 35.0	49	7.415	7.384	-0.670	-17.789	16.274
35.0 40.0	19	7.030	6.946	1.059	-17.467	15.744
40.0 45.0	13	6.793	6.053	2.962	-9.236	11.522
45.0 50.0	2	16.363	15.797	-3.016	-14.186	8.155
50.0 55.0	3	9.444	5.287	6.389	1.140	11.713
55.0 60.0	6	10.765	10.715	0.939	-18.920	12.707
60.0 65.0	1	-	-	1.270	1.270	1.270
70.0 75.0	1	-	-	1.379	1.379	1.379

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	3.581	0.004	6.589	0.021	0.247	
STDEV	3.505	0.005	6.611	0.026	0.303	

ERROR DISTRIBUTION

Range	CUBIC		LINEAR	
	No. pts	%	No. pts	%
0.0m - 1.0m	2178	26.7%	2111	25.9%
1.0m - 2.0m	1734	21.3%	1772	21.8%
2.0m - 5.0m	2777	34.1%	2777	34.1%
5.0m - 10.0m	1089	13.4%	1096	13.5%
10.0m - 15.0m	244	3.0%	258	3.2%
15.0m - 20.0m	125	1.5%	127	1.6%
20.0m - 21.3m	0	0.0%	6	0.1%

Izveštaj E-2: Upoređenje visina iz DMT25 i visina visinskih tačaka iz DOF5 za područje Barajevo

**Barajevo**

**ODK5 - izohipse**

**DMT25 - CFDT=da, MCS=10m, DL=VS, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10m, SPLINE=ne, RTSDV=5m, ITER=5, KOTE=ne, odstranjene grube greške preko 20m**

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum	
8.989	303428	3.680	3.646	-0.399	-19.996	19.996	
0.0	5.0	82717	3.646	3.564	-0.769	-19.996	19.738
5.0	10.0	126098	3.587	3.565	-0.399	-19.995	19.953
10.0	15.0	50334	3.588	3.583	-0.198	-19.935	19.996
15.0	20.0	24544	3.793	3.792	-0.088	-19.722	17.810
20.0	25.0	11556	4.024	4.024	0.013	-19.423	15.601
25.0	30.0	4847	4.484	4.469	0.363	-19.167	16.540
30.0	35.0	2052	5.207	5.146	0.793	-17.781	16.719
35.0	40.0	793	5.831	5.673	1.346	-12.718	15.796
40.0	45.0	277	5.777	5.591	1.452	-14.170	15.088
45.0	50.0	88	6.337	6.130	1.597	-18.344	17.407
50.0	55.0	56	7.187	7.110	1.042	-12.501	13.462
55.0	60.0	35	7.471	7.424	-0.817	-18.068	11.920
60.0	65.0	12	9.436	8.811	-3.233	-17.066	9.425
65.0	70.0	10	9.263	6.928	-5.834	-14.366	5.764
70.0	75.0	2	11.166	7.157	-6.060	-11.121	-0.999
75.0	80.0	5	9.690	5.740	-6.983	-12.846	0.708
80.0	85.0	1	-	-	-2.202	-2.202	-2.202
85.0	90.0	1	-	-	3.631	3.631	3.631

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	3.425	0.000	1.536	0.002		0.160
STDEV	3.375	0.000	1.633	0.002		0.135

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum	
8.750	303428	3.704	3.672	-0.372	-23.010	20.634	
0.0	5.0	82717	3.722	3.643	-0.764	-20.493	19.644
5.0	10.0	126098	3.627	3.608	-0.366	-23.010	20.634
10.0	15.0	50334	3.562	3.558	-0.160	-20.622	17.660
15.0	20.0	24544	3.736	3.736	-0.062	-20.381	17.529
20.0	25.0	11556	3.967	3.967	0.053	-20.000	15.921
25.0	30.0	4847	4.438	4.418	0.418	-19.416	16.285
30.0	35.0	2052	5.117	5.043	0.866	-17.071	17.059
35.0	40.0	793	5.749	5.574	1.406	-15.000	15.986
40.0	45.0	277	5.868	5.705	1.370	-16.356	15.615
45.0	50.0	88	6.371	6.177	1.551	-18.518	16.946
50.0	55.0	56	7.576	7.536	0.771	-15.000	13.922
55.0	60.0	35	7.248	7.194	-0.867	-17.679	11.803
60.0	65.0	12	10.308	9.543	-3.732	-17.926	9.429
65.0	70.0	10	10.176	7.805	-6.195	-15.000	5.125
70.0	75.0	2	12.088	5.996	-7.422	-11.662	-3.182
75.0	80.0	5	11.217	6.955	-7.871	-15.000	0.000
80.0	85.0	1	-	-	-3.912	-3.912	-3.912
85.0	90.0	1	-	-	3.820	3.820	3.820

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	3.499	0.001	1.230	0.003		0.182
STDEV	3.454	0.000	1.311	0.002		0.155

ERROR DISTRIBUTION

Range	CUBIC		LINEAR	
	NE.pts	%	NE.pts	%
0.0m - 1.0m	105731	34.8%	107590	35.5%
1.0m - 2.0m	72152	23.8%	70858	23.4%
2.0m - 5.0m	90387	29.8%	90156	29.7%
5.0m - 10.0m	26456	8.7%	26138	8.6%
10.0m - 15.0m	5945	2.0%	5901	1.9%
15.0m - 20.0m	2757	0.9%	2698	0.9%
20.0m - 23.0m	0	0.0%	87	0.0%



Čačak

DOF5 - visinske linije

DMT25 - CFDT=ne, MCS=10m, DL=VS, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10m, SPLINE=ne, RTSDV=5m, ITER=5, KOTE=da, odstranjene grube greške preko 20m

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
8.164	32950	4.513	4.226	-1.526	-19.945	19.969
-----						
0.0 5.0	16232	3.337	3.098	-1.241	-19.304	19.705
5.0 10.0	5343	3.997	3.743	-1.403	-19.945	19.578
10.0 15.0	4203	5.248	5.004	-1.580	-19.932	19.913
15.0 20.0	3112	6.064	5.718	-2.019	-19.935	19.711
20.0 25.0	1936	6.335	5.833	-2.472	-19.596	19.348
25.0 30.0	1172	6.564	6.104	-2.414	-19.639	19.969
30.0 35.0	606	6.951	6.469	-2.541	-19.057	18.703
35.0 40.0	182	7.225	6.872	-2.232	-19.581	18.817
40.0 45.0	82	7.020	6.997	-0.635	-17.454	14.427
45.0 50.0	49	7.398	7.345	-0.952	-15.273	12.662
50.0 55.0	29	6.484	6.346	-1.401	-15.018	15.464
55.0 60.0	1	-	-	1.686	1.686	1.686
60.0 65.0	1	-	-	-15.404	-15.404	-15.404
65.0 70.0	1	-	-	-8.028	-8.028	-8.028
70.0 75.0	1	-	-	4.879	4.879	4.879

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr
RMSE	3.204	0.003	6.911	0.014
STDEV	2.982	0.003	6.558	0.013

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
8.138	32950	4.531	4.237	-1.549	-20.097	19.841
-----						
0.0 5.0	16232	3.350	3.107	-1.253	-19.011	19.620
5.0 10.0	5343	4.042	3.779	-1.436	-19.754	19.339
10.0 15.0	4203	5.291	5.036	-1.624	-20.040	19.550
15.0 20.0	3112	6.077	5.718	-2.059	-20.097	19.189
20.0 25.0	1936	6.342	5.826	-2.506	-19.779	18.814
25.0 30.0	1172	6.543	6.085	-2.407	-18.988	19.841
30.0 35.0	606	6.942	6.467	-2.523	-20.042	18.515
35.0 40.0	182	7.199	6.844	-2.237	-19.262	18.532
40.0 45.0	82	7.011	6.990	-0.611	-17.201	14.185
45.0 50.0	49	7.313	7.242	-1.076	-14.844	11.900
50.0 55.0	29	6.342	6.160	-1.564	-14.510	14.954
55.0 60.0	1	-	-	0.757	0.757	0.757
60.0 65.0	1	-	-	-14.956	-14.956	-14.956
65.0 70.0	1	-	-	-7.476	-7.476	-7.476
70.0 75.0	1	-	-	4.853	4.853	4.853

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr
RMSE	3.230	0.003	6.871	0.014
STDEV	3.002	0.003	6.513	0.014

ERROR DISTRIBUTION

Range	CUBIC		LINEAR	
	NE.pts	%	NE.pts	%
0.0m - 1.0m	7857	23.8%	7802	23.7%
1.0m - 2.0m	6879	20.9%	6825	20.7%
2.0m - 5.0m	11600	35.2%	11651	35.4%
5.0m - 10.0m	5136	15.6%	5185	15.7%
10.0m - 15.0m	1080	3.3%	1091	3.3%
15.0m - 20.0m	398	1.2%	392	1.2%
20.0m - 20.1m	0	0.0%	4	0.0%

Izveštaj E-4: Upoređenje visina iz DMT25 i visina tačaka visinskih linija dobijenih iz DOF5 za područje Čačka

Čačak

DOF5 - visinske tačke

DMT25 - CFDT=ne, MCS=10m, DL=VS, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10m, SPLINE=ne, RTSDV=5m, ITER=5, KOTE=da, odstranjene grube greške preko 30m

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum	
7.863	82003	3.710	3.644	-0.637	-29.949	29.644	
0.0	5.0	35766	1.704	1.652	-0.423	-22.462	27.956
5.0	10.0	20917	2.901	2.784	-0.813	-23.346	23.602
10.0	15.0	12306	3.981	3.867	-0.947	-28.709	24.112
15.0	20.0	6234	5.755	5.688	-0.877	-29.949	29.604
20.0	25.0	3377	7.175	7.130	-0.798	-29.715	29.340
25.0	30.0	1787	8.202	8.193	-0.401	-29.778	29.598
30.0	35.0	832	9.106	9.106	0.110	-29.931	29.644
35.0	40.0	411	10.067	10.068	0.107	-27.324	28.961
40.0	45.0	191	10.212	10.201	0.521	-25.683	26.083
45.0	50.0	111	10.085	10.085	0.305	-26.885	21.977
50.0	55.0	40	12.036	12.041	0.366	-20.836	24.138
55.0	60.0	14	15.397	15.341	1.566	-21.431	29.385
60.0	65.0	12	12.785	12.078	4.168	-17.832	25.468
65.0	70.0	3	22.975	7.521	17.839	9.636	22.179
70.0	75.0	1	-	-	2.296	2.296	2.296
75.0	80.0	1	-	-	15.841	15.841	15.841

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr
RMSE	1.261	0.002	12.531	0.009
STDEV	1.189	0.002	12.492	0.010

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum	
7.825	82003	3.683	3.620	-0.616	-29.843	30.234	
0.0	5.0	35766	1.705	1.653	-0.419	-22.013	27.974
5.0	10.0	20917	2.878	2.770	-0.780	-23.257	23.565
10.0	15.0	12306	3.944	3.836	-0.920	-28.289	24.313
15.0	20.0	6234	5.705	5.642	-0.848	-29.843	29.405
20.0	25.0	3377	7.113	7.074	-0.747	-29.428	29.136
25.0	30.0	1787	8.130	8.123	-0.358	-29.358	29.559
30.0	35.0	832	9.050	9.049	0.167	-29.693	29.280
35.0	40.0	411	10.014	10.013	0.192	-27.325	30.234
40.0	45.0	191	10.132	10.118	0.577	-25.453	26.259
45.0	50.0	111	10.064	10.062	0.365	-27.014	21.629
50.0	55.0	40	12.056	12.060	0.400	-20.440	23.640
55.0	60.0	14	15.466	15.423	1.441	-21.103	29.935
60.0	65.0	12	13.036	12.341	4.178	-19.254	25.653
65.0	70.0	3	23.042	7.316	17.955	10.021	22.293
70.0	75.0	1	-	-	3.111	3.111	3.111
75.0	80.0	1	-	-	12.615	12.615	12.615

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr
RMSE	1.260	0.002	12.411	0.009
STDEV	1.191	0.002	12.375	0.009

ERROR DISTRIBUTION

Range	CUBIC		LINEAR	
	NE.pts	%	NE.pts	%
0.0m - 1.0m	32292	39.4%	32260	39.3%
1.0m - 2.0m	18624	22.7%	18721	22.8%
2.0m - 5.0m	21686	26.4%	21813	26.6%
5.0m - 10.0m	7254	8.8%	7116	8.7%
10.0m - 15.0m	1377	1.7%	1335	1.6%
15.0m - 20.0m	485	0.6%	476	0.6%
20.0m - 25.0m	211	0.3%	210	0.3%
25.0m - 30.0m	74	0.1%	71	0.1%
30.0m - 30.2m	0	0.0%	1	0.0%

Izveštaj E-5: Upoređenje visina iz DMT25 i visina visinskih tačaka dobijenih iz DOF5 za područje Čačka (Slika E-9)



Kragujevac

TP1 - izohipse

DMT25 - CFDT=da, MCS=10m, DL=VS, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10m, SPLINE=ne, RTSDV=5m, ITER=5, KOTE=da

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
7.242	1281627	2.263	2.251	0.123	-34.719	31.949
-----						
0.0	5.0	513807	1.832	1.830	-0.085	-34.719
5.0	10.0	452278	2.124	2.114	0.206	-20.229
10.0	15.0	209136	2.582	2.569	0.262	-19.991
15.0	20.0	70518	3.299	3.263	0.484	-14.817
20.0	25.0	24124	3.972	3.895	0.779	-16.140
25.0	30.0	7754	4.417	4.400	0.383	-17.034
30.0	35.0	2297	5.153	5.070	-0.923	-18.001
35.0	40.0	1042	5.422	5.396	-0.532	-18.655
40.0	45.0	328	4.905	4.899	0.225	-17.051
45.0	50.0	208	4.686	4.681	0.217	-15.644
50.0	55.0	109	4.509	4.417	-0.905	-15.059
55.0	60.0	16	5.972	5.078	-3.043	-11.946
60.0	65.0	6	10.016	4.092	-8.345	-11.699
65.0	70.0	2	4.360	4.053	1.137	-1.729
70.0	75.0	2	5.349	2.057	-3.491	-4.946

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	1.549	0.000	5.013	0.001	0.112	
STDEV	1.554	0.000	4.900	0.001	0.110	

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
7.167	1281627	2.251	2.236	0.169	-34.681	31.832
-----						
0.0	5.0	513807	1.836	1.836	-0.032	-34.681
5.0	10.0	452278	2.122	2.108	0.242	-20.162
10.0	15.0	209136	2.552	2.533	0.310	-19.760
15.0	20.0	70518	3.253	3.208	0.537	-14.603
20.0	25.0	24124	3.911	3.820	0.840	-15.866
25.0	30.0	7754	4.348	4.325	0.448	-16.114
30.0	35.0	2297	5.072	4.999	-0.854	-17.573
35.0	40.0	1042	5.369	5.350	-0.454	-18.041
40.0	45.0	328	4.851	4.843	0.267	-16.923
45.0	50.0	208	4.604	4.589	0.361	-15.492
50.0	55.0	109	4.621	4.569	-0.688	-14.671
55.0	60.0	16	6.119	5.251	-3.041	-11.646
60.0	65.0	6	10.124	3.604	-8.637	-11.775
65.0	70.0	2	5.002	4.952	0.502	-3.000
70.0	75.0	2	5.808	2.445	-3.725	-5.454

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	1.562	0.000	4.848	0.001	0.108	
STDEV	1.568	0.000	4.703	0.001	0.107	

ERROR DISTRIBUTION

Range	CUBIC		LINEAR	
	NE.pts	%	NE.pts	%
0.0m - 1.0m	556927	43.5%	557100	43.5%
1.0m - 2.0m	360926	28.2%	362926	28.3%
2.0m - 5.0m	313088	24.4%	312230	24.4%
5.0m - 10.0m	47269	3.7%	46040	3.6%
10.0m - 15.0m	2908	0.2%	2870	0.2%
15.0m - 20.0m	432	0.0%	388	0.0%
20.0m - 25.0m	65	0.0%	61	0.0%
25.0m - 30.0m	0	0.0%	0	0.0%
30.0m - 34.7m	12	0.0%	12	0.0%

Izveštaj E-6: Upoređenje visina iz DMT25 i visina tačaka izohipsi dobijenih iz TP1 za područje Kragujevca

Kragujevac

TP1 - visinske linije

DMT25 - CFDT=da, MCS=10m, DL=VS, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10m, SPLINE=ne, RTSDV=5m, ITER=5, KOTE=da

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum	
5.002	71805	2.400	2.352	-0.427	-18.611	18.321	
0.0	5.0	41280	2.094	2.009	-0.590	-17.368	18.321
5.0	10.0	21928	2.457	2.444	-0.248	-18.611	18.284
10.0	15.0	6170	3.272	3.270	-0.120	-14.236	13.900
15.0	20.0	1740	3.517	3.515	-0.087	-12.125	15.487
20.0	25.0	457	4.197	4.195	-0.121	-13.071	11.140
25.0	30.0	134	4.079	4.079	0.051	-9.828	12.863
30.0	35.0	49	4.971	4.881	0.934	-7.927	16.108
35.0	40.0	26	4.436	4.198	-1.408	-10.014	8.081
40.0	45.0	10	4.833	4.578	-1.469	-8.944	4.491
45.0	50.0	3	6.344	1.718	4.986	3.136	6.530
50.0	55.0	4	8.566	5.155	5.925	-0.394	10.151
55.0	60.0	2	8.945	0.688	6.306	5.820	6.793
60.0	65.0	2	14.664	3.895	9.996	7.242	12.751

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	1.841	0.001	5.384	0.005	0.101	
STDEV	1.772	0.001	5.544	0.006	0.131	

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum	
4.964	71805	2.392	2.347	-0.409	-18.850	18.229	
0.0	5.0	41280	2.099	2.017	-0.580	-17.192	18.229
5.0	10.0	21928	2.444	2.435	-0.217	-18.850	17.965
10.0	15.0	6170	3.233	3.232	-0.100	-13.951	14.261
15.0	20.0	1740	3.469	3.469	-0.048	-11.790	15.226
20.0	25.0	457	4.208	4.207	-0.092	-13.007	11.084
25.0	30.0	134	3.973	3.972	0.074	-9.646	9.000
30.0	35.0	49	4.922	4.827	0.957	-7.872	16.145
35.0	40.0	26	4.508	4.262	-1.438	-9.902	7.902
40.0	45.0	10	4.992	4.836	-1.176	-8.650	5.165
45.0	50.0	3	6.152	2.016	4.745	2.947	6.925
50.0	55.0	4	8.298	5.303	5.527	-0.826	9.924
55.0	60.0	2	8.856	0.371	6.257	5.994	6.519
60.0	65.0	2	14.536	3.222	10.023	7.745	12.301

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	1.852	0.001	5.214	0.005	0.098	
STDEV	1.786	0.001	5.369	0.006	0.127	

ERROR DISTRIBUTION

Range	CUBIC		LINEAR	
	NE.pts	%	NE.pts	%
0.0m - 1.0m	29879	41.6%	29844	41.6%
1.0m - 2.0m	19436	27.1%	19627	27.3%
2.0m - 5.0m	18979	26.4%	18845	26.2%
5.0m - 10.0m	3311	4.6%	3308	4.6%
10.0m - 15.0m	174	0.2%	155	0.2%
15.0m - 18.9m	26	0.0%	26	0.0%

Izveštaj E-7: Upoređenje visina iz DMT25 i visina tačaka visinskih linija dobijenih iz TP1 za područje Kragujevca



Kragujevac

TP1 - visinske tačke

DMT25 - CFDT=da, MCS=10m, DL=VS, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10m, SPLINE=ne, RTSDV=5m, ITER=5, KOTE=da

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum	
4.559	187727	1.932	1.909	-0.237	-27.714	29.964	
-----							
0.0	5.0	116610	1.641	1.600	-0.364	-24.992	21.498
5.0	10.0	54310	2.110	2.109	-0.078	-27.714	29.964
10.0	15.0	12321	2.785	2.785	0.065	-12.063	12.298
15.0	20.0	3180	3.166	3.158	0.223	-11.725	11.730
20.0	25.0	892	3.497	3.469	0.445	-27.348	14.306
25.0	30.0	264	3.756	3.709	0.590	-9.828	13.185
30.0	35.0	95	4.060	3.978	0.810	-7.967	11.462
35.0	40.0	33	4.906	4.833	0.831	-8.454	15.250
40.0	45.0	12	6.257	6.247	0.337	-13.962	8.507
45.0	50.0	3	3.148	1.070	2.417	1.572	3.620
50.0	55.0	5	5.960	4.310	3.682	-1.129	9.306
55.0	60.0	2	2.015	1.853	-0.559	-1.869	0.752

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	1.402	0.000	5.539	0.002		0.063
STDEV	1.360	0.000	5.719	0.002		0.072

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum	
4.526	187727	1.927	1.907	-0.203	-27.689	29.938	
-----							
0.0	5.0	116610	1.645	1.610	-0.336	-25.016	21.411
5.0	10.0	54310	2.098	2.097	-0.035	-27.689	29.938
10.0	15.0	12321	2.759	2.757	0.107	-12.187	12.476
15.0	20.0	3180	3.126	3.114	0.270	-11.510	12.013
20.0	25.0	892	3.485	3.450	0.494	-27.460	13.803
25.0	30.0	264	3.735	3.683	0.617	-9.646	10.920
30.0	35.0	95	4.030	3.917	0.945	-7.922	11.553
35.0	40.0	33	4.984	4.907	0.854	-8.724	15.244
40.0	45.0	12	6.331	6.313	0.457	-14.235	8.507
45.0	50.0	3	3.022	1.218	2.258	1.220	3.599
50.0	55.0	5	6.228	4.399	3.943	-1.570	9.323
55.0	60.0	2	2.600	2.473	-0.567	-2.316	1.182

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	1.411	0.000	5.404	0.002		0.059
STDEV	1.376	0.000	5.540	0.002		0.068

ERROR DISTRIBUTION

Range	CUBIC		LINEAR	
	NE.pts	%	NE.pts	%
0.0m - 1.0m	92239	49.1%	91941	49.0%
1.0m - 2.0m	53873	28.7%	54195	28.9%
2.0m - 5.0m	37115	19.8%	37175	19.8%
5.0m - 10.0m	4252	2.3%	4180	2.2%
10.0m - 15.0m	218	0.1%	206	0.1%
15.0m - 20.0m	21	0.0%	21	0.0%
20.0m - 25.0m	4	0.0%	3	0.0%
25.0m - 30.0m	5	0.0%	6	0.0%

Izveštaj E-8 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina visinskih tačaka dobijenih iz TP1 za područje Kragujevca (Slika E-3)

**Kruševac**  
**DOF5 - visinske linije**  
**DMT25 - CFDT=da, MCS=10m, DL=VS, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10m, SPLINE=ne, RTSDV=5m, ITER=5, KOTE=ne**

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
7.484	37775	4.774	4.556	-1.309	-31.722	23.979
-----						
0.0 5.0	17862	4.737	4.422	-1.698	-19.736	13.940
5.0 10.0	8658	4.075	3.975	-0.899	-28.898	20.343
10.0 15.0	5638	4.407	4.340	-0.766	-31.722	19.922
15.0 20.0	2806	5.303	5.263	-0.654	-22.164	21.450
20.0 25.0	1414	5.872	5.753	-1.174	-25.573	15.213
25.0 30.0	695	6.689	6.542	-1.394	-25.056	18.580
30.0 35.0	355	7.644	7.116	-2.790	-21.008	23.979
35.0 40.0	190	8.191	7.162	-3.964	-29.364	9.837
40.0 45.0	90	9.283	8.150	-4.419	-26.144	15.423
45.0 50.0	43	11.414	8.923	-7.034	-26.913	10.194
50.0 55.0	14	8.517	7.543	-3.812	-15.857	7.121
55.0 60.0	4	10.898	7.187	-7.095	-13.808	3.048
60.0 65.0	1	-	-	-3.514	-3.514	-3.514
65.0 70.0	3	9.515	2.854	-7.412	-10.365	-4.669
70.0 75.0	1	-	-	-13.526	-13.526	-13.526
75.0 80.0	1	-	-	0.519	0.519	0.519

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	4.209	0.004	3.502	0.018		0.501
STDEV	4.003	0.003	3.483	0.014		0.390

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
7.522	37775	4.801	4.578	-1.339	-32.152	23.350
-----						
0.0 5.0	17862	4.753	4.431	-1.719	-20.040	13.940
5.0 10.0	8658	4.126	4.019	-0.934	-29.036	19.574
10.0 15.0	5638	4.455	4.380	-0.810	-32.152	19.886
15.0 20.0	2806	5.336	5.290	-0.697	-22.168	21.475
20.0 25.0	1414	5.914	5.788	-1.216	-25.184	15.023
25.0 30.0	695	6.673	6.521	-1.415	-24.684	18.543
30.0 35.0	355	7.667	7.128	-2.819	-21.037	23.350
35.0 40.0	190	8.169	7.110	-4.012	-29.139	9.855
40.0 45.0	90	9.178	8.092	-4.307	-25.746	13.527
45.0 50.0	43	11.220	8.802	-6.877	-26.824	10.205
50.0 55.0	14	8.237	7.327	-3.627	-14.977	7.454
55.0 60.0	4	11.086	7.177	-7.317	-13.991	2.857
60.0 65.0	1	-	-	-3.677	-3.677	-3.677
65.0 70.0	3	9.238	3.112	-7.102	-10.333	-4.125
70.0 75.0	1	-	-	-13.358	-13.358	-13.358
75.0 80.0	1	-	-	0.509	0.509	0.509

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	4.240	0.004	3.491	0.017		0.484
STDEV	4.026	0.003	3.483	0.013		0.374

ERROR DISTRIBUTION

Range	CUBIC		LINEAR	
	No.pts	%	No.pts	%
0.0m - 1.0m	7336	19.4%	7265	19.2%
1.0m - 2.0m	7093	18.8%	6971	18.5%
2.0m - 5.0m	14618	38.7%	14606	38.7%
5.0m - 10.0m	6893	18.2%	7092	18.8%
10.0m - 15.0m	1392	3.7%	1403	3.7%
15.0m - 20.0m	389	1.0%	384	1.0%
20.0m - 25.0m	36	0.1%	37	0.1%
25.0m - 30.0m	14	0.0%	13	0.0%
30.0m - 32.2m	4	0.0%	4	0.0%



**Kruševac**

**DOF5 - visinske tačke**

**DMT25 - CFDT=da, MCS=10m, DL=VS, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10m, SPLINE=ne, RTSDV=5m, ITER=5, KOTE=ne**

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
5.343	358234	2.952	2.748	0.921	-37.637	31.697
-----						
0.0 5.0	212494	2.225	1.829	1.268	-27.642	18.360
5.0 10.0	84564	2.751	2.656	0.717	-28.093	19.595
10.0 15.0	35311	3.725	3.691	0.504	-37.637	26.814
15.0 20.0	13678	5.089	5.087	-0.143	-36.463	31.697
20.0 25.0	6389	6.314	6.226	-1.047	-34.002	24.405
25.0 30.0	3373	7.086	6.933	-1.464	-32.338	26.745
30.0 35.0	1417	7.861	7.644	-1.834	-31.773	25.366
35.0 40.0	644	8.262	8.147	-1.374	-36.617	28.434
40.0 45.0	219	8.643	8.441	-1.856	-28.669	20.350
45.0 50.0	97	10.232	9.913	-2.523	-31.365	22.006
50.0 55.0	33	8.822	8.753	-1.090	-21.003	18.038
55.0 60.0	7	7.832	7.160	-2.938	-11.490	8.108
60.0 65.0	3	3.419	1.623	2.458	0.651	3.791
65.0 70.0	3	3.712	3.237	1.484	-2.231	3.696
70.0 75.0	2	3.792	3.679	0.650	-1.951	3.252

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	1.754	0.001	9.356	0.003		0.223
STDEV	1.374	0.000	10.416	0.003		0.205

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
5.313	358234	2.939	2.729	0.949	-37.320	31.497
-----						
0.0 5.0	212494	2.234	1.831	1.280	-27.514	18.360
5.0 10.0	84564	2.750	2.642	0.761	-28.137	19.113
10.0 15.0	35311	3.693	3.651	0.557	-37.320	24.481
15.0 20.0	13678	5.018	5.018	-0.080	-35.596	31.497
20.0 25.0	6389	6.232	6.155	-0.975	-33.323	24.269
25.0 30.0	3373	6.987	6.848	-1.387	-32.181	26.493
30.0 35.0	1417	7.752	7.551	-1.756	-31.616	25.265
35.0 40.0	644	8.152	8.050	-1.288	-36.261	28.822
40.0 45.0	219	8.542	8.351	-1.791	-28.265	20.173
45.0 50.0	97	10.111	9.816	-2.409	-31.343	21.836
50.0 55.0	33	8.741	8.672	-1.076	-20.967	17.648
55.0 60.0	7	7.784	7.245	-2.634	-11.389	8.106
60.0 65.0	3	2.994	1.744	1.987	0.018	3.338
65.0 70.0	3	3.757	3.332	1.416	-1.804	4.851
70.0 75.0	2	5.388	4.922	1.549	-1.931	5.030

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	1.773	0.001	9.141	0.003		0.216
STDEV	1.383	0.000	10.224	0.003		0.199

ERROR DISTRIBUTION

Range	CUBIC		LINEAR	
	No.pts	%	No.pts	%
0.0m - 1.0m	103262	28.8%	102677	28.7%
1.0m - 2.0m	98288	27.4%	98079	27.4%
2.0m - 5.0m	134180	37.5%	135114	37.7%
5.0m - 10.0m	19066	5.3%	19051	5.3%
10.0m - 15.0m	2541	0.7%	2466	0.7%
15.0m - 20.0m	630	0.2%	592	0.2%
20.0m - 25.0m	196	0.1%	187	0.1%
25.0m - 30.0m	51	0.0%	50	0.0%
30.0m - 37.6m	20	0.0%	18	0.0%

Izveštaj E-10: Upoređenje visina iz DMT25 i visina visinskih tačaka dobijenih iz DOF5 za područje Kruševca (Slika E.5)

**Kruševac**

**PM - poligonska mreža Kruševca**

**DMT25 - CFDT=da, MCS=10m, DL=VS, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10m, SPLINE=ne, RTSDV=5m, ITER=5, KOTE=ne**

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
1.412	3467	1.204	1.174	0.216	-6.261	6.206
0.0 5.0	3188	1.140	1.126	0.183	-6.261	5.860
5.0 10.0	256	1.709	1.608	0.577	-5.448	6.206
10.0 15.0	16	1.992	1.983	0.183	-3.490	4.947
15.0 20.0	6	2.777	1.970	1.786	-1.408	4.808
20.0 25.0	1	-	-	5.935	5.935	5.935

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	0.876	0.001	6.091	0.011		0.018
STDEV	0.910	0.001	4.987	0.015		0.024

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
1.422	3467	1.208	1.175	0.226	-6.288	6.165
0.0 5.0	3188	1.145	1.130	0.186	-6.288	5.860
5.0 10.0	256	1.701	1.570	0.653	-5.559	6.165
10.0 15.0	16	2.118	2.098	0.283	-3.516	5.289
15.0 20.0	6	2.687	1.887	1.745	-1.378	4.569
20.0 25.0	1	-	-	5.951	5.951	5.951

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	0.882	0.000	6.061	0.006		0.010
STDEV	0.925	0.001	4.727	0.015		0.024

ERROR DISTRIBUTION

Range	CUBIC		LINEAR	
	NE.pts	%	NE.pts	%
0.0m - 1.0m	2404	69.3%	2386	68.8%
1.0m - 2.0m	765	22.1%	768	22.2%
2.0m - 5.0m	286	8.2%	300	8.7%
5.0m - 6.3m	12	0.3%	13	0.4%

Izveštaj E-11 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina tačaka poligonske mreže grada Kruševca za područje Kruševca



Lazarevac

ODK5 - izohipse

DMT25 - CFDT=da, MCS=ne, DL=ne, LB=ne, LIH=ne, LINK=ne, MaxSDV=ne, SPLINE=ne, RTSDV=10m, ITER=5, KOTE=ne

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
6.980	626597	2.480	2.468	-0.022	-19.995	19.990
-----						
0.0 5.0	260691	1.876	1.866	-0.186	-19.702	15.189
5.0 10.0	233500	2.298	2.298	-0.001	-19.620	19.587
10.0 15.0	78703	3.074	3.074	0.005	-19.435	19.990
15.0 20.0	30685	3.813	3.792	0.401	-19.995	19.562
20.0 25.0	13674	4.525	4.458	0.776	-19.835	18.643
25.0 30.0	5590	4.872	4.738	1.136	-18.425	19.922
30.0 35.0	2310	4.963	4.766	1.384	-19.813	17.596
35.0 40.0	865	5.309	5.195	1.097	-14.097	15.545
40.0 45.0	342	5.614	5.346	1.711	-13.448	17.538
45.0 50.0	125	5.818	5.582	1.633	-13.740	14.031
50.0 55.0	69	5.799	5.666	1.226	-13.930	11.579
55.0 60.0	30	6.548	6.349	1.575	-11.708	10.918
60.0 65.0	6	6.599	3.327	5.202	-0.456	9.859
65.0 70.0	6	6.823	2.082	5.931	3.240	8.119
70.0 75.0	1	-	-	5.508	5.508	5.508

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	1.572	0.000	6.306	0.002	0.148	
STDEV	1.581	0.000	6.167	0.002	0.156	

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
6.146	626597	2.571	2.556	-0.081	-20.890	19.334
-----						
0.0 5.0	260691	2.144	2.127	-0.272	-18.231	15.517
5.0 10.0	233500	2.362	2.361	-0.047	-19.209	19.334
10.0 15.0	78703	3.041	3.041	-0.030	-18.812	19.115
15.0 20.0	30685	3.721	3.702	0.378	-19.851	19.123
20.0 25.0	13674	4.421	4.353	0.772	-20.372	18.883
25.0 30.0	5590	4.739	4.599	1.146	-17.660	15.000
30.0 35.0	2310	4.828	4.618	1.407	-20.890	15.379
35.0 40.0	865	5.145	5.024	1.107	-13.700	15.000
40.0 45.0	342	5.578	5.301	1.733	-12.725	15.000
45.0 50.0	125	5.628	5.366	1.690	-10.000	13.647
50.0 55.0	69	5.639	5.499	1.241	-13.904	9.870
55.0 60.0	30	6.282	5.961	1.949	-10.649	10.000
60.0 65.0	6	6.545	2.767	5.415	0.681	9.070
65.0 70.0	6	6.681	1.936	5.837	2.870	8.003
70.0 75.0	1	-	-	5.698	5.698	5.698

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	1.834	0.000	5.224	0.002	0.157	
STDEV	1.837	0.000	5.104	0.002	0.157	

ERROR DISTRIBUTION

Range	CUBIC		LINEAR	
	NE.pts	%	NE.pts	%
0.0m - 1.0m	288219	46.0%	301764	48.2%
1.0m - 2.0m	148911	23.8%	132119	21.1%
2.0m - 5.0m	154682	24.7%	162627	26.0%
5.0m - 10.0m	31815	5.1%	27793	4.4%
10.0m - 15.0m	2738	0.4%	2135	0.3%
15.0m - 20.0m	232	0.0%	156	0.0%
20.0m - 20.9m	0	0.0%	3	0.0%

Izveštaj E-12 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina tačaka izohipsi digitalizovanih sa ODK5 za područje Lazarevca

Lazarevac

DOF5 - visinske tačke

DMT25 - CFDT=da, MCS=ne, DL=ne, LB=ne, LIH=ne, LINK=ne, MaxSDV=ne, SPLINE=ne, RTSDV=10m, ITER=5, KOTE=ne

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
7.436	178136	3.483	3.455	-0.064	-19.996	19.973
-----						
0.0 5.0	76518	2.828	2.827	-0.072	-19.967	19.960
5.0 10.0	51482	3.110	3.086	-0.383	-19.996	19.819
10.0 15.0	28544	3.908	3.904	-0.168	-19.855	19.797
15.0 20.0	12412	4.807	4.789	0.408	-19.539	19.848
20.0 25.0	5407	5.605	5.491	1.125	-19.737	19.969
25.0 30.0	2281	6.229	5.990	1.710	-19.694	19.793
30.0 35.0	915	6.763	6.367	2.278	-19.044	19.973
35.0 40.0	379	6.482	6.073	2.264	-16.189	19.494
40.0 45.0	130	7.528	6.912	2.969	-14.682	19.762
45.0 50.0	46	7.434	6.296	3.910	-12.175	15.305
50.0 55.0	18	8.629	7.603	3.964	-12.014	16.399
55.0 60.0	3	17.781	5.532	13.798	8.410	19.464
60.0 65.0	1	-	-	15.627	15.627	15.627

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	2.432	0.001	6.804	0.004		0.181
STDEV	2.460	0.001	6.462	0.004		0.195

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
6.542	178136	3.467	3.442	-0.021	-23.072	22.830
-----						
0.0 5.0	76518	2.871	2.870	-0.069	-21.426	22.630
5.0 10.0	51482	3.110	3.097	-0.286	-23.072	22.830
10.0 15.0	28544	3.838	3.837	-0.114	-19.803	20.463
15.0 20.0	12412	4.703	4.683	0.432	-19.260	19.856
20.0 25.0	5407	5.490	5.366	1.162	-19.006	20.030
25.0 30.0	2281	6.161	5.901	1.768	-18.655	20.188
30.0 35.0	915	6.697	6.280	2.326	-19.119	20.650
35.0 40.0	379	6.429	5.995	2.319	-16.258	19.028
40.0 45.0	130	7.414	6.809	2.922	-13.297	19.705
45.0 50.0	46	7.472	6.207	4.115	-11.404	15.529
50.0 55.0	18	8.496	7.402	4.054	-11.865	16.490
55.0 60.0	3	19.148	8.207	14.125	6.108	22.510
60.0 65.0	1	-	-	16.137	16.137	16.137

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	2.482	0.001	6.416	0.004		0.180
STDEV	2.515	0.001	6.053	0.004		0.183

ERROR DISTRIBUTION

Range	CUBIC		LINEAR	
	NE.pts	%	NE.pts	%
0.0m - 1.0m	60509	34.0%	60060	33.7%
1.0m - 2.0m	42760	24.0%	42982	24.1%
2.0m - 5.0m	54925	30.8%	54967	30.9%
5.0m - 10.0m	16039	9.0%	16403	9.2%
10.0m - 15.0m	2899	1.6%	2843	1.6%
15.0m - 20.0m	1004	0.6%	837	0.5%
20.0m - 23.1m	0	0.0%	44	0.0%

Izveštaj E-13 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina visinskih tačaka dobijenih iz DOF5 za područje Lazarevca



**Lazarevac**

**DOF5 - tačke**

**DMT25 - CFDT=da, MCS=ne, DL=ne, LB=ne, LIH=ne, LINK=ne, MaxSDV=ne, SPLINE=ne, RTSDV=10m, ITER=5, KOTE=ne**

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum	
7.560	76828	5.051	4.751	-1.663	-19.989	19.982	
0.0	5.0	34003	5.384	4.965	-2.083	-19.989	19.982
5.0	10.0	20173	4.415	4.137	-1.540	-19.924	19.965
10.0	15.0	12241	4.591	4.391	-1.341	-19.790	19.891
15.0	20.0	5716	5.073	4.972	-1.007	-19.968	19.275
20.0	25.0	2604	5.779	5.733	-0.730	-19.669	19.719
25.0	30.0	1139	6.319	6.270	-0.784	-19.945	19.717
30.0	35.0	525	6.827	6.783	-0.769	-19.899	17.994
35.0	40.0	253	6.372	6.282	-1.062	-18.133	13.656
40.0	45.0	96	7.406	7.350	-0.906	-18.722	13.345
45.0	50.0	41	6.983	6.946	-0.708	-17.984	11.458
50.0	55.0	30	7.861	7.018	-3.482	-16.698	13.290
55.0	60.0	5	5.846	5.354	-2.098	-8.280	3.981
60.0	65.0	2	17.304	14.911	-6.208	-16.752	4.335

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	4.946	0.003	0.553	0.014	0.518	
STDEV	4.527	0.003	1.372	0.013	0.479	

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum	
5.689	76828	5.331	4.836	-2.189	-21.895	24.020	
0.0	5.0	34003	5.705	5.072	-2.613	-21.895	24.020
5.0	10.0	20173	4.812	4.272	-2.215	-21.181	21.749
10.0	15.0	12241	4.806	4.450	-1.815	-20.808	19.554
15.0	20.0	5716	5.157	4.978	-1.348	-20.554	18.594
20.0	25.0	2604	5.793	5.707	-0.989	-20.629	19.354
25.0	30.0	1139	6.288	6.215	-0.960	-20.131	19.992
30.0	35.0	525	6.695	6.638	-0.870	-19.414	17.315
35.0	40.0	253	6.327	6.228	-1.112	-17.877	13.784
40.0	45.0	96	7.334	7.244	-1.140	-18.955	13.202
45.0	50.0	41	6.620	6.581	-0.708	-16.786	12.009
50.0	55.0	30	7.583	6.748	-3.400	-16.228	12.976
55.0	60.0	5	5.341	4.915	-1.869	-7.523	3.455
60.0	65.0	2	16.826	14.024	-6.574	-16.491	3.342

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	5.338	0.003	-0.194	0.013	0.475	
STDEV	4.666	0.002	1.022	0.013	0.458	

ERROR DISTRIBUTION

Range	CUBIC		LINEAR	
	NE.pts	%	NE.pts	%
0.0m - 1.0m	15769	20.5%	14184	18.5%
1.0m - 2.0m	13945	18.2%	12664	16.5%
2.0m - 5.0m	27262	35.5%	27109	35.3%
5.0m - 10.0m	15197	19.8%	17711	23.1%
10.0m - 15.0m	3423	4.5%	3930	5.1%
15.0m - 20.0m	1232	1.6%	1138	1.5%
20.0m - 24.0m	0	0.0%	92	0.1%

Izveštaj E-14 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina tačaka dobijenih iz DOF5 za područje Lazarevca

Lazarevac

PM - poligonska mreža grada Beograda

DMT25 - CFDT=da, MCS=10m, DL=VS, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10m, SPLINE=ne, RTSDV=5m, ITER=5, KOTE=da

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
4.304	2825	1.816	1.762	0.332	-11.801	14.616
0.0 5.0	1849	1.608	1.598	0.179	-10.345	14.616
5.0 10.0	784	2.013	1.946	0.514	-11.801	14.422
10.0 15.0	148	2.361	2.110	1.056	-5.078	6.891
15.0 20.0	27	3.215	3.002	1.129	-8.221	7.046
20.0 25.0	8	3.886	3.858	-0.438	-6.793	3.456
25.0 30.0	6	4.420	4.187	1.292	-3.783	8.367
30.0 35.0	2	4.163	0.621	2.911	2.472	3.350
35.0 40.0	1	-	-	7.264	7.264	7.264

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	1.382	0.002	4.932	0.015		0.053
STDEV	1.431	0.004	3.818	0.034		0.116

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
4.256	2825	1.854	1.783	0.411	-11.513	14.726
0.0 5.0	1849	1.637	1.619	0.238	-10.221	14.726
5.0 10.0	784	2.069	1.972	0.627	-11.513	14.485
10.0 15.0	148	2.403	2.113	1.140	-4.957	6.623
15.0 20.0	27	3.314	2.984	1.414	-8.161	7.046
20.0 25.0	8	3.920	3.920	-0.043	-6.406	3.921
25.0 30.0	6	4.375	4.103	1.386	-3.834	8.038
30.0 35.0	2	4.884	0.980	3.383	2.690	4.076
35.0 40.0	1	-	-	6.803	6.803	6.803

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	1.404	0.002	5.135	0.015		0.051
STDEV	1.454	0.003	3.797	0.032		0.110

ERROR DISTRIBUTION

Range	CUBIC		LINEAR	
	NE.pts	%	NE.pts	%
0.0m - 1.0m	1573	55.7%	1510	53.5%
1.0m - 2.0m	739	26.2%	766	27.1%
2.0m - 5.0m	453	16.0%	486	17.2%
5.0m - 10.0m	54	1.9%	57	2.0%
10.0m - 14.7m	6	0.2%	6	0.2%

Izveštaj E-15: Upoređenje visina iz DMT25 i visina tačaka poligonske mreže grada Beograda za područje Lazarevca



Novi Pazar

DOF5 - visinske linije

DMT25 - CFDT=da, MCS=10m, DL=VS, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10m, SPLINE=ne, RTSDV=5m, ITER=5, KOTE=ne

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
12.000	20150	4.635	4.324	-1.573	-27.731	37.780
-----						
0.0 5.0	4861	4.329	4.256	-0.790	-14.135	37.780
5.0 10.0	4260	4.113	3.883	-1.354	-17.279	22.346
10.0 15.0	4376	4.486	4.116	-1.784	-21.742	18.828
15.0 20.0	3046	4.708	4.278	-1.964	-21.914	19.740
20.0 25.0	2025	5.321	4.891	-2.096	-24.865	22.797
25.0 30.0	946	5.525	5.005	-2.338	-25.595	12.581
30.0 35.0	375	6.126	5.524	-2.645	-27.731	9.050
35.0 40.0	165	6.995	6.110	-3.394	-26.853	10.910
40.0 45.0	55	7.746	6.940	-3.409	-23.649	11.512
45.0 50.0	23	8.757	8.552	-1.840	-12.668	15.069
50.0 55.0	11	8.672	7.334	-4.413	-12.254	14.746
55.0 60.0	5	8.270	8.264	-0.283	-7.659	13.776
60.0 65.0	1	-	-	-4.834	-4.834	-4.834
65.0 70.0	1	-	-	0.118	0.118	0.118

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	3.909	0.003	3.110	0.009	0.220	
STDEV	3.810	0.003	2.206	0.011	0.269	

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
11.951	20150	4.676	4.363	-1.585	-27.878	37.780
-----						
0.0 5.0	4861	4.339	4.267	-0.786	-14.344	37.780
5.0 10.0	4260	4.174	3.946	-1.361	-17.405	22.790
10.0 15.0	4376	4.527	4.152	-1.806	-21.733	18.810
15.0 20.0	3046	4.760	4.324	-1.990	-22.300	19.789
20.0 25.0	2025	5.356	4.928	-2.098	-24.777	22.871
25.0 30.0	946	5.590	5.067	-2.361	-25.889	12.996
30.0 35.0	375	6.182	5.567	-2.685	-27.878	9.304
35.0 40.0	165	7.031	6.159	-3.382	-27.304	11.020
40.0 45.0	55	7.935	7.138	-3.433	-24.243	13.970
45.0 50.0	23	8.826	8.550	-2.145	-12.878	14.723
50.0 55.0	11	8.808	7.123	-4.940	-11.235	14.462
55.0 60.0	5	8.699	8.687	-0.410	-7.885	14.531
60.0 65.0	1	-	-	-4.579	-4.579	-4.579
65.0 70.0	1	-	-	-0.907	-0.907	-0.907

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	3.935	0.002	3.180	0.009	0.207	
STDEV	3.838	0.003	2.258	0.011	0.258	

ERROR DISTRIBUTION

Range	CUBIC		LINEAR	
	NE.pts	%	NE.pts	%
0.0m - 1.0m	4117	20.4%	4063	20.2%
1.0m - 2.0m	3731	18.5%	3768	18.7%
2.0m - 5.0m	7901	39.2%	7816	38.8%
5.0m - 10.0m	3645	18.1%	3713	18.4%
10.0m - 15.0m	604	3.0%	637	3.2%
15.0m - 20.0m	90	0.4%	89	0.4%
20.0m - 25.0m	34	0.2%	35	0.2%
25.0m - 30.0m	10	0.0%	11	0.1%
30.0m - 37.8m	18	0.1%	18	0.1%

Izveštaj E-16 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina tačaka visinskih linija dobijenih iz DOF5 za područje Novog Pazara

**Novi Pazar**

**DOF5 - visinske tačke**

**DMT25 - CFDT=da, MCS=10m, DL=VS, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10m, SPLINE=ne, RTSDV=5m, ITER=5, KOTE=ne, odstranjene grube greške preko 20m**

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
13.145	30095	4.471	3.953	-1.997	-19.884	19.695
-----						
0.0 5.0	5325	3.223	3.016	-1.137	-14.733	19.608
5.0 10.0	6368	3.650	3.280	-1.603	-19.872	19.695
10.0 15.0	7250	4.025	3.517	-1.957	-19.362	17.096
15.0 20.0	5128	4.871	4.224	-2.424	-19.691	16.934
20.0 25.0	3186	5.745	5.007	-2.817	-19.884	15.854
25.0 30.0	1750	6.228	5.462	-2.991	-19.470	16.089
30.0 35.0	672	6.786	5.950	-3.261	-19.021	16.731
35.0 40.0	269	6.433	6.130	-1.946	-19.350	15.851
40.0 45.0	93	6.967	6.540	-2.390	-18.765	12.896
45.0 50.0	41	7.440	6.972	-2.566	-17.356	8.539
50.0 55.0	6	8.189	8.164	0.590	-12.099	9.071
55.0 60.0	4	7.543	7.448	-1.031	-9.235	8.398
60.0 65.0	1	-	-	0.683	0.683	0.683
65.0 70.0	1	-	-	7.109	7.109	7.109
75.0 80.0	1	-	-	10.088	10.088	10.088

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	2.905	0.002	5.981	0.008		0.234
STDEV	2.639	0.002	5.040	0.007		0.188

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
13.066	30095	4.446	3.946	-1.958	-20.028	21.340
-----						
0.0 5.0	5325	3.246	3.048	-1.115	-14.651	19.783
5.0 10.0	6368	3.656	3.312	-1.549	-20.028	21.340
10.0 15.0	7250	4.006	3.513	-1.927	-19.158	18.640
15.0 20.0	5128	4.826	4.196	-2.385	-19.710	17.742
20.0 25.0	3186	5.690	4.971	-2.770	-19.572	16.017
25.0 30.0	1750	6.149	5.405	-2.931	-19.501	15.849
30.0 35.0	672	6.728	5.915	-3.202	-18.670	16.650
35.0 40.0	269	6.365	6.087	-1.857	-19.168	15.597
40.0 45.0	93	6.997	6.574	-2.383	-18.504	12.623
45.0 50.0	41	7.399	6.927	-2.568	-17.553	8.606
50.0 55.0	6	8.027	7.986	0.733	-11.338	8.961
55.0 60.0	4	7.150	7.036	-1.099	-9.032	7.651
60.0 65.0	1	-	-	0.291	0.291	0.291
65.0 70.0	1	-	-	7.217	7.217	7.217
75.0 80.0	1	-	-	10.836	10.836	10.836

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	2.927	0.002	5.811	0.008		0.227
STDEV	2.677	0.002	4.877	0.007		0.186

ERROR DISTRIBUTION

Range	CUBIC		LINEAR	
	NE.pts	%	NE.pts	%
0.0m - 1.0m	6701	22.3%	6673	22.2%
1.0m - 2.0m	5768	19.2%	5900	19.6%
2.0m - 5.0m	11216	37.3%	11146	37.0%
5.0m - 10.0m	5184	17.2%	5164	17.2%
10.0m - 15.0m	1021	3.4%	1014	3.4%
15.0m - 20.0m	205	0.7%	194	0.6%
20.0m - 21.3m	0	0.0%	4	0.0%

Izveštaj E-17: Upoređenje visina iz DMT25 i visina visinskih tačaka dobijenih iz DOF5 za područje Novog Pazara (Slika E-7)



Pančevo

ODK5 - izohipse

DMT25 - CFDT=ne, MCS=ne, DL=ne, LB=ne, LIH, LINK, MaxSDV=ne, SPLINE=ne, RTSDV=ne, ITER=ne, KOTE=ne

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
6.393	306476	2.855	2.809	0.021	-21.754	28.224
-----						
0.0 5.0	177141	1.771	1.754	-0.240	-15.164	20.042
5.0 10.0	51756	2.849	2.849	-0.004	-16.408	19.940
10.0 15.0	33768	3.519	3.516	0.133	-20.771	19.730
15.0 20.0	17913	4.244	4.222	0.436	-18.267	28.224
20.0 25.0	10398	4.806	4.742	0.783	-21.605	27.797
25.0 30.0	6339	5.340	5.193	1.244	-21.754	21.013
30.0 35.0	3958	5.920	5.640	1.800	-20.372	24.815
35.0 40.0	2502	6.362	5.922	2.325	-19.172	20.491
40.0 45.0	1518	6.513	6.032	2.455	-18.587	19.360
45.0 50.0	735	6.739	5.963	3.138	-15.814	17.739
50.0 55.0	288	7.676	6.231	4.475	-19.217	18.549
55.0 60.0	112	6.403	5.730	2.845	-9.172	19.028
60.0 65.0	38	6.333	5.462	3.163	-8.805	12.001
65.0 70.0	9	7.551	7.111	2.396	-10.949	11.468
70.0 75.0	1	-	-	6.927	6.927	6.927

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	1.660	0.001	6.774	0.004		0.348
STDEV	1.686	0.001	6.377	0.004		0.394

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
6.092	306476	2.854	2.803	0.072	-21.472	20.865
-----						
0.0 5.0	177141	1.793	1.780	-0.223	-15.084	20.009
5.0 10.0	51756	2.893	2.891	0.105	-16.609	19.948
10.0 15.0	33768	3.498	3.490	0.232	-20.914	19.711
15.0 20.0	17913	4.170	4.137	0.518	-18.193	20.000
20.0 25.0	10398	4.740	4.660	0.866	-20.580	20.000
25.0 30.0	6339	5.308	5.133	1.353	-21.472	20.865
30.0 35.0	3958	5.872	5.562	1.882	-20.378	20.267
35.0 40.0	2502	6.329	5.851	2.414	-19.400	20.149
40.0 45.0	1518	6.493	5.984	2.520	-18.404	19.284
45.0 50.0	735	6.687	5.864	3.213	-15.624	17.430
50.0 55.0	288	7.724	6.244	4.540	-19.089	18.955
55.0 60.0	112	6.358	5.637	2.928	-8.565	19.212
60.0 65.0	38	6.088	5.053	3.351	-6.665	12.055
65.0 70.0	9	6.236	4.991	3.525	-4.009	10.887
70.0 75.0	1	-	-	6.954	6.954	6.954

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	1.690	0.001	6.632	0.004		0.341
STDEV	1.721	0.001	6.184	0.004		0.386

ERROR DISTRIBUTION

Range	CUBIC		LINEAR	
	NE.pts	%	NE.pts	%
0.0m - 1.0m	155040	50.6%	158660	51.8%
1.0m - 2.0m	61481	20.1%	58148	19.0%
2.0m - 5.0m	66195	21.6%	67533	22.0%
5.0m - 10.0m	20174	6.6%	18886	6.2%
10.0m - 15.0m	3039	1.0%	2752	0.9%
15.0m - 20.0m	513	0.2%	476	0.2%
20.0m - 25.0m	32	0.0%	21	0.0%
25.0m - 28.2m	2	0.0%	0	0.0%

Izveštaj E-18 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina tačaka izohipsi digitalizovanih sa ODK5 za područje Pančevo

**Pančevo**

**DOF5 - visinske tačke**

**DMT25 - CFDT=ne, MCS=ne, DL=ne, LB=ne, LIH, LINK, MaxSDV=ne, SPLINE=ne, RTSDV=ne, ITER=ne, KOTE=ne**

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
1.705	174684	1.778	1.772	-0.092	-20.271	27.197
-----						
0.0 5.0	152482	1.398	1.393	-0.117	-18.633	25.646
5.0 10.0	15193	2.822	2.815	0.192	-19.075	27.197
10.0 15.0	4493	3.735	3.733	-0.124	-17.496	22.110
15.0 20.0	1518	4.811	4.811	0.046	-20.271	25.470
20.0 25.0	591	5.422	5.395	-0.540	-17.050	18.023
25.0 30.0	211	5.871	5.782	-1.016	-15.494	14.919
30.0 35.0	106	7.186	7.171	0.466	-16.607	20.402
35.0 40.0	57	7.478	7.247	-1.827	-17.102	16.122
40.0 45.0	25	8.355	8.278	-1.108	-16.181	12.891
45.0 50.0	4	5.523	5.522	-0.069	-6.532	5.682
50.0 55.0	3	19.009	5.296	-14.907	-19.300	-9.026
55.0 60.0	1	-	-	-2.581	-2.581	-2.581

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	0.896	0.001	12.190	0.006		0.145
STDEV	0.899	0.001	12.056	0.007		0.155

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
1.541	174684	1.727	1.722	-0.097	-20.199	20.614
-----						
0.0 5.0	152482	1.362	1.357	-0.123	-16.023	16.400
5.0 10.0	15193	2.732	2.726	0.183	-19.118	15.254
10.0 15.0	4493	3.609	3.608	-0.093	-17.500	16.297
15.0 20.0	1518	4.644	4.644	0.043	-20.199	17.057
20.0 25.0	591	5.328	5.301	-0.533	-16.917	18.200
25.0 30.0	211	5.747	5.674	-0.913	-15.448	14.755
30.0 35.0	106	6.949	6.912	0.707	-16.101	20.614
35.0 40.0	57	7.370	7.163	-1.720	-16.414	15.726
40.0 45.0	25	8.295	8.224	-1.058	-15.837	12.657
45.0 50.0	4	5.165	5.141	-0.437	-6.435	5.395
50.0 55.0	3	5.612	5.348	-1.388	-7.564	1.700
55.0 60.0	1	-	-	0.500	0.500	0.500

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	0.880	0.001	11.710	0.006		0.143
STDEV	0.877	0.001	11.676	0.006		0.145

ERROR DISTRIBUTION

Range	CUBIC		LINEAR	
	NE.pts	%	NE.pts	%
0.0m - 1.0m	107447	61.5%	107845	61.7%
1.0m - 2.0m	41946	24.0%	42250	24.2%
2.0m - 5.0m	20925	12.0%	20440	11.7%
5.0m - 10.0m	4004	2.3%	3881	2.2%
10.0m - 15.0m	287	0.2%	225	0.1%
15.0m - 20.0m	66	0.0%	41	0.0%
20.0m - 25.0m	6	0.0%	2	0.0%
25.0m - 27.2m	3	0.0%	0	0.0%

Izveštaj E-19 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina visinskih tačaka dobijenih iz DOF5 za područje Pančeva



**Pančevo**

**ODK5 - kote**

**DMT25 - CFDT=ne, MCS=ne, DL=ne, LB=ne, LIH, LINK, MaxSDV=ne, SPLINE=ne, RTSDV=ne, ITER=ne, KOTE=ne**

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
2.696	15098	2.646	2.615	0.258	-16.377	17.228
-----						
0.0 5.0	12157	2.369	2.365	0.125	-16.377	12.680
5.0 10.0	2076	3.293	3.212	0.723	-14.035	11.415
10.0 15.0	600	3.849	3.781	0.719	-13.143	12.831
15.0 20.0	179	4.684	4.327	1.790	-10.178	17.228
20.0 25.0	53	5.246	4.994	1.591	-9.120	11.376
25.0 30.0	13	4.335	3.685	2.193	-4.707	7.982
30.0 35.0	14	4.912	4.839	-0.813	-7.928	8.136
35.0 40.0	4	6.696	6.634	-0.787	-5.198	8.987
45.0 50.0	1	-	-	10.045	10.045	10.045
50.0 55.0	1	-	-	6.047	6.047	6.047

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	2.041	0.001	8.111	0.016		0.119
STDEV	2.069	0.001	7.386	0.015		0.114

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
2.067	15098	2.595	2.564	0.226	-14.910	17.154
-----						
0.0 5.0	12157	2.326	2.324	0.087	-14.910	10.750
5.0 10.0	2076	3.208	3.136	0.675	-13.813	11.401
10.0 15.0	600	3.737	3.653	0.787	-12.049	12.818
15.0 20.0	179	4.704	4.334	1.823	-9.786	17.154
20.0 25.0	53	5.175	4.881	1.705	-8.260	11.373
25.0 30.0	13	4.488	3.621	2.548	-5.164	7.799
30.0 35.0	14	4.928	4.918	0.307	-6.230	8.309
35.0 40.0	4	6.583	6.570	0.354	-5.635	8.601
45.0 50.0	1	-	-	9.112	9.112	9.112
50.0 55.0	1	-	-	5.791	5.791	5.791

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	2.001	0.001	7.965	0.014		0.108
STDEV	2.034	0.001	7.190	0.014		0.104

ERROR DISTRIBUTION

Range	CUBIC		LINEAR	
	NE.pts	%	NE.pts	%
0.0m - 1.0m	5840	38.7%	5904	39.1%
1.0m - 2.0m	4040	26.8%	4029	26.7%
2.0m - 5.0m	4258	28.2%	4239	28.1%
5.0m - 10.0m	865	5.7%	851	5.6%
10.0m - 15.0m	92	0.6%	74	0.5%
15.0m - 17.2m	3	0.0%	1	0.0%

Izveštaj E-20 : Upoređenje visina iz DMT25 i kota digitalizovanih sa ODK5 za područje Pančevo

**Sopot**

**DOF5 - visinske tačke**

**DMT25 - CFDT=da, MCS=10m, DL=VS, LB=ne, LIH, LINK, MaxSDV=ne, SPLINE=ne, RTSDV=1m, ITER=5, KOTE=da**

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
5.123	2144	2.696	2.649	0.140	-14.166	14.908
0.0 5.0	1283	2.329	2.326	0.120	-10.638	13.095
5.0 10.0	690	2.820	2.788	0.422	-10.463	14.479
10.0 15.0	119	3.679	3.570	-0.883	-10.382	9.785
15.0 20.0	32	4.218	3.800	-1.802	-9.244	7.420
20.0 25.0	11	6.726	6.566	1.391	-10.832	8.444
25.0 30.0	5	7.682	6.548	-3.594	-14.166	3.454
30.0 35.0	2	15.079	12.145	6.321	-2.267	14.908
35.0 40.0	2	8.862	6.976	3.865	-1.068	8.797

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	1.850	0.010	8.791	0.087		0.293
STDEV	1.932	0.008	7.526	0.069		0.230

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
5.151	2144	2.714	2.668	0.145	-13.135	14.803
0.0 5.0	1283	2.367	2.363	0.126	-10.807	13.107
5.0 10.0	690	2.823	2.790	0.430	-10.836	14.426
10.0 15.0	119	3.695	3.582	-0.901	-10.331	10.589
15.0 20.0	32	4.193	3.773	-1.800	-9.320	7.441
20.0 25.0	11	6.693	6.538	1.370	-10.818	8.483
25.0 30.0	5	7.243	6.167	-3.398	-13.135	3.417
30.0 35.0	2	14.986	12.117	6.235	-2.333	14.803
35.0 40.0	2	8.618	6.914	3.638	-1.251	8.527

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	1.902	0.010	8.468	0.087		0.293
STDEV	1.981	0.008	7.236	0.070		0.234

ERROR DISTRIBUTION

Range	CUBIC		LINEAR	
	NE.pts	%	NE.pts	%
0.0m - 1.0m	898	41.9%	879	41.0%
1.0m - 2.0m	541	25.2%	530	24.7%
2.0m - 5.0m	565	26.4%	593	27.7%
5.0m - 10.0m	115	5.4%	116	5.4%
10.0m - 14.9m	25	1.2%	26	1.2%

Izveštaj E-21 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina visinskih tačaka dobijenih iz DOF5 za područje Sopota



Sopot

ODK5 - izohipse

DMT25 - CFDT=da, MCS=10m, DL=VS, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10m, SPLINE=ne, RTSDV=5m, ITER=5, KOTE=da

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
10.611	547185	3.132	3.108	-0.276	-25.584	20.520
-----						
0.0 5.0	95149	2.666	2.612	-0.534	-15.470	15.433
5.0 10.0	210967	2.506	2.486	-0.317	-25.584	16.882
10.0 15.0	127480	3.198	3.172	-0.407	-21.324	19.595
15.0 20.0	62707	3.865	3.864	-0.088	-25.470	20.520
20.0 25.0	28816	4.406	4.390	0.378	-24.279	17.215
25.0 30.0	13101	4.919	4.881	0.609	-20.349	17.020
30.0 35.0	5378	5.229	5.203	0.513	-19.064	19.135
35.0 40.0	2195	5.521	5.478	0.682	-17.395	17.135
40.0 45.0	805	5.319	5.295	0.507	-17.741	15.489
45.0 50.0	341	4.883	4.833	0.696	-10.384	12.961
50.0 55.0	136	4.610	4.584	0.482	-9.804	11.254
55.0 60.0	59	6.221	6.217	-0.200	-14.539	14.009
60.0 65.0	28	4.956	4.947	-0.288	-10.152	7.099
65.0 70.0	9	5.698	5.674	0.490	-6.449	11.789
70.0 75.0	9	3.182	2.723	-1.553	-6.671	2.658
75.0 80.0	4	1.685	1.317	0.910	-0.383	2.742
80.0 85.0	1	-	-	-2.444	-2.444	-2.444

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	2.137	0.001	4.764	0.003	0.278	
STDEV	2.102	0.001	4.813	0.003	0.273	

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
10.471	547185	3.115	3.094	-0.230	-25.624	19.753
-----						
0.0 5.0	95149	2.696	2.649	-0.498	-15.458	15.356
5.0 10.0	210967	2.505	2.490	-0.274	-25.624	16.487
10.0 15.0	127480	3.169	3.149	-0.359	-21.022	19.021
15.0 20.0	62707	3.819	3.819	-0.036	-25.263	19.753
20.0 25.0	28816	4.355	4.333	0.438	-23.555	16.973
25.0 30.0	13101	4.859	4.811	0.685	-19.679	16.864
30.0 35.0	5378	5.161	5.125	0.609	-18.880	18.358
35.0 40.0	2195	5.437	5.385	0.748	-16.521	17.102
40.0 45.0	805	5.223	5.187	0.618	-17.955	15.150
45.0 50.0	341	4.756	4.701	0.718	-10.000	13.024
50.0 55.0	136	4.604	4.562	0.620	-8.932	11.059
55.0 60.0	59	6.027	6.026	-0.120	-14.639	13.666
60.0 65.0	28	4.976	4.964	-0.340	-10.123	7.630
65.0 70.0	9	5.539	5.472	0.811	-6.537	11.275
70.0 75.0	9	3.890	3.329	-1.897	-9.172	2.635
75.0 80.0	4	1.993	1.733	0.853	-0.597	3.370
80.0 85.0	1	-	-	-2.755	-2.755	-2.755

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	2.160	0.001	4.580	0.003	0.276	
STDEV	2.134	0.001	4.601	0.003	0.271	

ERROR DISTRIBUTION

Range	CUBIC		LINEAR	
	NE.pts	%	NE.pts	%
0.0m - 1.0m	176124	32.2%	177089	32.4%
1.0m - 2.0m	128733	23.5%	128507	23.5%
2.0m - 5.0m	185532	33.9%	186049	34.0%
5.0m - 10.0m	52198	9.5%	51198	9.4%
10.0m - 15.0m	4317	0.8%	4081	0.7%
15.0m - 20.0m	263	0.0%	249	0.0%
20.0m - 25.0m	13	0.0%	7	0.0%
25.0m - 25.6m	5	0.0%	5	0.0%

Izveštaj E-22 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina tačaka izohipsi digitalizovanih sa ODK5 za područje Sopota

**Sopot**

**PM - poligonska mreža grada Beograda**

**DMT25 - CFDT=da, MCS=10m, DL=VS, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=ne, SPLINE=25m, RTSDV=1m, ITER=5, KOTE=ne**

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
7.269	1083	2.353	2.296	0.424	-7.988	15.809
-----						
0.0 5.0	361	2.325	2.311	0.256	-7.988	13.200
5.0 10.0	512	2.017	1.984	0.360	-4.415	15.809
10.0 15.0	138	2.686	2.592	0.699	-7.915	8.626
15.0 20.0	50	3.879	3.701	1.149	-7.262	14.818
20.0 25.0	14	3.172	3.141	0.432	-5.827	5.073
25.0 30.0	4	3.738	2.688	2.249	-0.346	5.547
30.0 35.0	2	5.268	3.978	2.442	-0.371	5.255
45.0 50.0	1	-	-	6.121	6.121	6.121
50.0 55.0	1	-	-	2.180	2.180	2.180

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	1.871	0.019	3.485	0.123		0.344
STDEV	1.916	0.018	2.772	0.117		0.328

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
7.225	1083	2.407	2.319	0.559	-7.924	15.725
-----						
0.0 5.0	361	2.387	2.360	0.355	-7.924	13.132
5.0 10.0	512	2.059	1.999	0.494	-4.658	15.725
10.0 15.0	138	2.688	2.516	0.941	-7.373	8.734
15.0 20.0	50	4.028	3.796	1.335	-7.318	14.905
20.0 25.0	14	3.431	3.406	0.405	-6.612	4.854
25.0 30.0	4	3.748	2.699	2.252	-0.522	5.477
30.0 35.0	2	5.339	3.949	2.541	-0.252	5.333
45.0 50.0	1	-	-	6.122	6.122	6.122
50.0 55.0	1	-	-	2.206	2.206	2.206

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	1.911	0.020	3.578	0.130		0.363
STDEV	1.946	0.019	2.704	0.125		0.350

ERROR DISTRIBUTION

Range	CUBIC		LINEAR	
	NE.pts	%	NE.pts	%
0.0m - 1.0m	472	43.6%	458	42.3%
1.0m - 2.0m	317	29.3%	304	28.1%
2.0m - 5.0m	242	22.3%	267	24.7%
5.0m - 10.0m	47	4.3%	49	4.5%
10.0m - 15.0m	4	0.4%	4	0.4%
15.0m - 15.8m	1	0.1%	1	0.1%

Izveštaj E-23 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina tačaka poligonske mreže grada Beograda za područje Sopota



**Valjevo 1**

**DOF5 - visinske linije**

**DMT25 - CFDT=da, MCS=10m, DL=VS, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10m, SPLINE=ne, RTSDV=1m, ITER=5, KOTE=ne, odstranjene grube greške preko 20m**

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
11.915	14671	4.574	3.968	-2.121	-19.902	15.063
-----						
0.0 5.0	1933	3.309	3.154	-0.999	-15.700	8.980
5.0 10.0	4719	3.818	3.520	-1.480	-18.284	8.421
10.0 15.0	4191	4.549	3.889	-2.359	-18.040	9.779
15.0 20.0	2081	5.422	4.518	-2.997	-19.343	10.327
20.0 25.0	981	6.124	5.191	-3.248	-19.902	15.063
25.0 30.0	441	6.287	5.214	-3.508	-19.596	8.789
30.0 35.0	198	6.346	5.079	-3.795	-18.210	8.083
35.0 40.0	78	7.460	5.682	-4.803	-17.303	8.505
40.0 45.0	30	7.620	6.063	-4.538	-15.834	5.609
45.0 50.0	10	5.135	4.566	-2.229	-10.571	4.919
50.0 55.0	6	12.799	7.085	-9.730	-19.133	-1.189
55.0 60.0	1	-	-	-2.297	-2.297	-2.297
60.0 65.0	1	-	-	4.768	4.768	4.768
75.0 80.0	1	-	-	-4.965	-4.965	-4.965

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	3.077	0.004	6.523	0.015	0.247	
STDEV	2.995	0.003	4.303	0.011	0.185	

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
11.962	14671	4.606	3.989	-2.156	-19.825	14.930
-----						
0.0 5.0	1933	3.381	3.208	-1.067	-16.040	8.967
5.0 10.0	4719	3.869	3.560	-1.517	-18.245	8.294
10.0 15.0	4191	4.586	3.916	-2.386	-18.603	10.184
15.0 20.0	2081	5.434	4.509	-3.033	-19.635	10.242
20.0 25.0	981	6.124	5.180	-3.265	-19.825	14.930
25.0 30.0	441	6.287	5.196	-3.535	-19.331	8.583
30.0 35.0	198	6.330	5.037	-3.823	-17.855	7.980
35.0 40.0	78	7.423	5.657	-4.776	-17.078	8.418
40.0 45.0	30	7.556	6.046	-4.456	-15.206	5.669
45.0 50.0	10	5.343	4.754	-2.314	-10.706	5.491
50.0 55.0	6	12.525	6.822	-9.589	-18.981	-1.454
55.0 60.0	1	-	-	-2.267	-2.267	-2.267
60.0 65.0	1	-	-	4.743	4.743	4.743
75.0 80.0	1	-	-	-5.310	-5.310	-5.310

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	3.149	0.004	6.362	0.014	0.238	
STDEV	3.053	0.003	4.144	0.011	0.177	

ERROR DISTRIBUTION

Range	CUBIC		LINEAR	
	NE.pts	%	NE.pts	%
0.0m - 1.0m	3356	22.9%	3273	22.3%
1.0m - 2.0m	2896	19.7%	2856	19.5%
2.0m - 5.0m	5112	34.8%	5136	35.0%
5.0m - 10.0m	2626	17.9%	2722	18.6%
10.0m - 15.0m	568	3.9%	573	3.9%
15.0m - 19.9m	113	0.8%	111	0.8%

Izveštaj E-24 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina tačaka visinskih linija dobijenih iz DOF5 za područje Valjevo 1

**Valjevo 1**

**DOF5 - visinske tačke**

**DMT25 - CFDT=da, MCS=10m, DL=VS, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10m, SPLINE=ne, RTSDV=1m, ITER=5, KOTE=ne, odstranjene grube greške preko 20m**

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
13.361	28550	3.440	3.426	-0.112	-19.539	18.673
-----						
0.0 5.0	2434	2.470	2.436	0.408	-13.300	17.591
5.0 10.0	7065	2.654	2.650	0.154	-17.791	13.175
10.0 15.0	9129	3.174	3.171	-0.137	-18.363	18.673
15.0 20.0	5641	3.760	3.748	-0.298	-17.490	15.629
20.0 25.0	2571	4.451	4.430	-0.430	-19.539	16.227
25.0 30.0	1046	5.249	5.180	-0.848	-18.448	16.937
30.0 35.0	429	5.733	5.704	-0.577	-18.413	14.423
35.0 40.0	140	6.040	6.005	-0.656	-16.972	16.987
40.0 45.0	64	5.347	5.280	-0.834	-14.679	13.143
45.0 50.0	18	5.720	5.719	-0.076	-10.238	12.227
50.0 55.0	10	4.363	3.624	2.305	-1.336	8.158
55.0 60.0	3	8.341	7.903	2.179	-4.059	11.066

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	2.014	0.002	5.516	0.008		0.183
STDEV	2.017	0.002	5.453	0.008		0.184

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
13.283	28550	3.415	3.403	-0.054	-19.440	18.178
-----						
0.0 5.0	2434	2.506	2.469	0.428	-13.271	17.402
5.0 10.0	7065	2.658	2.650	0.211	-17.793	12.959
10.0 15.0	9129	3.160	3.159	-0.081	-19.253	18.178
15.0 20.0	5641	3.710	3.703	-0.229	-17.346	15.559
20.0 25.0	2571	4.390	4.375	-0.358	-19.440	15.797
25.0 30.0	1046	5.198	5.140	-0.771	-18.134	16.894
30.0 35.0	429	5.667	5.645	-0.499	-18.529	14.542
35.0 40.0	140	5.982	5.949	-0.624	-16.631	16.931
40.0 45.0	64	5.238	5.184	-0.744	-14.938	12.640
45.0 50.0	18	5.632	5.632	0.005	-9.948	12.346
50.0 55.0	10	4.214	3.380	2.387	-1.359	7.213
55.0 60.0	3	7.724	7.330	1.990	-3.206	10.374

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	2.042	0.002	5.320	0.008		0.184
STDEV	2.040	0.002	5.282	0.008		0.186

ERROR DISTRIBUTION

Range	CUBIC		LINEAR	
	NE.pts	%	NE.pts	%
0.0m - 1.0m	8204	28.7%	8126	28.5%
1.0m - 2.0m	6840	24.0%	6884	24.1%
2.0m - 5.0m	10035	35.1%	10114	35.4%
5.0m - 10.0m	2987	10.5%	2966	10.4%
10.0m - 15.0m	428	1.5%	410	1.4%
15.0m - 19.5m	56	0.2%	50	0.2%

Izveštaj E-25 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina visinskih tačaka dobijenih iz DOF5 za područje Valjevo 1



**Valjevo 2**

**DOF5 - visinske linije**

**DMT25 - CFDT=da, MCS=10m, DL=VS, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10m, SPLINE=ne, RTSDV=1m, ITER=5, KOTE=da**

CUBIC interpolation statistics							
Slope		No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
12.414		12030	4.449	3.943	-1.834	-23.729	22.188
-----							
0.0	5.0	1513	2.582	2.547	-0.424	-13.275	8.461
5.0	10.0	3804	3.450	3.195	-1.301	-19.349	22.188
10.0	15.0	3236	4.319	3.854	-1.949	-19.596	11.795
15.0	20.0	1828	5.202	4.611	-2.409	-22.182	14.118
20.0	25.0	871	6.064	5.375	-2.807	-23.351	13.796
25.0	30.0	435	6.769	5.572	-3.839	-20.440	10.605
30.0	35.0	185	8.166	6.629	-4.755	-21.224	11.990
35.0	40.0	97	6.973	5.638	-4.082	-23.729	10.052
40.0	45.0	39	8.464	5.813	-6.072	-17.654	9.491
45.0	50.0	14	8.426	4.910	-6.598	-14.660	4.189
50.0	55.0	2	9.622	3.154	-6.428	-8.658	-4.198
55.0	60.0	4	8.704	4.148	-6.627	-9.835	-0.714
70.0	75.0	2	11.181	9.770	-3.845	-10.753	3.064

LINEAR REGRESSION						
	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	2.526	0.006	7.785	0.021	0.354	
STDEV	2.567	0.006	5.635	0.021	0.360	

LINEAR interpolation statistics							
Slope		No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
12.341		12030	4.477	3.979	-1.823	-23.324	21.879
-----							
0.0	5.0	1513	2.638	2.611	-0.378	-13.436	8.181
5.0	10.0	3804	3.503	3.257	-1.289	-19.524	21.879
10.0	15.0	3236	4.348	3.882	-1.958	-19.534	11.693
15.0	20.0	1828	5.223	4.643	-2.390	-21.951	13.901
20.0	25.0	871	6.073	5.396	-2.786	-23.324	13.794
25.0	30.0	435	6.770	5.575	-3.836	-20.181	10.757
30.0	35.0	185	8.169	6.626	-4.765	-21.392	11.827
35.0	40.0	97	6.994	5.650	-4.101	-22.909	10.115
40.0	45.0	39	8.394	5.783	-6.006	-17.622	9.240
45.0	50.0	14	8.352	4.848	-6.554	-14.355	4.132
50.0	55.0	2	9.374	2.784	-6.329	-8.298	-4.361
55.0	60.0	4	8.760	4.118	-6.696	-10.186	-0.924
70.0	75.0	2	10.992	9.817	-3.496	-10.438	3.446

LINEAR REGRESSION						
	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	2.586	0.006	7.672	0.021	0.350	
STDEV	2.633	0.006	5.521	0.021	0.357	

ERROR DISTRIBUTION					
CUBIC			LINEAR		
Range	NE.pts	%	NE.pts	%	
0.0m - 1.0m	2906	24.2%	2888	24.0%	
1.0m - 2.0m	2529	21.0%	2456	20.4%	
2.0m - 5.0m	4049	33.7%	4068	33.8%	
5.0m - 10.0m	2068	17.2%	2129	17.7%	
10.0m - 15.0m	387	3.2%	399	3.3%	
15.0m - 20.0m	78	0.6%	79	0.7%	
20.0m - 23.7m	13	0.1%	11	0.1%	

Izveštaj E-26 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina tačaka visinskih linija dobijenih iz DOF5 za područje Valjevo 2

**Valjevo 2**

**DOF5 - visinske tačke**

**DMT25 - CFDT=da, MCS=10m, DL=VS, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10m, SPLINE=ne, RTSDV=1m, ITER=5, KOTE=da**

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
12.679	27261	4.071	3.956	-0.891	-27.083	28.205
-----						
0.0 5.0	2824	2.432	2.430	-0.096	-22.019	12.372
5.0 10.0	8014	2.994	2.918	-0.670	-22.230	22.687
10.0 15.0	7963	4.013	3.851	-1.127	-22.657	23.352
15.0 20.0	4752	4.667	4.540	-1.082	-25.559	28.205
20.0 25.0	2217	5.429	5.269	-1.308	-22.170	21.105
25.0 30.0	915	6.427	6.354	-0.963	-23.387	24.356
30.0 35.0	360	6.894	6.722	-1.527	-27.083	18.379
35.0 40.0	130	7.513	7.411	-1.226	-23.434	19.202
40.0 45.0	50	7.527	7.464	-0.964	-24.326	17.850
45.0 50.0	24	7.307	7.165	1.404	-22.733	12.147
50.0 55.0	8	1.809	1.787	-0.262	-3.831	1.409
55.0 60.0	4	6.780	3.383	-5.089	-8.376	-0.495

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	2.166	0.003	7.663	0.012		0.276
STDEV	2.109	0.003	7.427	0.012		0.276

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
12.560	27261	4.004	3.910	-0.790	-26.900	28.191
-----						
0.0 5.0	2824	2.418	2.418	-0.021	-21.880	12.138
5.0 10.0	8014	2.955	2.900	-0.569	-21.903	22.547
10.0 15.0	7963	3.941	3.802	-1.037	-22.447	23.341
15.0 20.0	4752	4.588	4.484	-0.974	-26.900	28.191
20.0 25.0	2217	5.322	5.189	-1.181	-22.351	20.880
25.0 30.0	915	6.310	6.257	-0.820	-23.186	24.400
30.0 35.0	360	6.786	6.645	-1.374	-25.979	17.821
35.0 40.0	130	7.442	7.365	-1.064	-23.228	19.047
40.0 45.0	50	7.405	7.359	-0.809	-24.161	16.949
45.0 50.0	24	7.197	7.032	1.498	-21.854	11.831
50.0 55.0	8	1.936	1.855	-0.518	-4.200	1.499
55.0 60.0	4	6.317	3.238	-4.698	-8.254	-0.511

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	2.145	0.003	7.481	0.012		0.266
STDEV	2.102	0.003	7.273	0.012		0.267

ERROR DISTRIBUTION

Range	CUBIC		LINEAR	
	NE.pts	%	NE.pts	%
0.0m - 1.0m	7307	26.8%	7322	26.9%
1.0m - 2.0m	5819	21.3%	5960	21.9%
2.0m - 5.0m	9621	35.3%	9642	35.4%
5.0m - 10.0m	3682	13.5%	3544	13.0%
10.0m - 15.0m	658	2.4%	633	2.3%
15.0m - 20.0m	137	0.5%	123	0.5%
20.0m - 25.0m	33	0.1%	33	0.1%
25.0m - 28.2m	4	0.0%	4	0.0%

Izveštaj E-27 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina visinskih tačaka dobijenih iz DOF5 za područje Valjevo 2



Vrčin

ODK5 - izohipse

DMT25 - CFDT=ne, MCS=10m, DL=VS, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10m, SPLINE=ne, RTSDV=1m, ITER=5, KOTE=da

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
9.040	22741	2.579	2.572	-0.150	-14.453	10.873
-----						
0.0 5.0	5406	2.060	2.056	-0.131	-11.062	10.562
5.0 10.0	10043	2.429	2.425	-0.149	-14.180	10.802
10.0 15.0	4183	2.806	2.795	-0.250	-14.453	9.419
15.0 20.0	1841	3.260	3.259	0.065	-13.040	10.873
20.0 25.0	775	3.404	3.394	-0.250	-11.307	9.989
25.0 30.0	306	3.925	3.924	-0.070	-14.109	8.953
30.0 35.0	118	3.530	3.530	0.042	-8.939	9.984
35.0 40.0	41	4.405	4.404	-0.033	-12.498	9.642
40.0 45.0	10	5.348	4.357	-2.941	-9.687	2.202
45.0 50.0	9	5.089	5.004	-0.872	-5.822	9.635
50.0 55.0	5	6.803	3.461	-5.238	-9.490	-0.607
55.0 60.0	1	-	-	-4.305	-4.305	-4.305
60.0 65.0	1	-	-	-1.226	-1.226	-1.226
65.0 70.0	1	-	-	-1.810	-1.810	-1.810
80.0 85.0	1	-	-	-1.384	-1.384	-1.384

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	1.937	0.001	3.749	0.005	0.080	
STDEV	1.946	0.001	3.653	0.006	0.097	

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
8.920	22741	2.561	2.554	-0.142	-14.379	10.768
-----						
0.0 5.0	5406	2.070	2.066	-0.128	-11.181	10.577
5.0 10.0	10043	2.428	2.424	-0.134	-14.176	10.381
10.0 15.0	4183	2.785	2.773	-0.255	-14.379	9.380
15.0 20.0	1841	3.186	3.185	0.060	-12.647	10.768
20.0 25.0	775	3.314	3.306	-0.235	-11.336	9.884
25.0 30.0	306	3.789	3.788	-0.062	-14.059	8.415
30.0 35.0	118	3.510	3.504	0.212	-8.888	9.610
35.0 40.0	41	4.222	4.219	0.165	-11.287	9.583
40.0 45.0	10	5.146	4.207	-2.811	-9.436	2.044
45.0 50.0	9	5.027	4.947	-0.842	-5.370	9.338
50.0 55.0	5	6.711	3.095	-5.326	-9.122	-1.044
55.0 60.0	1	-	-	-4.121	-4.121	-4.121
60.0 65.0	1	-	-	-1.046	-1.046	-1.046
65.0 70.0	1	-	-	-1.292	-1.292	-1.292
80.0 85.0	1	-	-	-1.694	-1.694	-1.694

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	1.964	0.001	3.501	0.004	0.073	
STDEV	1.974	0.001	3.399	0.005	0.091	

ERROR DISTRIBUTION

Range	CUBIC		LINEAR	
	NE.pts	%	NE.pts	%
0.0m - 1.0m	8882	39.1%	8919	39.2%
1.0m - 2.0m	5675	25.0%	5623	24.7%
2.0m - 5.0m	6855	30.1%	6902	30.4%
5.0m - 10.0m	1249	5.5%	1222	5.4%
10.0m - 14.5m	80	0.4%	75	0.3%

Izveštaj E-28 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina tačaka izohipsi digitalizovanih sa ODK5 za područje Vrčina

**Vrčin**

**DOF5 - visinske tačke**

**DMT25 - CFDT=ne, MCS=10m, DL=VS, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10m, SPLINE=ne, RTSDV=1m, ITER=5, KOTE=da**

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
8.124	8061	3.154	3.123	-0.036	-18.108	24.428
-----						
0.0 5.0	2793	2.629	2.609	-0.329	-16.894	14.831
5.0 10.0	2942	2.846	2.846	-0.042	-18.108	13.576
10.0 15.0	1355	3.329	3.328	0.066	-17.231	14.044
15.0 20.0	558	4.067	4.065	0.113	-10.044	24.428
20.0 25.0	251	5.069	4.869	1.407	-12.549	18.544
25.0 30.0	108	5.876	5.784	1.030	-11.554	15.875
30.0 35.0	38	6.810	6.568	1.776	-8.085	19.880
35.0 40.0	9	5.931	4.177	3.970	-1.875	10.716
40.0 45.0	3	12.968	12.954	0.492	-13.840	11.368
45.0 50.0	2	6.955	3.765	4.135	1.473	6.797
50.0 55.0	1	-	-	8.142	8.142	8.142
60.0 65.0	1	-	-	16.132	16.132	16.132

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	2.191	0.004	6.020	0.022		0.218
STDEV	2.217	0.004	5.711	0.022		0.223

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
8.032	8061	3.151	3.120	0.000	-18.028	24.146
-----						
0.0 5.0	2793	2.641	2.623	-0.304	-16.868	14.762
5.0 10.0	2942	2.856	2.856	0.003	-18.028	13.691
10.0 15.0	1355	3.315	3.314	0.088	-16.968	13.813
15.0 20.0	558	4.031	4.027	0.181	-9.955	24.146
20.0 25.0	251	5.021	4.807	1.450	-12.069	18.216
25.0 30.0	108	5.833	5.726	1.105	-11.381	15.492
30.0 35.0	38	6.744	6.488	1.816	-8.435	19.884
35.0 40.0	9	5.966	4.112	4.075	-1.481	10.234
40.0 45.0	3	12.941	12.898	0.865	-13.331	11.864
45.0 50.0	2	7.367	3.884	4.426	1.680	7.173
50.0 55.0	1	-	-	8.518	8.518	8.518
60.0 65.0	1	-	-	15.636	15.636	15.636

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	2.211	0.004	5.886	0.021		0.215
STDEV	2.243	0.004	5.536	0.022		0.219

ERROR DISTRIBUTION

Range	CUBIC		LINEAR	
	NE.pts	%	NE.pts	%
0.0m - 1.0m	2312	28.7%	2342	29.1%
1.0m - 2.0m	2021	25.1%	1972	24.5%
2.0m - 5.0m	2950	36.6%	2970	36.8%
5.0m - 10.0m	704	8.7%	705	8.7%
10.0m - 15.0m	59	0.7%	57	0.7%
15.0m - 20.0m	14	0.2%	14	0.2%
20.0m - 24.4m	1	0.0%	1	0.0%

Izveštaj E-29 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina visinskih tačaka dobijenih iz DOF5 za područje Vrčina



**Vrčin**

**PM - poligonska mreža grada Beograda**

**DMT25 - CFDT=ne, MCS=10m, DL=VS, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10m, SPLINE=ne, RTSDV=1m, ITER=5, KOTE=da**

CUBIC interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
6.793	598	2.763	2.712	0.257	-9.104	10.301
0.0 5.0	238	2.635	2.620	-0.276	-7.219	7.271
5.0 10.0	242	2.765	2.709	0.555	-7.647	10.301
10.0 15.0	78	2.628	2.529	0.710	-5.587	8.070
15.0 20.0	30	3.889	3.851	0.534	-9.104	9.976
20.0 25.0	7	3.512	3.151	1.436	-2.581	5.495
25.0 30.0	2	2.779	2.758	-0.240	-2.191	1.710
30.0 35.0	1	-	-	4.073	4.073	4.073

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	2.493	0.015	2.194	0.102		0.212
STDEV	2.490	0.016	1.821	0.110		0.227

LINEAR interpolation statistics

Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum
6.848	598	2.807	2.747	0.326	-8.771	10.530
0.0 5.0	238	2.665	2.656	-0.222	-6.813	7.281
5.0 10.0	242	2.807	2.738	0.621	-7.708	10.530
10.0 15.0	78	2.704	2.569	0.839	-5.356	8.039
15.0 20.0	30	3.957	3.907	0.618	-8.771	10.278
20.0 25.0	7	3.531	3.153	1.472	-2.513	5.191
25.0 30.0	2	3.222	3.198	-0.282	-2.543	1.979
30.0 35.0	1	-	-	4.122	4.122	4.122

LINEAR REGRESSION

	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr
RMSE	2.511	0.015	2.404	0.098		0.203
STDEV	2.515	0.016	1.910	0.110		0.227

ERROR DISTRIBUTION

Range	CUBIC		LINEAR	
	NE.pts	%	NE.pts	%
0.0m - 1.0m	183	30.6%	184	30.8%
1.0m - 2.0m	171	28.6%	157	26.3%
2.0m - 5.0m	195	32.6%	209	34.9%
5.0m - 10.0m	48	8.0%	46	7.7%
10.0m - 10.5m	1	0.2%	2	0.3%

Izveštaj E-30 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina tačaka poligonske mreže grada Beograda za područje Vrčina

E.3 Upoređenje visina interpolovanih iz DMT25 sa visinama dobijenim iz DOF5, TP1, ODK5 i PM

Projekat	Izvor za kontrolne tačke	DMT25										Tip interpolacije	Prosečan nagib terena	Broj tačaka	Srednja kvadratna greška (RMSE) [m]	Standardna devijacija ( $\sigma$ ) [m]	Prosečna greška [m]	Minimalna greška [m]	Maksimalna greška [m]					
		CFDT	MCS [m]	DL	LB	LIH	LINK	MaxSDV [m]	SPLINE [m]	RTSDV [m]	ITER									KOTE				
Barajevo	DOF5 vis. tačke	+	10	VS	+	+	+	+	+	+	10	-	5	5	-	Kubna	7.786	3121	4.965	4.703	0.809	-40.719	27.042	
		+	10	VS	+	+	+	+	+	+	10	-	5	5	-	Linearna	7.524	3121	4.989	4.709	0.821	-40.749	27.147	
	DOF5 vis. tačke bez gr. greš.	+	10	VS	+	+	+	+	+	+	10	-	5	5	-	Kubna	7.763	3097	4.452	4.191	0.801	-19.793	19.553	
		+	10	VS	+	+	+	+	+	+	10	-	5	5	-	Linearna	7.500	3097	4.483	4.201	0.816	-20.008	19.117	
	ODK5 izohipse	+	10	VS	+	+	+	+	+	+	10	-	5	5	-	Kubna	8.934	307000	4.696	4.619	-0.653	-40.987	29.169	
		+	10	VS	+	+	+	+	+	+	10	-	5	5	-	Linearna	8.693	307000	4.723	4.648	-0.628	-41.033	29.257	
	ODK5 izohipse bez gr. greš.	+	10	VS	+	+	+	+	+	+	10	-	5	5	-	Kubna	8.989	303428	3.680	3.646	-0.399	-19.996	19.996	
		+	10	VS	+	+	+	+	+	+	10	-	5	5	-	Linearna	8.750	303428	3.704	3.672	-0.372	-23.010	20.634	
	ODK5 tačke	+	10	VS	+	+	+	+	+	+	10	-	5	5	-	Kubna	7.193	5054	4.545	4.346	-1.189	-20.478	24.082	
		+	10	VS	+	+	+	+	+	+	10	-	5	5	-	Linearna	6.555	5054	4.641	4.384	-1.406	-21.330	24.012	
	P M	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	5	-	Kubna	6.259	1221	2.444	2.351	0.558	-10.368	13.590
		+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	5	-	Linearna	5.476	1221	2.568	2.456	0.617	-11.665	12.063
	P M	+	10	VS	+	+	+	+	+	+	-	-	25	1	5	-	Kubna	5.955	1221	2.486	2.351	0.668	-9.756	13.802
		+	10	VS	+	+	+	+	+	+	-	-	25	1	5	-	Linearna	5.964	1221	2.501	2.340	0.734	-9.018	13.793
	P M	+	10	VS	+	+	+	+	+	+	-	-	-	1	5	-	Kubna	5.986	1221	2.493	2.360	0.662	-8.737	13.620
		+	10	VS	+	+	+	+	+	+	-	-	-	1	5	-	Linearna	5.981	1221	2.506	2.345	0.732	-8.163	13.793
P M	+	10	VS	+	+	+	+	+	+	10	-	5	5	-	Kubna	6.105	1221	2.445	2.348	0.558	-16.789	11.579		
	+	10	VS	+	+	+	+	+	+	10	-	5	5	-	Linearna	5.997	1221	2.481	2.350	0.659	-16.760	11.806		
P M	+	10	VS	+	+	+	+	+	+	10	-	5	5	-	Kubna	6.105	1221	2.445	2.348	0.558	-16.789	11.579		
	+	10	VS	+	+	+	+	+	+	10	-	5	5	-	Linearna	5.997	1221	2.481	2.350	0.659	-16.760	11.806		
P M	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Kubna	6.445	1221	2.899	2.689	0.788	-10.368	19.548	
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Linearna	5.430	1221	2.734	2.630	0.639	-17.850	13.463	
P M	-	-	EM	-	+	+	+	+	+	-	-	-	1	5	-	Kubna	6.136	1221	2.746	2.583	0.799	-10.053	17.064	
	-	-	EM	-	+	+	+	+	+	-	-	-	1	5	-	Linearna	6.172	1221	2.749	2.561	0.866	-9.963	17.063	
P M	-	-	ME	-	+	+	+	+	+	-	-	-	1	5	-	Kubna	6.064	1221	2.541	2.416	0.670	-9.912	13.230	
	-	-	ME	-	+	+	+	+	+	-	-	-	1	5	-	Linearna	6.083	1221	2.541	2.395	0.723	-9.791	12.916	









Projektat	Izvor za kontrolne tačke	DMT25										Tip interpolacije	Prosečan nagib terena	Broj tačaka	Srednja kvadratna greška (RMSE) [m]	Standardna devijacija ( $\sigma$ ) [m]	Prosečna greška [m]	Minimalna greška [m]	Maksimalna greška [m]			
		CFDT	MCS [m]	DL	LB	LIH	LINK	MaxSDV [m]	SPLINE [m]	RTSDV [m]	ITER									KOTE		
Lazarevac	DOF5 tačke bez gr. greš.	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	5	-	Kubna	7.467	6.136	5.808	-1.894	-29.982	29.932
	P M	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	5	-	Linearna	5.627	6.354	5.848	-2.406	-31.829	34.010
	P M	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Kubna	4.520	2.010	1.941	0.393	-11.590	20.908
	P M	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Linearna	3.748	2.052	1.973	0.520	-11.513	14.726
	P M	+	-	ME	+	+	+	+	+	+	+	+	1	5	+	Kubna	4.359	1.828	1.755	0.400	-11.964	14.625
	P M	+	-	ME	+	+	+	+	+	+	+	+	1	5	+	Linearna	4.383	1.845	1.762	0.433	-11.513	14.726
	P M	+	-	ME	+	+	+	+	+	+	+	+	1	5	-	Kubna	4.359	1.828	1.755	0.400	-11.964	14.625
	P M	+	-	ME	+	+	+	+	+	+	+	+	1	5	-	Linearna	4.383	1.844	1.762	0.433	-11.513	14.726
	P M	+	10	VS	+	-	+	+	+	+	+	+	1	5	+	Kubna	4.372	1.973	1.886	0.499	-11.801	14.616
	P M	+	10	VS	+	-	+	+	+	+	+	+	1	5	+	Linearna	4.330	1.980	1.881	0.538	-11.513	14.726
	P M	+	10	VS	+	-	+	+	+	+	+	+	1	5	-	Kubna	4.373	1.972	1.886	0.498	-11.801	14.616
	P M	+	10	VS	+	-	+	+	+	+	+	+	1	5	-	Linearna	4.332	1.979	1.880	0.536	-11.513	14.726
	P M	+	10	VS	+	+	+	+	+	+	+	+	1	5	+	Kubna	4.322	1.778	1.703	0.430	-11.974	14.616
	P M	+	10	VS	+	+	+	+	+	+	+	+	1	5	+	Linearna	4.256	1.801	1.712	0.478	-11.513	14.726
	P M	+	10	VS	+	+	+	+	+	+	+	+	1	5	-	Kubna	4.323	1.778	1.703	0.429	-11.974	14.616
	P M	+	10	VS	+	+	+	+	+	+	+	+	1	5	-	Linearna	4.258	1.799	1.710	0.476	-11.513	14.726
P M	+	10	VS	+	+	+	+	+	+	+	+	10	5	+	Kubna	4.304	1.816	1.762	0.332	-11.801	14.616	
P M	+	10	VS	+	+	+	+	+	+	+	+	10	5	+	Linearna	4.256	1.854	1.783	0.411	-11.513	14.726	
P M	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Kubna	4.514	1.987	1.924	0.388	-11.590	20.908	
P M	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Linearna	3.748	2.053	1.972	0.520	-11.513	14.726	
P M	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Kubna	4.518	2.010	1.945	0.393	-11.590	20.908	
P M	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Linearna	3.748	2.053	1.972	0.520	-11.513	14.726	

Projekat	Izvor za kontrolne tačke	DMT25										Tip interpolacije	Prosečan nagib terena	Broj tačaka	Srednja kvadratna greška (RMSE) [m]	Standardna devijacija ( $\sigma$ ) [m]	Prosečna greška [m]	Minimalna greška [m]	Maksimalna greška [m]			
		CFDT	MCS [m]	DL	LB	LIH	LINK	MaxSDV [m]	SPLINE [m]	RTSDV [m]	ITER									KOTE		
Novi Pazar	DOF5 vis. linije	+	10	VS	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	12.033	20150	4.505	4.192	-1.580	-27.731	25.446
		+	10	VS	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	12.036	20150	4.546	4.231	-1.591	-27.878	25.412
	DOF5 vis. linije	+	10	VS	+	+	+	+	+	10	5	5	5	5	5	12.000	20150	4.635	4.324	-1.573	-27.731	37.780
		+	10	VS	+	+	+	+	+	10	5	5	5	5	5	11.951	20150	4.676	4.363	-1.585	-27.878	37.780
	DOF5 vis. tačke bez gr. greš.	+	10	VS	+	+	+	+	+	10	5	5	5	5	5	13.145	30095	4.471	3.953	-1.997	-19.884	19.695
		+	10	VS	+	+	+	+	+	10	5	5	5	5	5	13.066	30095	4.446	3.946	-1.958	-20.028	21.340
Novi Pazar	DOF5 vis. tačke	+	10	VS	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	13.170	30234	4.666	4.184	-1.965	-30.726	53.134
		+	10	VS	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	13.131	30234	4.633	4.165	-1.931	-30.518	53.194
	DOF5 vis. tačke	+	10	VS	+	+	+	+	+	10	5	5	5	5	5	13.117	30234	4.862	4.406	-1.900	-30.726	63.048
		+	10	VS	+	+	+	+	+	10	5	5	5	5	5	13.033	30234	4.841	4.402	-1.860	-30.518	62.945
	ODK5 izohipse	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6.393	306476	2.855	2.809	0.021	-21.754	28.224
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6.092	306476	2.854	2.803	0.072	-21.472	20.865
Pancevo	DOF5 vis. tačke	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.705	174684	1.778	1.772	-0.092	-20.271	27.197
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.541	174684	1.727	1.722	-0.097	-20.199	20.614
	ODK5 kofe	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.696	15098	2.646	2.615	0.258	-16.377	17.228
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.067	15098	2.595	2.564	0.226	-14.910	17.154
	DOF5 vis. tačke	+	-	EM	+	+	+	+	+	-	-	1	1	5	5	5.307	2144	3.209	3.182	0.311	-14.188	30.138
		+	-	EM	+	+	+	+	+	-	-	1	1	5	5	5.447	2144	3.221	3.194	0.323	-13.344	30.477
Sopot	DOF5 vis. tačke	+	10	VS	+	+	+	+	+	10	5	5	5	5	4.565	2144	2.847	2.800	-0.410	-14.162	14.474	
		+	10	VS	+	+	+	+	+	10	5	5	5	5	4.671	2144	2.874	2.833	-0.372	-13.034	14.541	
	DOF5 vis. tačke	+	10	VS	-	+	+	+	+	-	-	1	1	5	5	5.123	2144	2.696	2.649	0.140	-14.166	14.908
		+	10	VS	-	+	+	+	+	-	-	1	1	5	5	5.151	2144	2.714	2.668	0.145	-13.135	14.803
	DOF5 vis. tačke	+	10	VS	-	+	+	+	+	-	-	1	1	5	5	5.123	2144	2.696	2.649	0.140	-14.166	14.908
		+	10	VS	-	+	+	+	+	-	-	1	1	5	5	5.151	2144	2.714	2.668	0.145	-13.135	14.803
Sopot	DOF5 vis. tačke	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.228	2144	3.319	3.139	0.400	-14.162	31.334	
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.076	2144	3.306	3.258	-0.214	-15.700	13.900	
	DOF5 vis. tačke	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.300	2144	3.465	3.292	0.402	-14.162	31.334	
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.881	2144	3.396	3.352	-0.145	-15.700	13.900	
	DOF5 vis. tačke	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



Projekat	Izvor za kontrolne tačke	DMT25										Tip interpolacije	Prosečan nagib terena	Broj tačaka	Srednja kvadratna greška (RMSE) [m]	Standardna devijacija ( $\sigma$ ) [m]	Prosečna greška [m]	Minimalna greška [m]	Maksimalna greška [m]			
		CFDT	MCS [m]	DL	LB	LIH	LINK	MaxSDV [m]	SPLINE [m]	RTSDV [m]	ITER									KOTE		
	ODK5 izohipse	+	10	VS	+	+	+	+	+	10	-	5	5	+	Kubna	10.611	547185	3.132	3.108	-0.276	-25.584	20.520
		+	10	VS	+	+	+	+	+	10	-	5	5	+	Linearna	10.471	547185	3.115	3.094	-0.230	-25.624	19.753
	P M	+	-	EM	+	+	+	+	+	-	-	1	5	+	Kubna	7.300	1083	2.430	2.348	0.551	-7.639	15.809
		+	-	EM	+	+	+	+	+	-	-	1	5	+	Linearna	7.364	1083	2.442	2.340	0.638	-7.405	15.725
	P M	+	-	EM	+	+	+	+	+	-	-	1	5	-	Kubna	7.304	1083	2.431	2.350	0.554	-7.639	15.809
		+	-	EM	+	+	+	+	+	-	-	1	5	-	Linearna	7.368	1083	2.445	2.343	0.642	-7.405	15.725
	P M	+	-	ME	+	+	+	+	+	-	-	1	5	+	Kubna	7.287	1083	2.369	2.285	0.558	-7.773	15.809
		+	-	ME	+	+	+	+	+	-	-	1	5	+	Linearna	7.308	1083	2.392	2.288	0.637	-7.774	15.725
	P M	+	-	ME	+	+	+	+	+	-	-	1	5	-	Kubna	7.292	1083	2.369	2.284	0.561	-7.773	15.809
		+	-	ME	+	+	+	+	+	-	-	1	5	-	Linearna	7.310	1083	2.393	2.288	0.640	-7.774	15.725
	P M	+	10	VS	+	+	+	+	+	-	-	1	5	+	Kubna	7.283	1083	2.329	2.249	0.536	-7.915	15.809
		+	10	VS	+	+	+	+	+	-	-	1	5	+	Linearna	7.235	1083	2.363	2.261	0.627	-7.726	15.725
	P M	+	10	VS	+	+	+	+	+	-	-	1	5	-	Kubna	7.742	1083	2.323	2.251	0.504	-8.175	15.814
		+	10	VS	+	+	+	+	+	-	-	1	5	-	Linearna	7.233	1083	2.356	2.257	0.619	-7.726	15.529
	P M	+	10	VS	+	+	+	+	+	-	25	1	5	+	Kubna	7.261	1083	2.324	2.243	0.541	-7.915	15.809
		+	10	VS	+	+	+	+	+	-	25	1	5	+	Linearna	7.262	1083	2.355	2.249	0.633	-7.726	15.725
	P M	+	10	VS	+	+	+	+	+	-	25	1	5	-	Kubna	7.269	1083	2.326	2.244	0.543	-7.915	15.809
		+	10	VS	+	+	+	+	+	-	25	1	5	-	Linearna	7.263	1083	2.356	2.250	0.635	-7.726	15.725
	P M	+	10	VS	+	+	+	+	+	10	-	5	5	+	Kubna	7.269	1083	2.353	2.296	0.424	-7.988	15.809
		+	10	VS	+	+	+	+	+	10	-	5	5	+	Linearna	7.225	1083	2.407	2.319	0.559	-7.924	15.725
	P M	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	Kubna	7.444	1083	2.464	2.397	0.495	-7.915	15.809
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	Linearna	6.596	1083	2.559	2.434	0.720	-8.440	15.725
	P M	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Kubna	7.470	1083	2.476	2.412	0.489	-7.915	15.809
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Linearna	6.546	1083	2.577	2.451	0.729	-8.440	15.725







Projekat	Izvor za kontrolne tačke	DMT25										Tip interpolacije	Prosečan nagib terena	Broj tačaka	Srednja kvadratna greška (RMSE) [m]	Standardna devijacija ( $\sigma$ ) [m]	Prosečna greška [m]	Minimalna greška [m]	Maksimalna greška [m]				
		CFDT	MCS [m]	DL	LB	LIH	LINK	MaxSDV [m]	SPLINE [m]	RTSDV [m]	ITER									KOTE			
Valjevo 2	DOF5 vis. tačke	+	-	EM	+	+	+	+	+	-	-	1	5	-	Kubna	12.577	27261	4.121	4.019	-0.828	-26.742	29.234	
	DOF5 vis. tačke	+	-	EM	+	+	+	+	+	-	-	1	5	-	Linearna	12.532	27261	4.068	3.979	-0.763	-26.794	29.071	
	DOF5 vis. tačke	+	10	VS	+	+	+	+	+	-	-	1	5	+	Kubna	12.679	27261	4.071	3.956	-0.891	-27.083	28.205	
	DOF5 vis. tačke	+	10	VS	+	+	+	+	+	-	-	1	5	+	Linearna	12.560	27261	4.004	3.910	-0.790	-26.900	28.191	
	DOF5 vis. tačke	+	10	VS	+	+	+	+	+	-	-	1	5	-	Kubna	12.560	27261	4.053	3.943	-0.858	-26.491	26.904	
	DOF5 vis. tačke	+	10	VS	+	+	+	+	+	-	-	1	5	-	Linearna	12.492	27261	3.996	3.902	-0.784	-26.936	26.966	
	DOF5 vis. tačke	+	10	VS	+	+	+	+	+	-	-	1	5	-	Kubna	12.494	27261	3.995	3.873	-0.917	-26.491	25.916	
	DOF5 vis. tačke	+	10	VS	+	+	+	+	+	-	-	1	5	-	Linearna	12.423	27261	3.938	3.833	-0.842	-26.936	25.624	
	ODK5 izohipse	-	10	VS	+	+	+	+	+	+	10	-	1	5	+	Kubna	9.040	22741	2.579	2.572	-0.150	-14.453	10.873
	DOF5 vis. tačke	-	10	VS	+	+	+	+	+	+	10	-	1	5	+	Linearna	8.920	22741	2.561	2.554	-0.142	-14.379	10.768
Vrčin	DOF5 vis. tačke	-	10	VS	+	+	+	+	+	10	-	1	5	+	Kubna	8.124	8061	3.154	3.123	-0.036	-18.108	24.428	
	DOF5 vis. tačke	-	10	VS	+	+	+	+	+	10	-	1	5	+	Linearna	8.032	8061	3.151	3.120	0.000	-18.028	24.146	
	P M	-	-	ME	-	+	+	+	+	-	25	-	-	-	Kubna	7.128	598	2.891	2.792	0.741	-9.093	17.234	
	P M	-	-	ME	-	+	+	+	+	-	25	-	-	-	Linearna	7.264	598	2.912	2.809	0.753	-8.771	17.286	
	P M	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Kubna	7.588	598	3.285	3.082	0.932	-8.993	22.809	
	P M	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Linearna	6.227	598	3.163	3.123	0.417	-8.914	10.530	
	P M	-	10	VS	-	-	+	+	+	+	-	25	-	-	Kubna	7.234	598	2.929	2.807	0.793	-9.089	17.247	
	P M	-	10	VS	-	-	+	+	+	+	-	25	-	-	Linearna	7.255	598	2.953	2.820	0.827	-8.771	17.098	
	P M	-	-	EM	-	+	+	+	+	+	-	25	1	5	-	Kubna	7.344	598	3.007	2.872	0.831	-8.927	19.625
	P M	-	-	EM	-	+	+	+	+	+	-	25	1	5	-	Linearna	7.409	598	3.013	2.875	0.851	-8.771	19.629
P M	DOF5 vis. tačke	-	-	ME	-	+	+	+	+	-	25	1	5	-	Kubna	7.196	598	2.887	2.788	0.741	-9.093	17.013	
	DOF5 vis. tačke	-	-	ME	-	+	+	+	+	-	25	1	5	-	Linearna	7.290	598	2.903	2.801	0.753	-8.771	17.035	
	DOF5 vis. tačke	-	10	VS	+	+	+	+	+	10	-	1	5	+	Kubna	6.793	598	2.763	2.712	0.257	-9.104	10.301	
	DOF5 vis. tačke	-	10	VS	+	+	+	+	+	10	-	1	5	+	Linearna	6.848	598	2.807	2.747	0.326	-8.771	10.530	

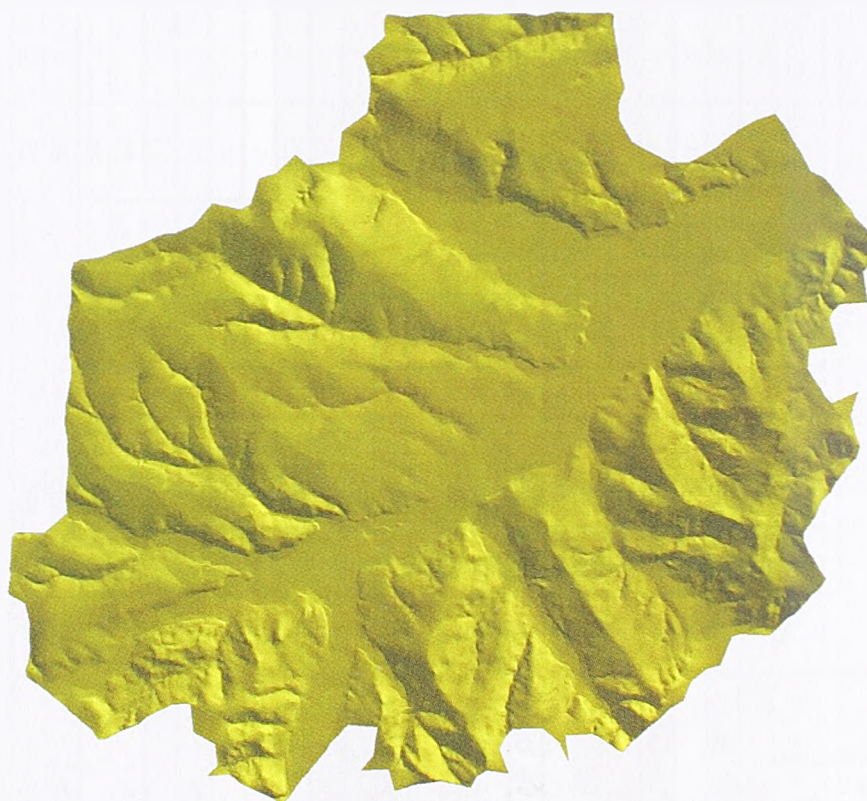
Tabela E-1 : Upoređenje visina interpolovanih iz DMT25 iz visina dobijenih iz DOF5, TP1, ODK5 i PM



### E.2.3 Grafički prikaz rezultata formiranja DMT25 za izabrane projekte



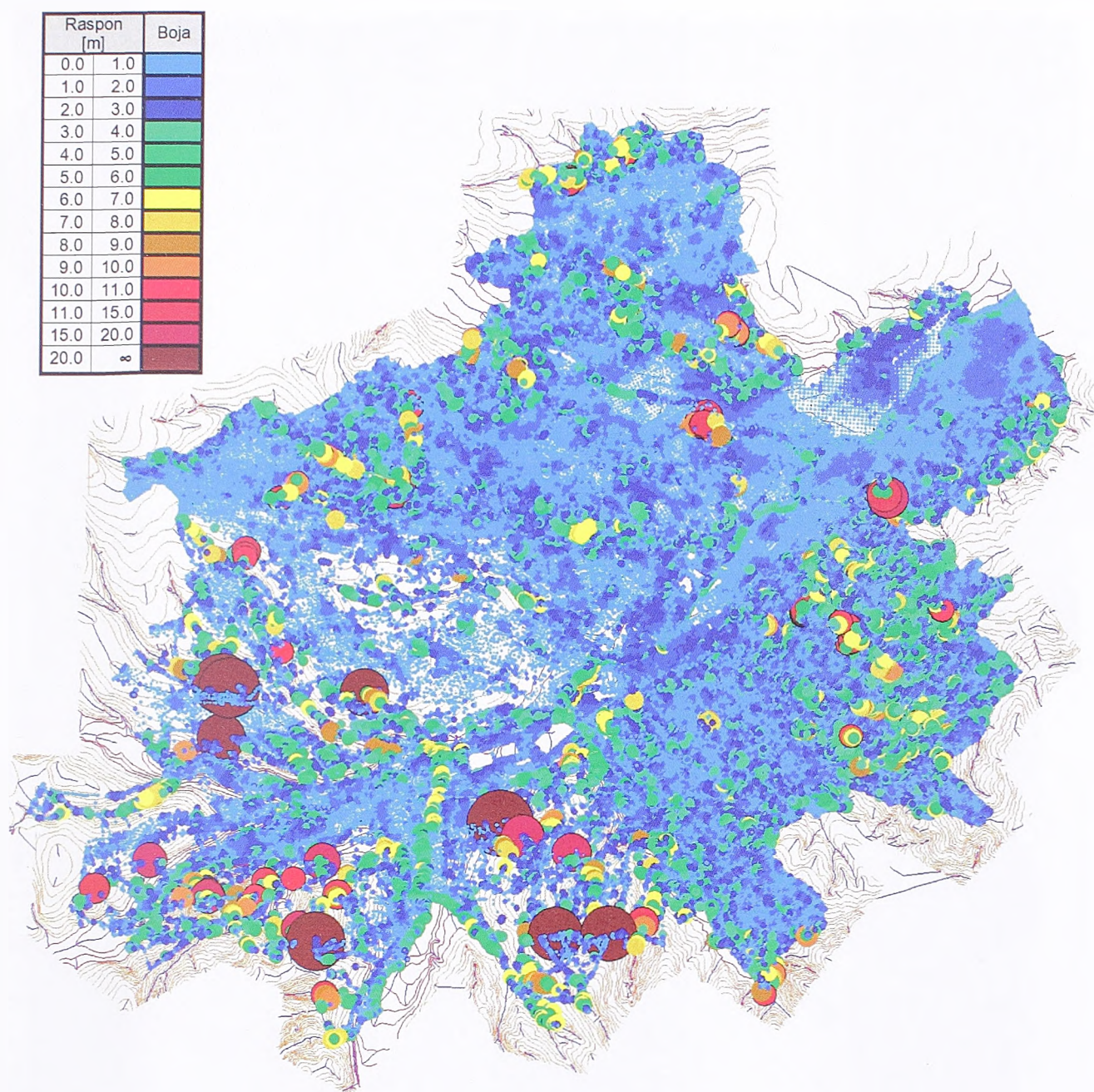
a) Ulazni podaci u formi izohipsi (sepija) i detektovane strukturne linije (plavo)



b) Senčeni model površi terena - 3D prikaz (88616 tačaka, 177226 trouglova)

Slika E-2 : Rezultat detekcije i ekstrakcije strukturnih linija terena za područje Kragujevca; korišćen je algoritam VS; parametri obrade: CFDT=da, RTSDV=5m, ITER=5, MCS=10m, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10m; posebno su definisane izohipse na prelasku strme padine u dolinu





Slika E-3 : Greške upoređenja visina visinskih tačaka iz TP1 sa visinama interpolovanim iz DMT25 za područje Kragujevca; korišćen je algoritam VS; parametri obrade: CFDT=da, RTSDV=5m, ITER=5, MCS=10m, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10m; posebno su definisane izohipse na prelasku strme padine u dolinu (Izveštaj E-6)

Površina područja	105km <sup>2</sup>
Raspon visina	153m – 380m
Nagib terena	0°-15° (za 97.6% područja)
Prosečan nagib terena	4.5°

Tabela E-2 : Osnovne karakteristike test područja Kragujevac





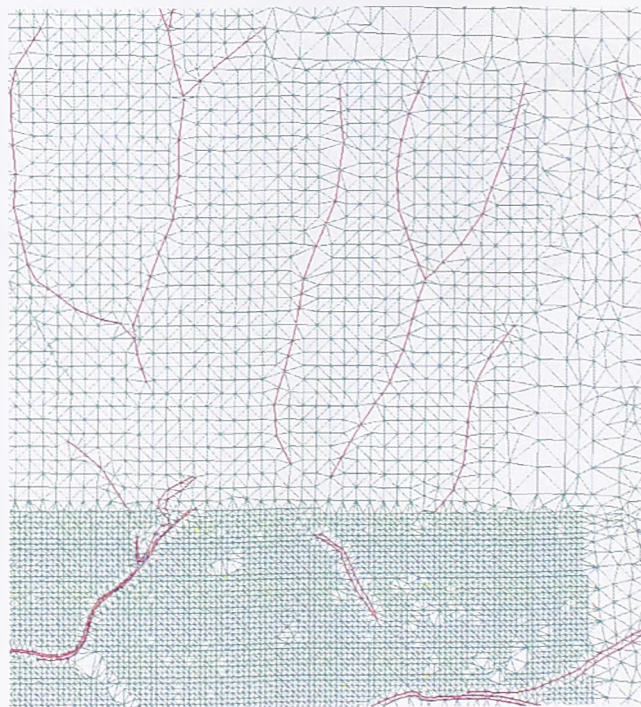
a) DMT25 dobijen iz podataka digitalizacije TK25 (641493 tačke, 1282980 trouglova)



b) DMT5 dobijen iz DOF5 - digitalna fotogrametrija (477150 tačaka, 954294 trougla)



c) Detalj DMT25 sa detektovanim strukturnim linijama



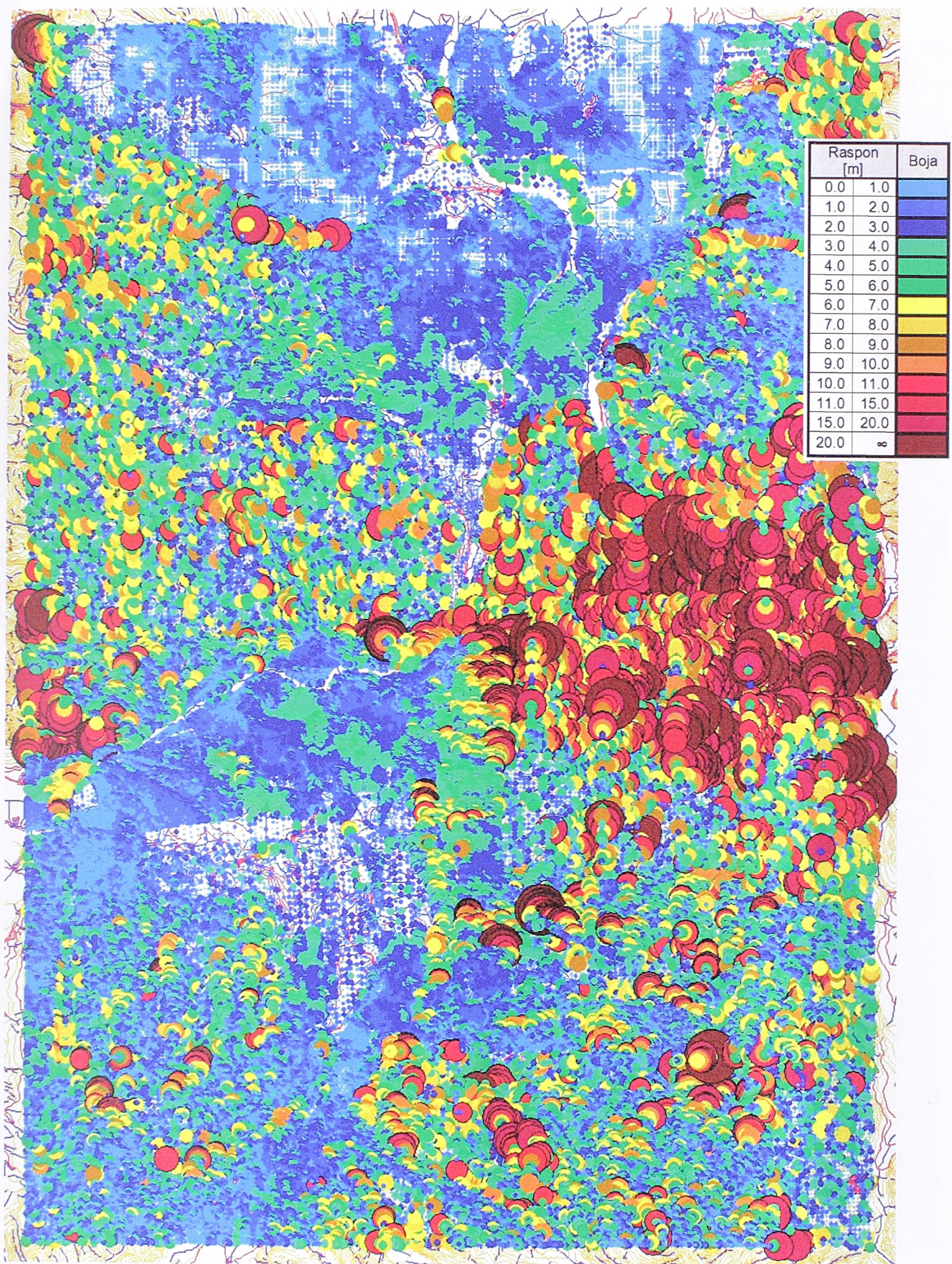
d) Detalj DOF5 DMT5 (podaci iz digitalne fotogrametrije)

Slika E-4 : DMT podaci za područje Kruševca

Površina područja	522km <sup>2</sup>
Raspon visina	129m – 450m
Nagib terena	0°-20° (za 96.5% područja)
Prosečan nagib terena	5.3°

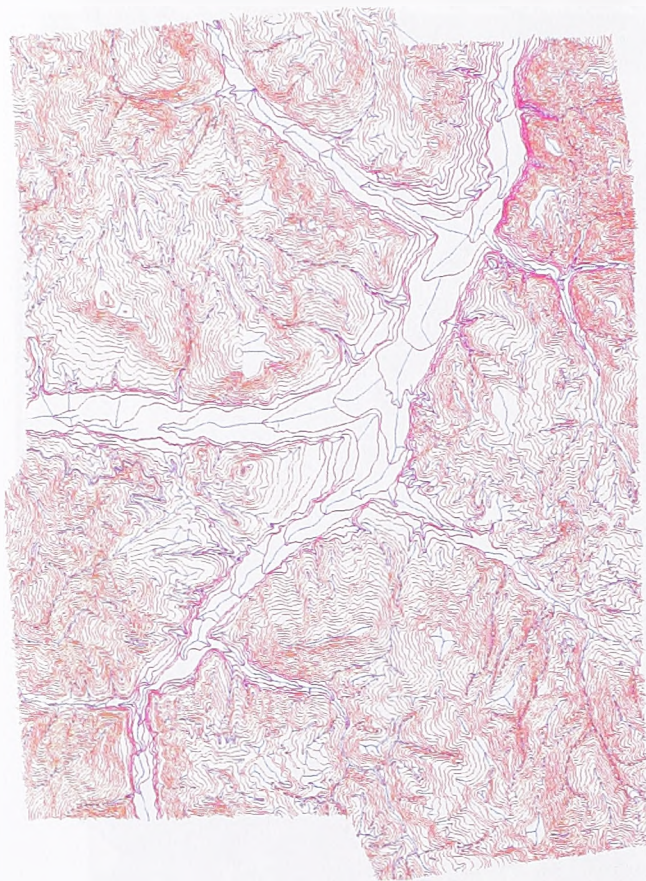
Tabela E-3 : Osnovne karakteristike test područja Kruševac





Slika E-5 : Greške upoređenja visina visinskih tačaka iz DOF5 sa visinama interpolovanim iz DMT25 za područje Kruševca; korišćen je algoritam VS; parametri obrade: CFDT=da, RTSDV=5m, ITER=5, MCS=10m, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10m; posebno su definisane izohipse na prelasku strme padine u dolinu (Izveštaj E-10)





a) Ulazni podaci u formi izohipsi (sepija) i detektovane strukturne linije (plavo)



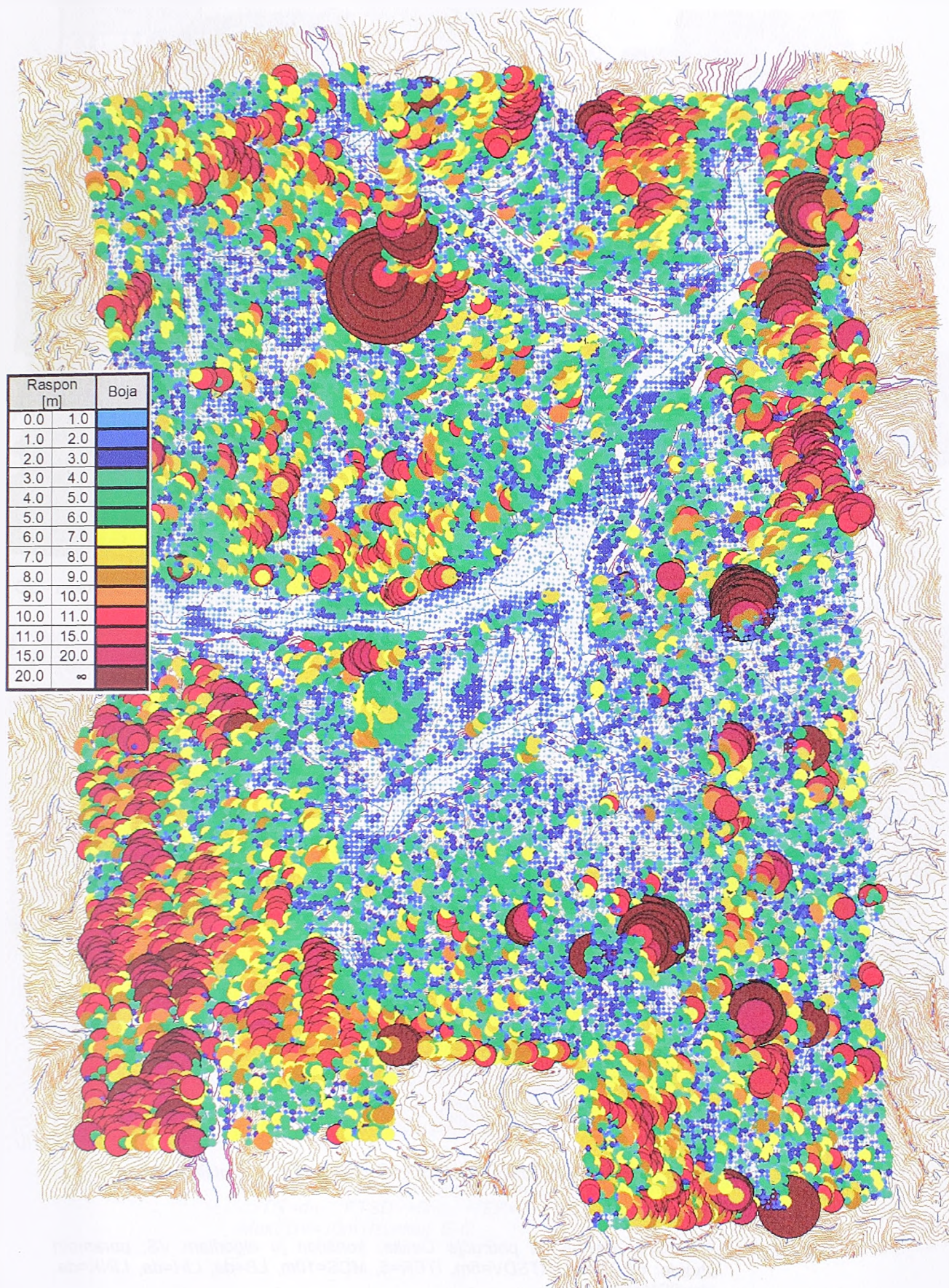
b) Senčeni model rekonstruisane površi terena - 3D prikaz (150542 tačke, 301078 trouglova)



c) Ulazni podaci u formi izohipsi (sepija) i detektovane strukturne linije (plavo) - detalj

Slika E-6 : Formiranje DMT-a za područje Novog Pazara; korišćen je algoritam VS sa sledećim parametrima obrade: CFDT=da, RTSDV=5m, ITER=5, MCS=10m, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10m; posebno su definisane izohipse na prelasku strme padine u dolinu (gore levo, ljubičasta boja)





Slika E-7 : Greške upoređenja visina visinskih tačaka iz DOF5 sa visinama interpolovanim iz DMT25 za područje Novog Pazara; korišćen je algoritam VS sa sledećim parametrima obrade: CFTD=da, RTSDV=5m, ITER=5, MCS=10m, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10m; posebno su definisane izohipse na prelasku strme padine u dolinu (Izveštaj E-17)

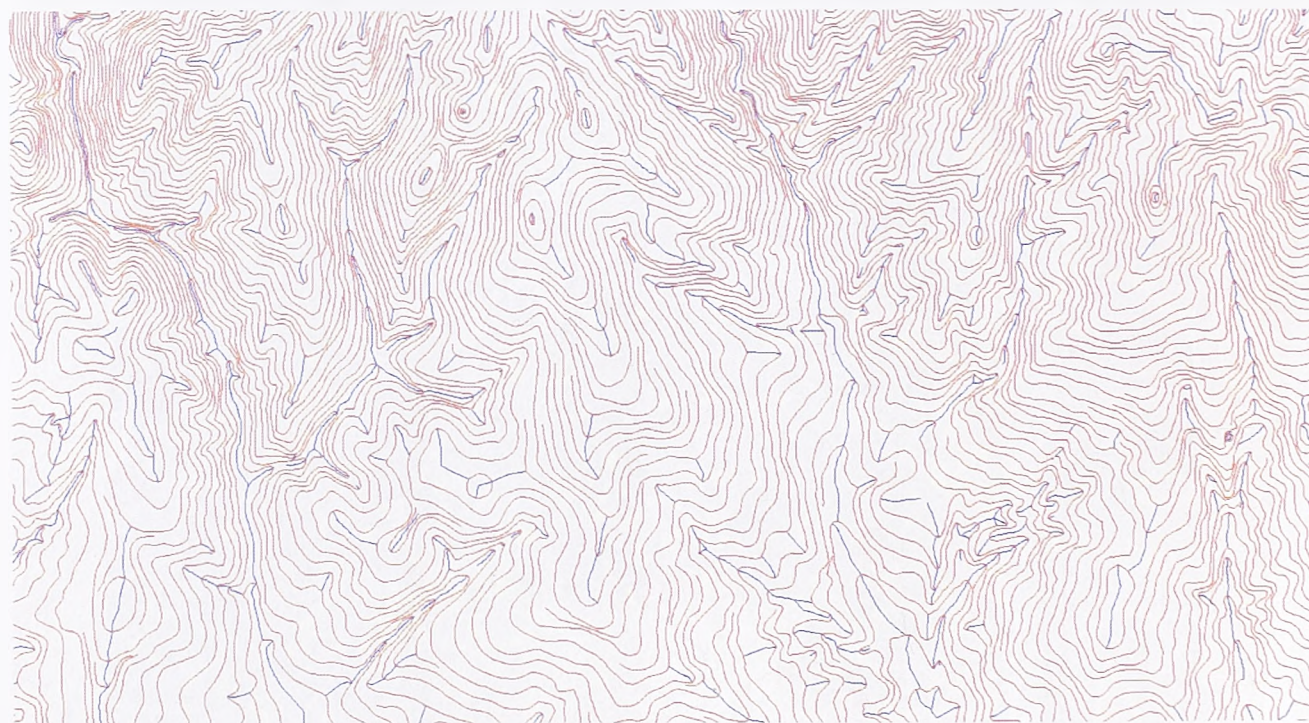




a) Ulazni podaci u formi izohipsi (sepija) i detektovane strukturne linije (plavo)



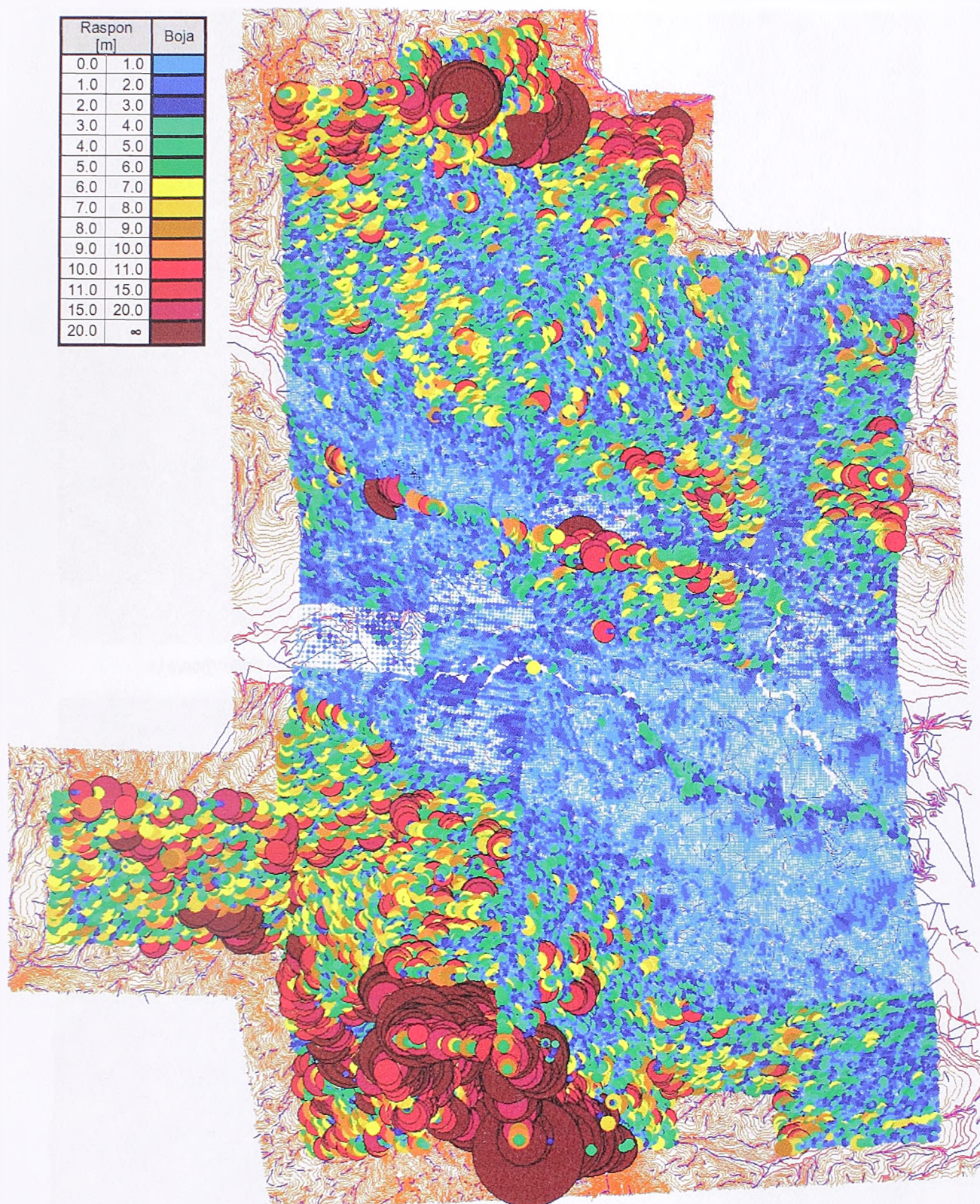
b) Senčeni model rekonstruisane površi terena - 3D prikaz (356141 tačka, 712276 trouglova)



c) Ulazni podaci u formi izohipsi (sepija) i detektovane strukturne linije (plavo) - detalj

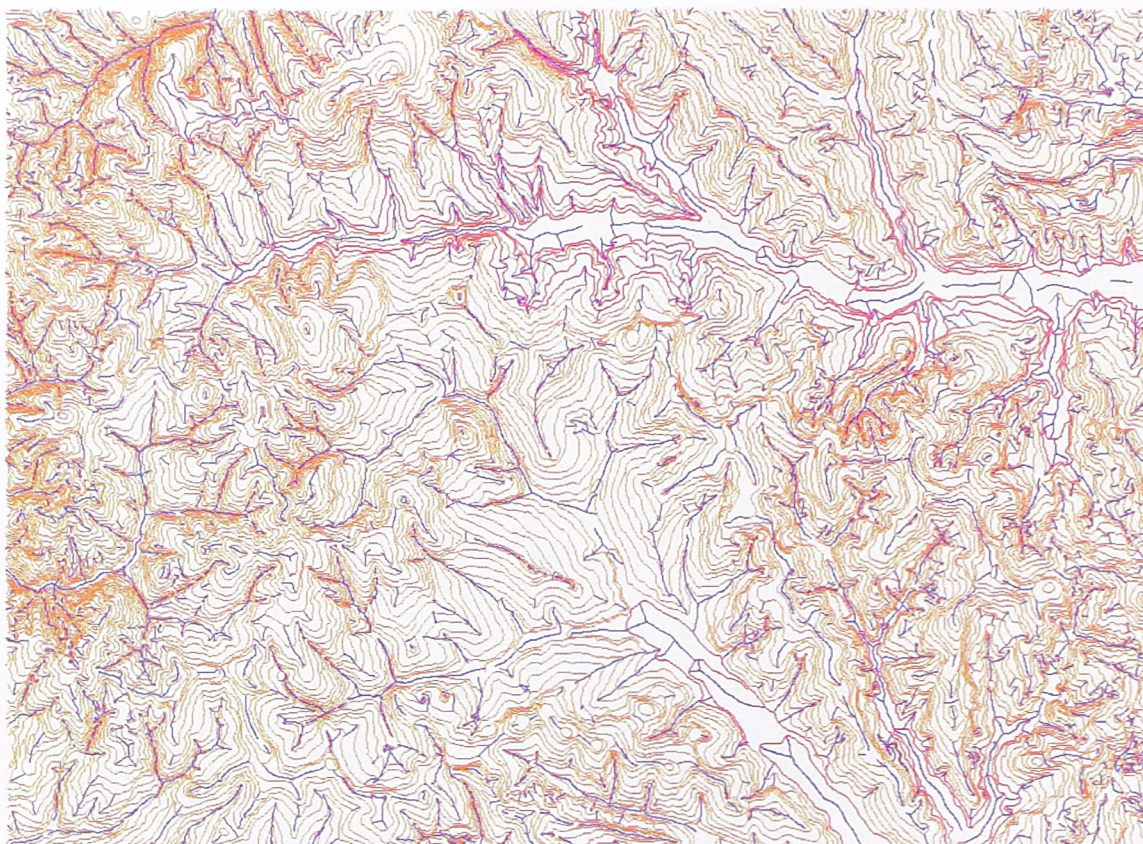
Slika E-8 : Formiranje DMT-a za područje Čačka; korišćen je algoritam VS; parametri obrade: CFDT=da, RTSDV=5m, ITER=5, MCS=10m, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10m





Slika E-9 : Greške upoređenja visina visinskih tačaka iz DOF5 sa visinama interpolovanim iz DMT25 za područje Čačka; korišćen je algoritam VS; parametri obrade: CFDT=da, RTSVDV=5m, ITER=5, MCS=10m, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10m (Izveštaj E-5)





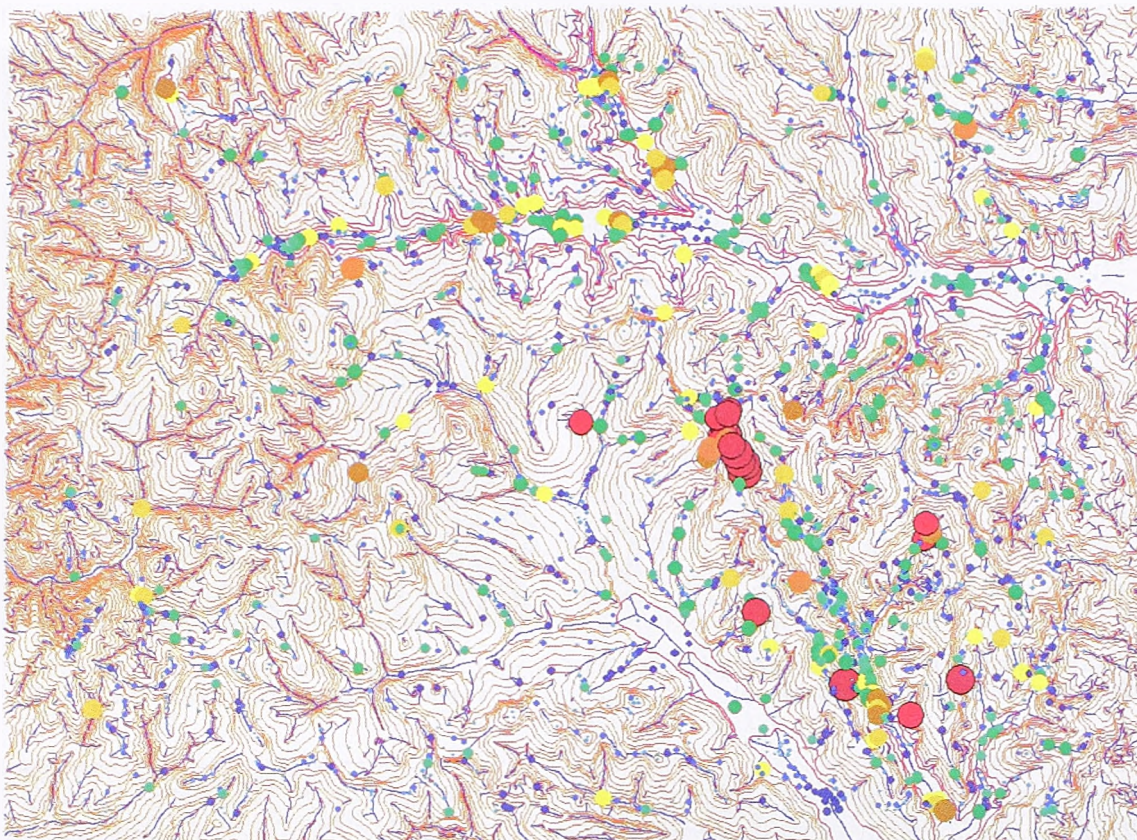
a) Ulazni podaci u formi izohipsi (sepija) i detektovane strukturne linije (plavo)



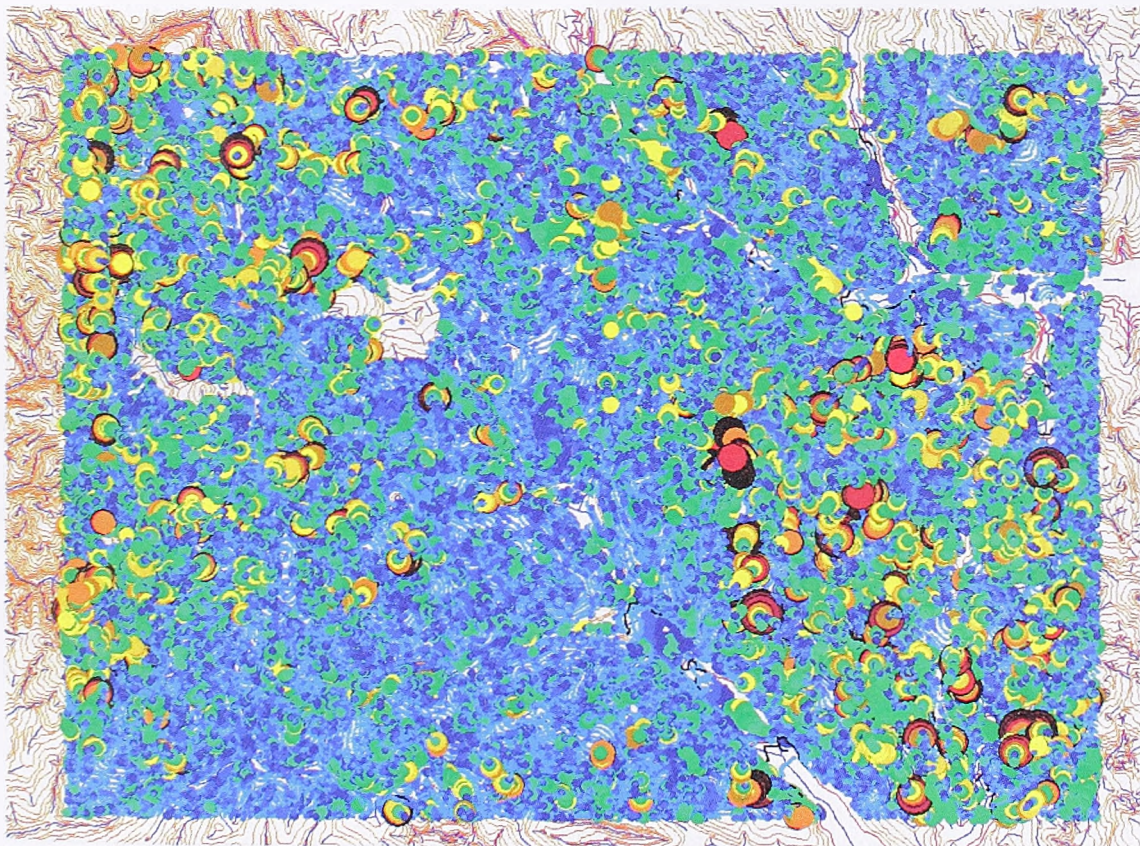
b) Senčeni model rekonstruisane površi terena - 3D prikaz (172513 tačaka, 345020 trouglova)

Slika E-10 : Formiranje DMT-a za područje Sopota; korišćen je algoritam VS sa sledećim parametrima obrade: CFDT=da, RTSDV=5m, ITER=5, MCS=10m, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10m; posebno su definisane izohipse na prelasku strme padine u dolinu (gore, ljubičasto)





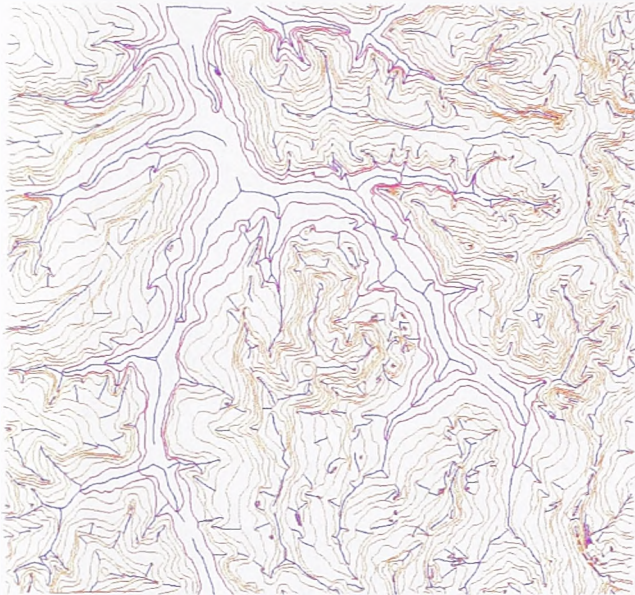
a) upoređenje visina visinskih tačaka iz DOF5 sa visinama interpolovanim iz DMT25



b) upoređenje visina tačaka izohipsi digitalizovanih sa ODK5 sa visinama interpolovanim iz DMT25

Slika E-11 : Greške upoređenja visina iz DOF5 (ODK5) sa visinama interpolovanim iz DMT25 za područje Sopota; korišćen je algoritam VS sa sledećim parametrima obrade: CFDT=da, RTSDV=5m, ITER=5, MCS=10m, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10m; posebno su definisane izohipse na prelasku strme padine u dolinu; Izveštaj E-21 sadrži statistiku za greške visinskih tačaka, a Izveštaj E-22 statistiku za greške na izohipsama

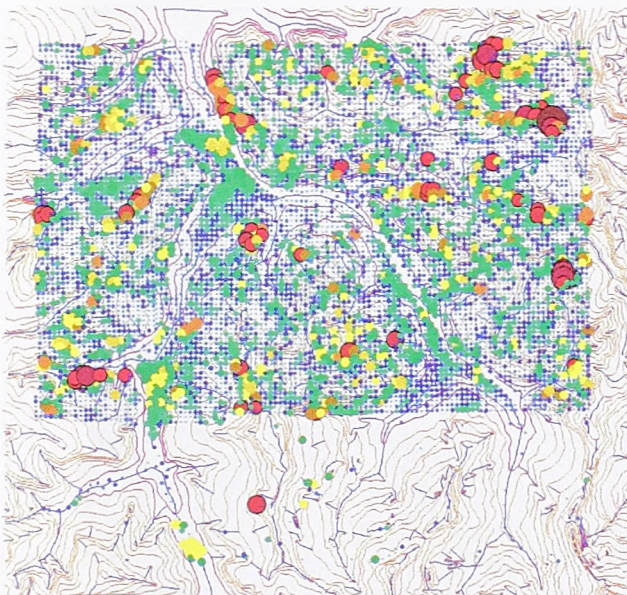




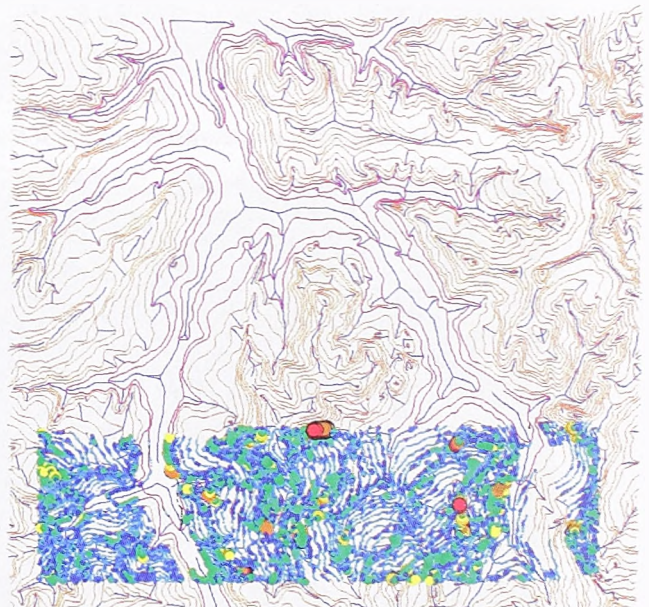
a) Ulazni podaci u formi izohipsi (sepija) i detektovane strukturne linije (plavo)



b) Senčeni model rekonstruisane površi terena - 3D prikaz (38922 tačke, 77838 trouglova)



c) upoređenje visina visinskih tačaka iz DOF5 sa visinama interpolovanim iz DMT25



d) upoređenje visina tačaka izohipsi digitalizovanih sa ODK5 sa visinama interpolovanim iz DMT25

Slika E-12 : Formiranje DMT-a za područje Vrčina; korišćen je algoritam VS sa sledećim parametrima obrade: CFDT=da, RTSDV=5m, ITER=5, MCS=10m, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10m; posebno su definisane izohipse na prelasku strme padine u dolinu (gore levo, ljubičasto); Izveštaj E-29 sadrži statistiku za greške na tačkama, a Izveštaj E-28 statistiku za greške na izohipsama



### E.3 Upoređenje visina interpolovanih iz DMT25 sa visinama dobijenim iz projekta izrade DTK5 za područje grada Beograda

Beograd DTK5							
DTK5 - visinske tačke							
DMT25 - CFDT=da, MCS=10m, DL=VS, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10m, SPLINE=ne, RTSDV=1m, ITER=5, KOTE=da							
CUBIC interpolation statistics							
Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum	
3.185	167617	1.926	1.883	-0.374	-14.769	14.886	
-----							
0.0	5.0	124444	1.651	1.608	-0.373	-14.147	11.493
5.0	10.0	33360	2.240	2.228	-0.232	-14.769	14.886
10.0	15.0	6786	3.141	3.033	-0.816	-12.380	11.800
15.0	20.0	1904	3.802	3.653	-1.052	-13.386	14.797
20.0	25.0	704	4.231	4.140	-0.872	-9.906	10.960
25.0	30.0	268	4.025	3.922	-0.904	-10.353	7.343
30.0	35.0	92	4.593	4.426	-1.221	-9.498	9.017
35.0	40.0	28	6.135	6.056	-0.964	-9.258	11.490
40.0	45.0	19	4.760	4.362	-1.853	-8.836	8.722
45.0	50.0	4	6.218	1.726	-5.173	-7.739	-4.004
50.0	55.0	6	6.179	5.637	-2.310	-13.085	1.312
55.0	60.0	1	-	-	7.895	7.895	7.895
60.0	65.0	1	-	-	-2.134	-2.134	-2.134
LINEAR REGRESSION							
	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr	
RMSE	1.347	0.000	7.034	0.003		0.086	
STDEV	1.318	0.000	6.876	0.003		0.087	
LINEAR interpolation statistics							
Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum	
3.139	167617	1.920	1.879	-0.370	-14.670	14.826	
-----							
0.0	5.0	124444	1.649	1.607	-0.371	-14.193	11.634
5.0	10.0	33360	2.229	2.218	-0.223	-14.670	14.647
10.0	15.0	6786	3.124	3.019	-0.803	-12.255	11.890
15.0	20.0	1904	3.770	3.630	-1.017	-13.264	14.826
20.0	25.0	704	4.214	4.121	-0.878	-9.860	11.128
25.0	30.0	268	3.973	3.871	-0.891	-10.373	7.355
30.0	35.0	92	4.601	4.428	-1.243	-8.966	8.554
35.0	40.0	28	6.088	6.010	-0.953	-9.028	11.410
40.0	45.0	19	4.671	4.255	-1.875	-8.888	8.145
45.0	50.0	4	6.274	1.993	-5.152	-8.060	-3.682
50.0	55.0	6	5.936	5.474	-2.097	-12.563	1.267
55.0	60.0	1	-	-	7.767	7.767	7.767
60.0	65.0	1	-	-	-2.321	-2.321	-2.321
LINEAR REGRESSION							
	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr	
RMSE	1.349	0.000	6.946	0.003		0.086	
STDEV	1.320	0.000	6.799	0.003		0.086	
ERROR DISTRIBUTION							
		CUBIC		LINEAR			
Range	No.pts	%	No.pts	%			
0.0m - 1.0m	88619	52.9%	88204	52.6%			
1.0m - 2.0m	43650	26.0%	43674	26.1%			
2.0m - 5.0m	30483	18.2%	31009	18.5%			
5.0m - 10.0m	4782	2.9%	4655	2.8%			
10.0m - 14.9m	83	0.0%	75	0.0%			

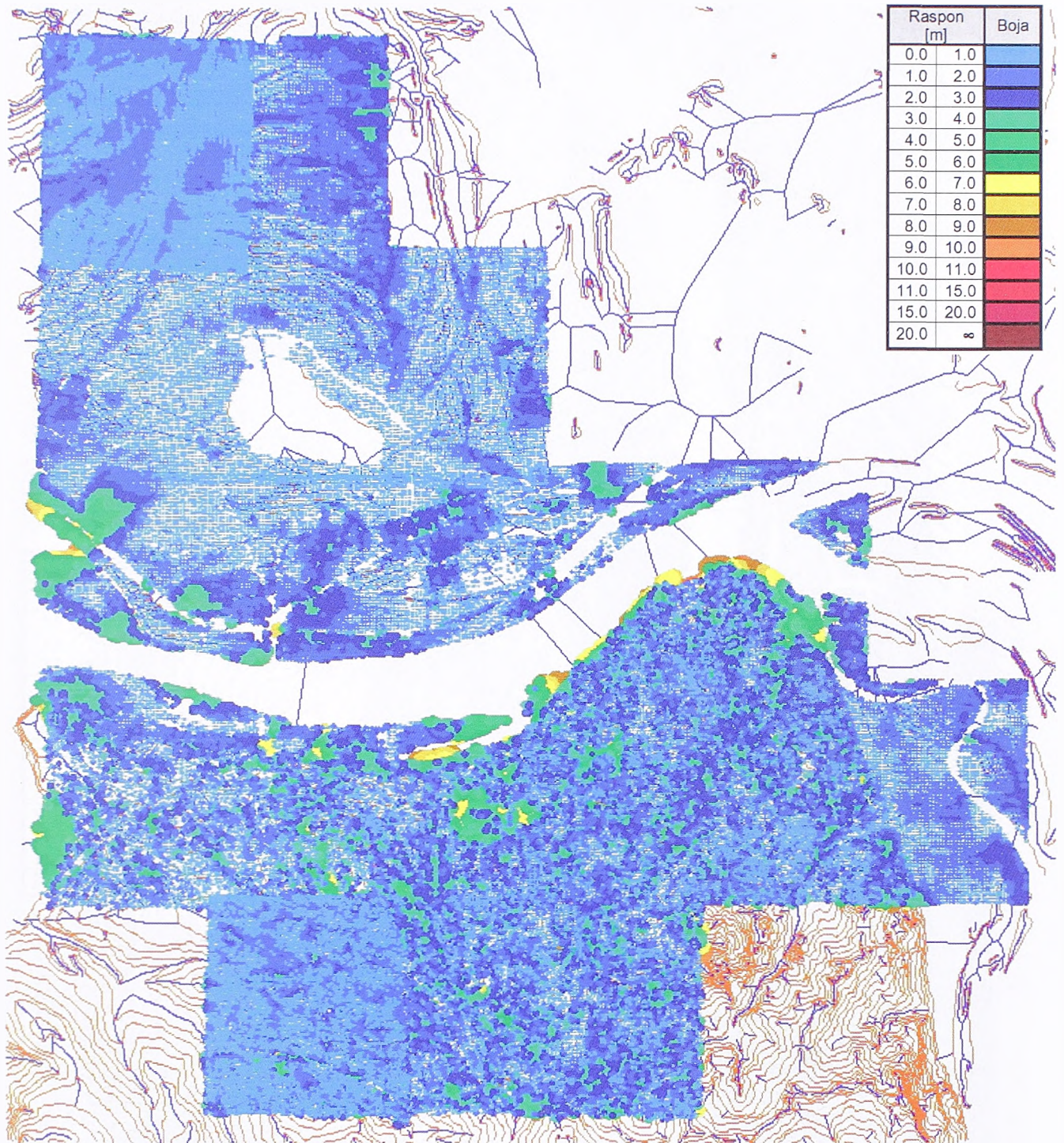
Izveštaj E-31 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina visinskih tačaka dobijenih iz DTK5 za područje Beograd DTK5



Projekat	DMT5										Tip interpolacije	Prosečan nagib terena	Broj tačaka	Srednja kvadratna greška (RMSE) [m]	Standardna devijacija ( $\sigma$ ) [m]	Prosečna greška [m]	Minimalna greška [m]	Maksimalna greška [m]	
	CFDT	MCS [m]	DL	LB	LIH	LINK	MaxSDV [m]	SPLINE [m]	RTSDV [m]	ITER									KOTE
Beograd DTK5	+	10	VS	+	+	+	10	-	1	5	+	Kubna	3,205	168091	2,124	2,077	-0,396	-73,124	19,973
	+	10	VS	+	+	+	10	-	1	5	+	Linearna	3,159	168091	2,116	2,070	-0,392	-72,919	19,828
Beograd DTK5 bez grubih grešaka	+	10	VS	+	+	+	10	-	1	5	+	Kubna	3,185	167617	1,926	1,883	-0,374	-14,769	14,886
	+	10	VS	+	+	+	10	-	1	5	+	Linearna	3,139	167617	1,920	1,879	-0,370	-14,670	14,826
Centar i Borča	+	10	VS	+	+	+	10	-	1	5	+	Kubna	3,429	69813	2,141	2,006	-0,713	-17,089	14,164
	+	10	VS	+	+	+	10	-	1	5	+	Linearna	3,386	69813	2,137	1,999	-0,719	-16,935	13,717
Centar i Borča bez grubih grešaka	+	10	VS	+	+	+	10	-	1	5	+	Kubna	3,419	69595	2,067	1,937	-0,693	-9,995	9,987
	+	10	VS	+	+	+	10	-	1	5	+	Linearna	3,376	69595	2,065	1,932	-0,699	-10,529	9,964
Kumodraž	+	10	VS	+	+	+	10	-	1	5	+	Kubna	5,502	25416	2,916	2,872	-0,159	-73,124	19,973
	+	10	VS	+	+	+	10	-	1	5	+	Linearna	5,444	25416	2,897	2,855	-0,127	-72,919	19,828
Kumodraž bez grubih grešaka	+	10	VS	+	+	+	10	-	1	5	+	Kubna	5,421	25172	2,065	2,052	-0,076	-8,978	8,965
	+	10	VS	+	+	+	10	-	1	5	+	Linearna	5,363	25172	2,052	2,041	-0,044	-9,500	9,018
Zemun	+	10	VS	+	+	+	10	-	1	5	+	Kubna	1,067	23303	1,537	1,530	0,123	-28,059	16,175
	+	10	VS	+	+	+	10	-	1	5	+	Linearna	1,023	23303	1,538	1,531	0,120	-27,953	16,451
Zemun bez grubih grešaka	+	10	VS	+	+	+	10	-	1	5	+	Kubna	1,066	23291	1,462	1,453	0,132	-14,147	14,886
	+	10	VS	+	+	+	10	-	1	5	+	Linearna	1,022	23291	1,464	1,455	0,129	-14,193	14,826
Ostružnica	+	10	VS	+	+	+	10	-	1	5	+	Kubna	2,715	49559	1,837	1,786	-0,316	-14,769	11,490
	+	10	VS	+	+	+	10	-	1	5	+	Linearna	2,672	49559	1,827	1,776	-0,308	-14,670	11,410
Beograd DTK5 po delovima																			

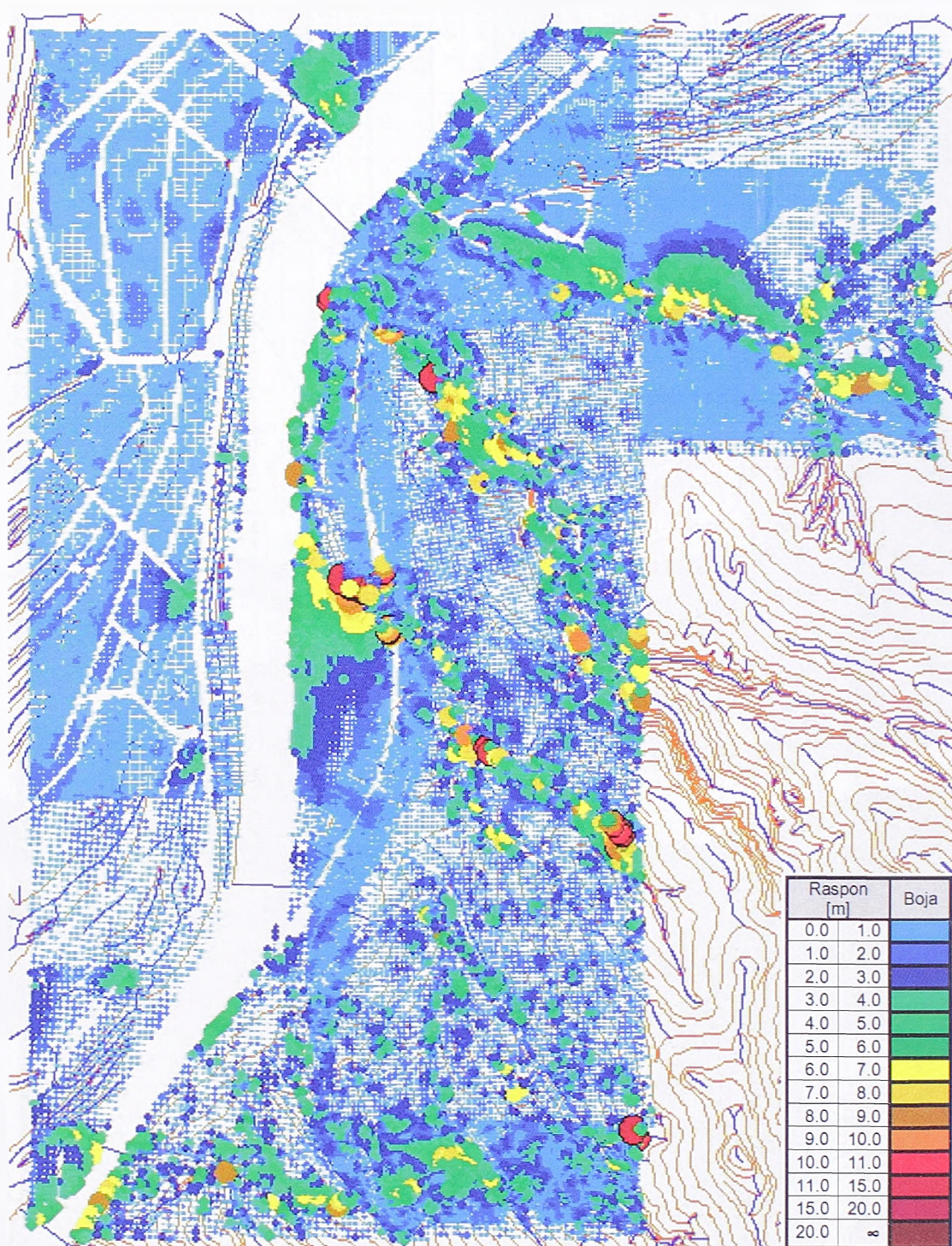
Tabela E-4 : Upoređenje visina interpolovanih iz DMT25 i visina visinskih tačaka dobijenih iz DTK5 za područje Beograd DTK5





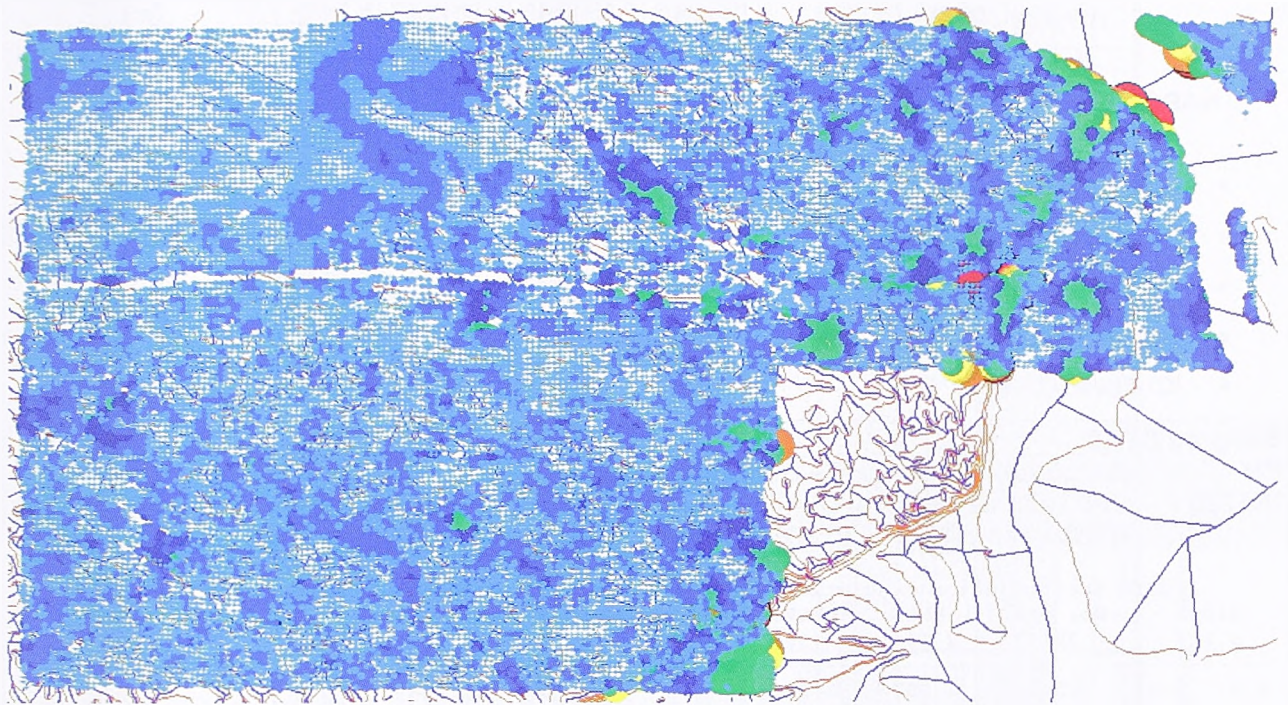
Slika E-13 : Greške upoređenja visina visinskih tačaka iz DTK5 sa visinama interpolovanim iz DMT25 za područje Beograda – Centar i Borča; korišćen je algoritam VS; parametri obrade: CFDT=da, RTSDV=1m, ITER=5, MCS=10m, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10m; grube greške su odstranjene iz rezultata





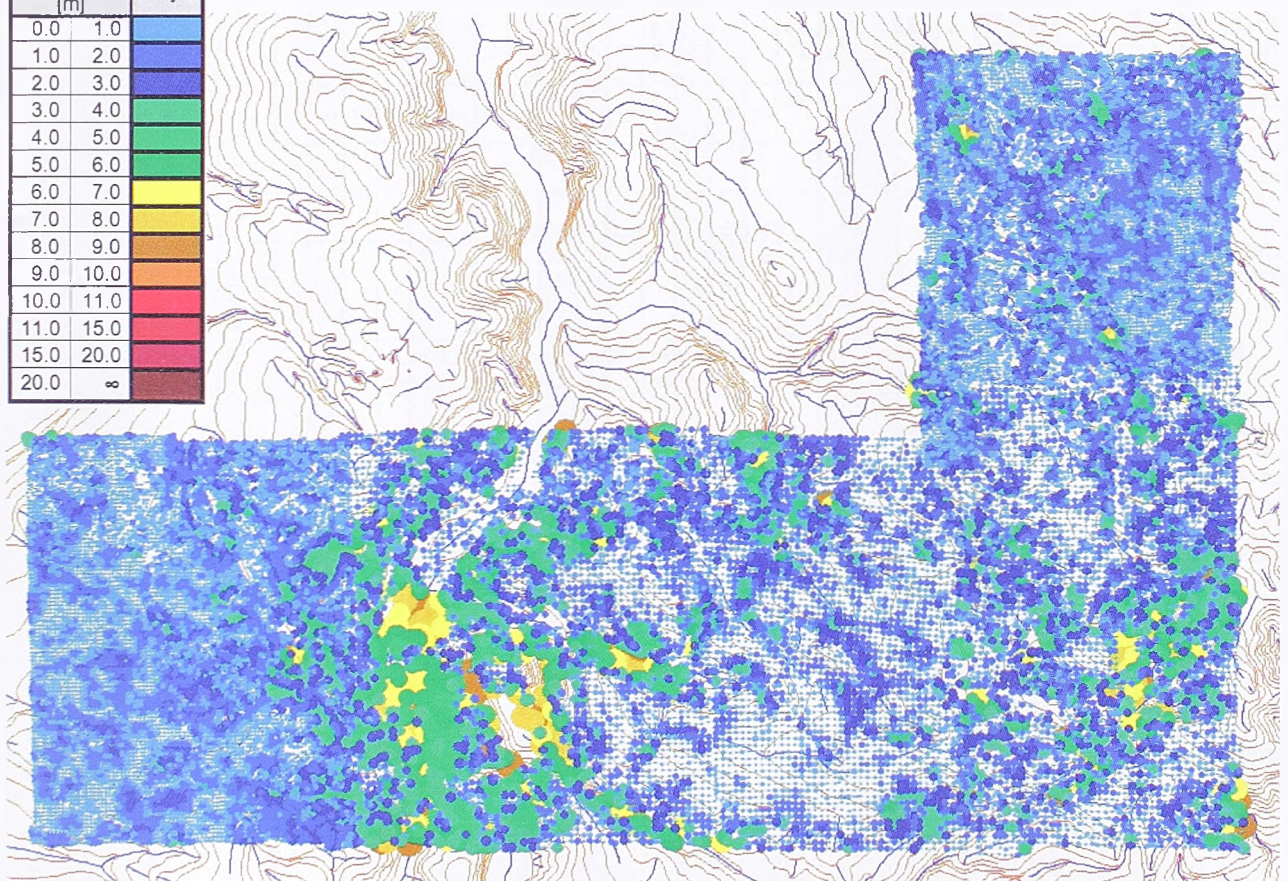
Slika E-14 : Greške upoređenja visina visinskih tačaka iz DTK5 sa visinama interpolovanim iz DMT25 za područje Beograda - Ostružnica; korišćen je algoritam VS; parametri obrade: CFDT=da, RTSDV=1m, ITER=5, MCS=10m, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10m





a) Beograd – Zemun

Raspon [m]	Boja
0.0 1.0	Light Blue
1.0 2.0	Blue
2.0 3.0	Dark Blue
3.0 4.0	Green
4.0 5.0	Light Green
5.0 6.0	Yellow-Green
6.0 7.0	Yellow
7.0 8.0	Orange
8.0 9.0	Light Orange
9.0 10.0	Red-Orange
10.0 11.0	Red
11.0 15.0	Dark Red
15.0 20.0	Brown-Red
20.0 ∞	Dark Brown



b) Beograd - Kumodraž

Slika E-15 : Greške upoređenja visina visinskih tačaka iz DOF5 sa visinama interpolovanim iz DMT25 za područje Beograda – Zemun i Kumodraž; korišćen je algoritam VS; parametri obrade: CFDT=da, RTSDV=5m, ITER=5, MCS=10m, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10m; grube greške su odstranjene iz rezultata za oba projekta



## E.4 Upoređenje visina interpolovanih iz DMT25 i visina tačaka poligonskih mreža (PM)

**NAPOMENA** : Detaljni izveštaji sa statističkim pokazateljima dobijenim na osnovu upoređenja za područja za koje je rađen DOF dati su u poglavlju E.2 i to:

- Sopot (Izveštaj E-23);
- Lazarevac (Izveštaj E-15);
- Vrčin (Izveštaj E-30);
- Barajevo (Izveštaj E-1);
- Kruševac (Izveštaj E-11).

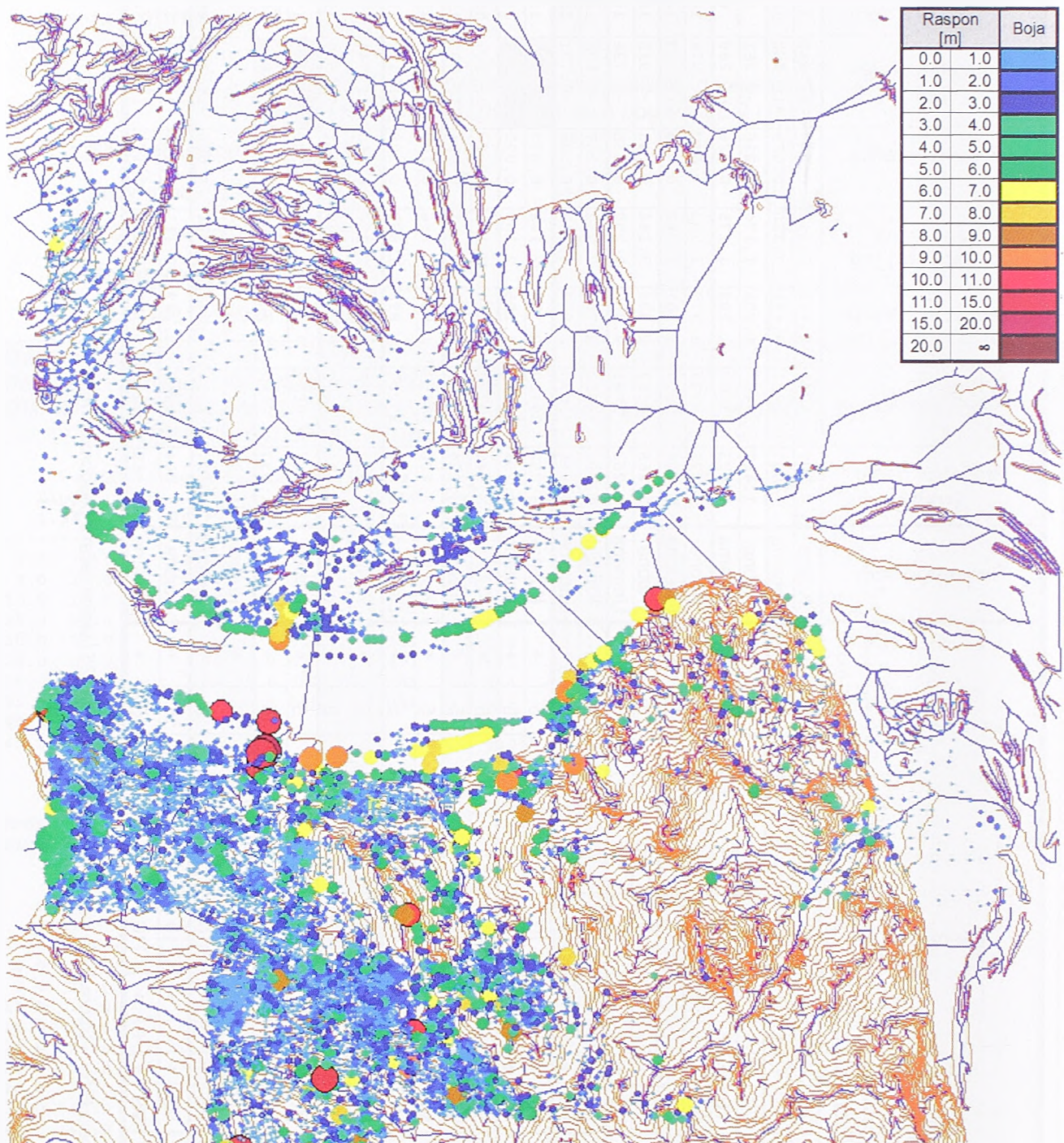
Beograd DTK5							
PM - poligonska mreža grada Beograda							
DMT25 - CFDT=da, MCS=10m, DL=VS, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10m, SPLINE=ne, RTSDV=1m, ITER=5, KOTE=da							
CUBIC interpolation statistics							
Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum	
3.349	29177	2.114	2.109	0.080	-15.307	15.973	
0.0	5.0	22475	1.957	1.957	0.016	-15.307	15.836
5.0	10.0	5689	2.212	2.190	0.312	-11.684	15.021
10.0	15.0	695	3.851	3.848	0.158	-14.952	15.680
15.0	20.0	185	4.245	4.242	0.152	-11.787	15.973
20.0	25.0	85	4.588	4.581	0.258	-11.075	15.222
25.0	30.0	34	4.523	4.471	0.672	-7.836	8.828
30.0	35.0	8	6.752	6.741	-0.354	-12.020	9.816
35.0	40.0	4	5.048	4.352	2.215	-1.337	7.635
40.0	45.0	1	-	-	3.256	3.256	3.256
45.0	50.0	1	-	-	3.530	3.530	3.530
LINEAR REGRESSION							
	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr	
RMSE	1.643	0.002	6.344	0.020		0.183	
STDEV	1.648	0.002	6.212	0.021		0.190	
LINEAR interpolation statistics							
Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum	
3.294	29177	2.116	2.111	0.094	-15.307	15.816	
0.0	5.0	22475	1.960	1.960	0.031	-15.307	15.816
5.0	10.0	5689	2.212	2.189	0.321	-11.659	14.922
10.0	15.0	695	3.841	3.836	0.196	-14.627	15.702
15.0	20.0	185	4.239	4.236	0.153	-11.606	15.364
20.0	25.0	85	4.627	4.619	0.275	-11.089	14.602
25.0	30.0	34	4.628	4.588	0.599	-7.745	8.868
30.0	35.0	8	6.889	6.885	-0.222	-12.107	10.060
35.0	40.0	4	5.065	4.512	1.992	-1.714	7.601
40.0	45.0	1	-	-	3.175	3.175	3.175
45.0	50.0	1	-	-	3.543	3.543	3.543
LINEAR REGRESSION							
	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr	
RMSE	1.645	0.002	6.349	0.020		0.183	
STDEV	1.649	0.002	6.217	0.020		0.190	
ERROR DISTRIBUTION							
		CUBIC		LINEAR			
Range	No. pts	%	No. pts	%			
0.0m - 1.0m	14269	48.9%	14109	48.4%			
1.0m - 2.0m	7945	27.2%	7944	27.2%			
2.0m - 5.0m	6008	20.6%	6182	21.2%			
5.0m - 10.0m	863	3.0%	852	2.9%			
10.0m - 15.0m	80	0.3%	81	0.3%			
15.0m - 16.0m	12	0.0%	9	0.0%			

Izveštaj E-32 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina tačaka poligonske mreže grada Beograda za područje Beograd

Projekat	DMT25										Tip interpolacije	Prosečan nagib terena	Broj tačaka	Srednja kvadratna greška (RMSE) [m]	Standardna devijacija ( $\sigma$ ) [m]	Prosečna greška [m]	Minimalna greška [m]	Maksimalna greška [m]		
	CFDT	MCS [m]	DL	LB	LIH	LINK	MaxSDV [m]	SPLINE [m]	RTSDV [m]	ITER									KOTE	
Barajevo	+	10	VS	+	+	+	+	10	-	5	5	-	Kubna	6.105	1221	2.445	2.348	0.558	-16.789	11.579
	+	10	VS	+	+	+	+	10	-	5	5	-	Linearna	5.997	1221	2.481	2.350	0.659	-16.760	11.806
Kruševac	+	10	VS	+	+	+	+	10	-	5	5	-	Kubna	1.412	3467	1.204	1.174	0.216	-6.261	6.206
	+	10	VS	+	+	+	+	10	-	5	5	-	Linearna	1.422	3467	1.208	1.175	0.226	-6.288	6.165
Lazarevac	+	10	VS	+	+	+	+	-	-	1	5	+	Kubna	4.322	2827	1.778	1.703	0.430	-11.974	14.616
	+	10	VS	+	+	+	+	-	-	1	5	+	Linearna	4.256	2827	1.801	1.712	0.478	-11.513	14.726
Sopot	+	10	VS	+	+	+	+	-	25	1	5	-	Kubna	7.269	1083	2.326	2.244	0.543	-7.915	15.809
	+	10	VS	+	+	+	+	-	25	1	5	-	Linearna	7.263	1083	2.356	2.250	0.635	-7.726	15.725
Vrčin	-	10	VS	+	+	+	+	10	-	1	5	+	Kubna	6.793	598	2.763	2.712	0.257	-9.104	10.301
	-	10	VS	+	+	+	+	10	-	1	5	+	Linearna	6.848	598	2.807	2.747	0.326	-8.771	10.530
Beograd DTK5	+	10	VS	+	+	+	+	10	-	1	5	+	Kubna	3.352	29188	2.154	2.148	0.077	-27.931	19.539
	+	10	VS	+	+	+	+	10	-	1	5	+	Linearna	3.296	29188	2.155	2.150	0.091	-27.868	19.382
Beograd DTK5	+	10	VS	+	+	+	+	10	-	1	5	+	Kubna	3.349	29177	2.114	2.109	0.08	-15.307	15.973
	+	10	VS	+	+	+	+	10	-	1	5	+	Linearna	3.294	29177	2.116	2.111	0.094	-15.307	15.816
Beograd DTK5 po delovima	+	10	VS	+	+	+	+	10	-	1	5	+	Kubna	3.600	15707	1.904	1.896	0.109	-12.020	15.522
	+	10	VS	+	+	+	+	10	-	1	5	+	Linearna	3.560	15707	1.898	1.890	0.123	-12.107	15.365
Centar i Borča	+	10	VS	+	+	+	+	10	-	1	5	+	Kubna	5.215	3877	2.267	2.236	0.266	-12.744	15.836
Kumodraž	+	10	VS	+	+	+	+	10	-	1	5	+	Linearna	5.131	3877	2.274	2.240	0.301	-13.030	15.816
Zemun	+	10	VS	+	+	+	+	10	-	1	5	+	Kubna	1.916	7159	2.569	2.557	-0.109	-27.931	19.539
	+	10	VS	+	+	+	+	10	-	1	5	+	Linearna	1.837	7159	2.580	2.568	-0.100	-27.868	19.382
Zemun bez grubih grešaka	+	10	VS	+	+	+	+	10	-	1	5	+	Kubna	1.905	7148	2.432	2.420	-0.097	-15.307	15.973
	+	10	VS	+	+	+	+	10	-	1	5	+	Linearna	1.827	7148	2.444	2.431	-0.088	-15.307	15.702
Ostružnica	+	10	VS	+	+	+	+	10	-	1	5	+	Kubna	3.004	2445	2.149	2.111	0.121	-10.719	15.239
	+	10	VS	+	+	+	+	10	-	1	5	+	Linearna	2.962	2445	2.152	2.113	0.111	-10.721	14.978

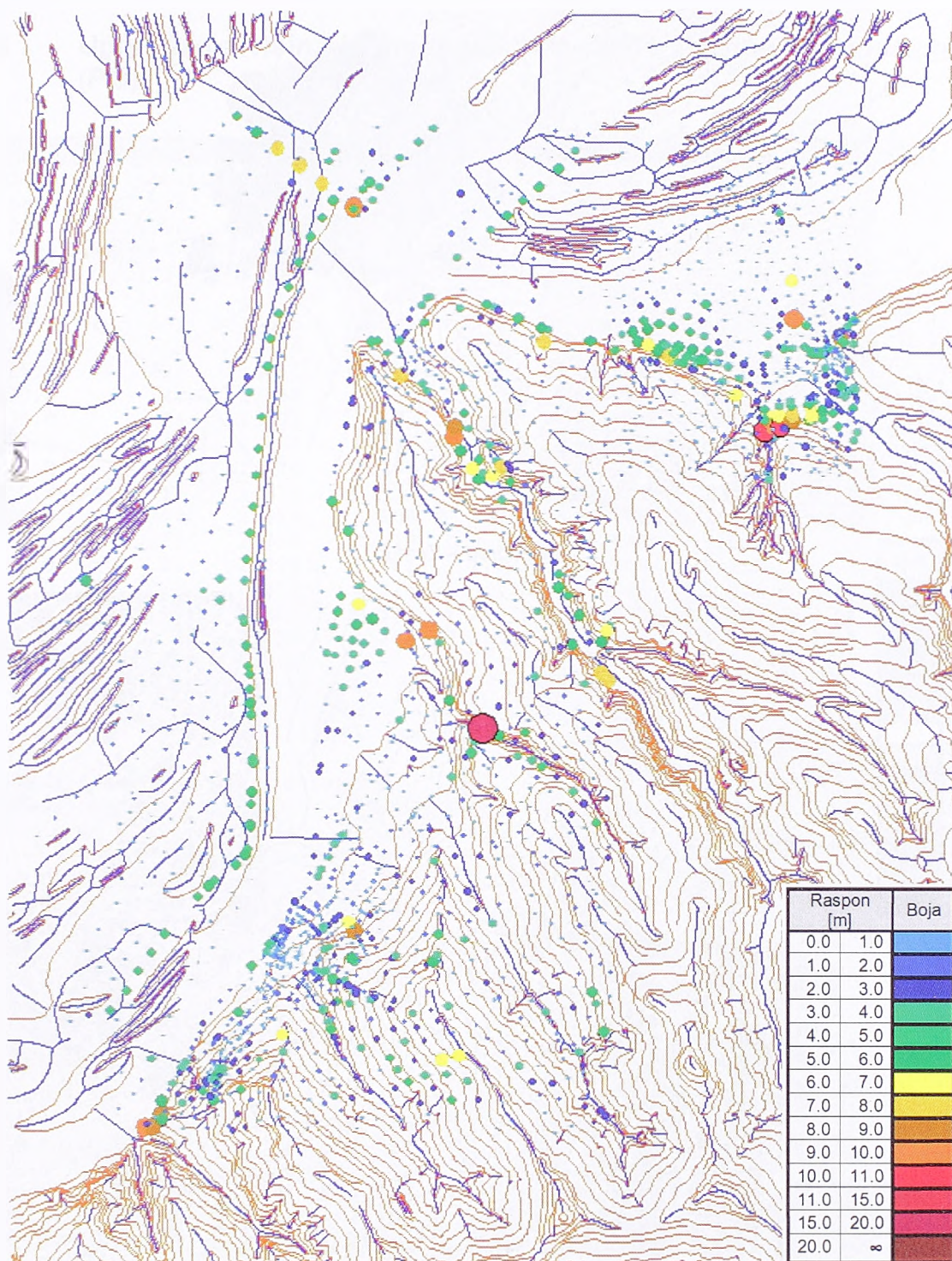
Tabela E-5 : Upoređenje visina interpolovanih iz DMT25 i visina tačaka poligonskih mreža





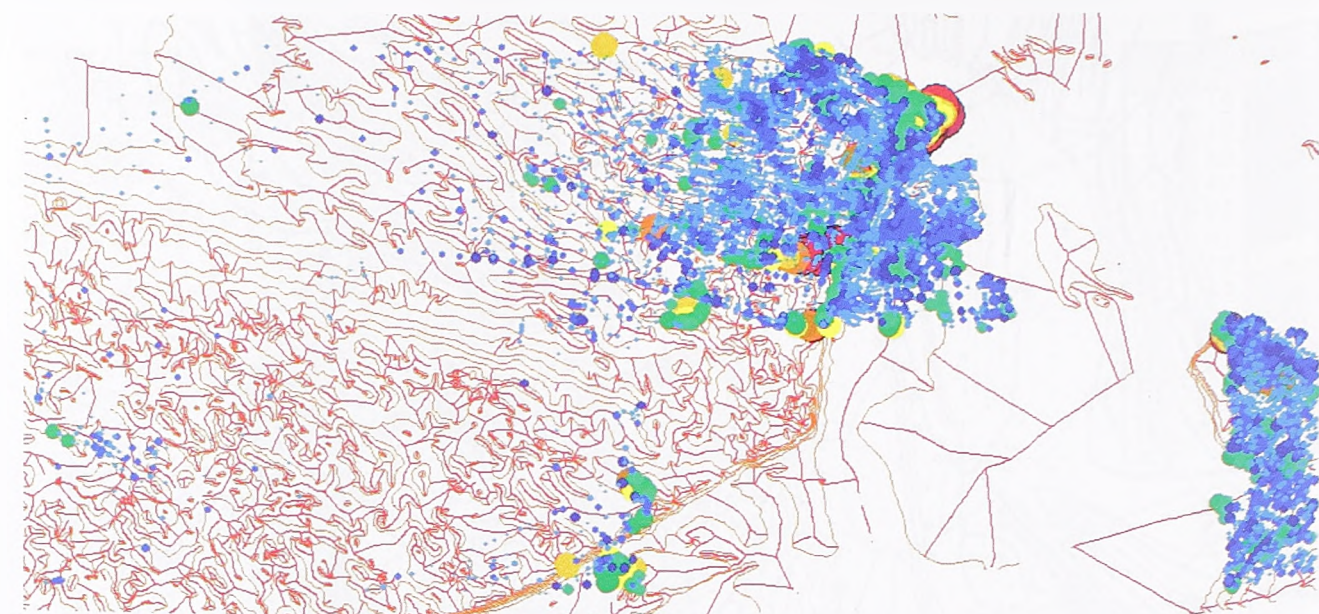
Slika E-16 : Greške upoređenja visina tačaka poligonske mreže grada Beograda sa visinama interpolovanim iz DMT25 za područje Beograd – Centar i Borča; korišćen je algoritam VS; parametri obrade: CFDT=da, RTSDV=1m, ITER=5, MCS=10m, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10m





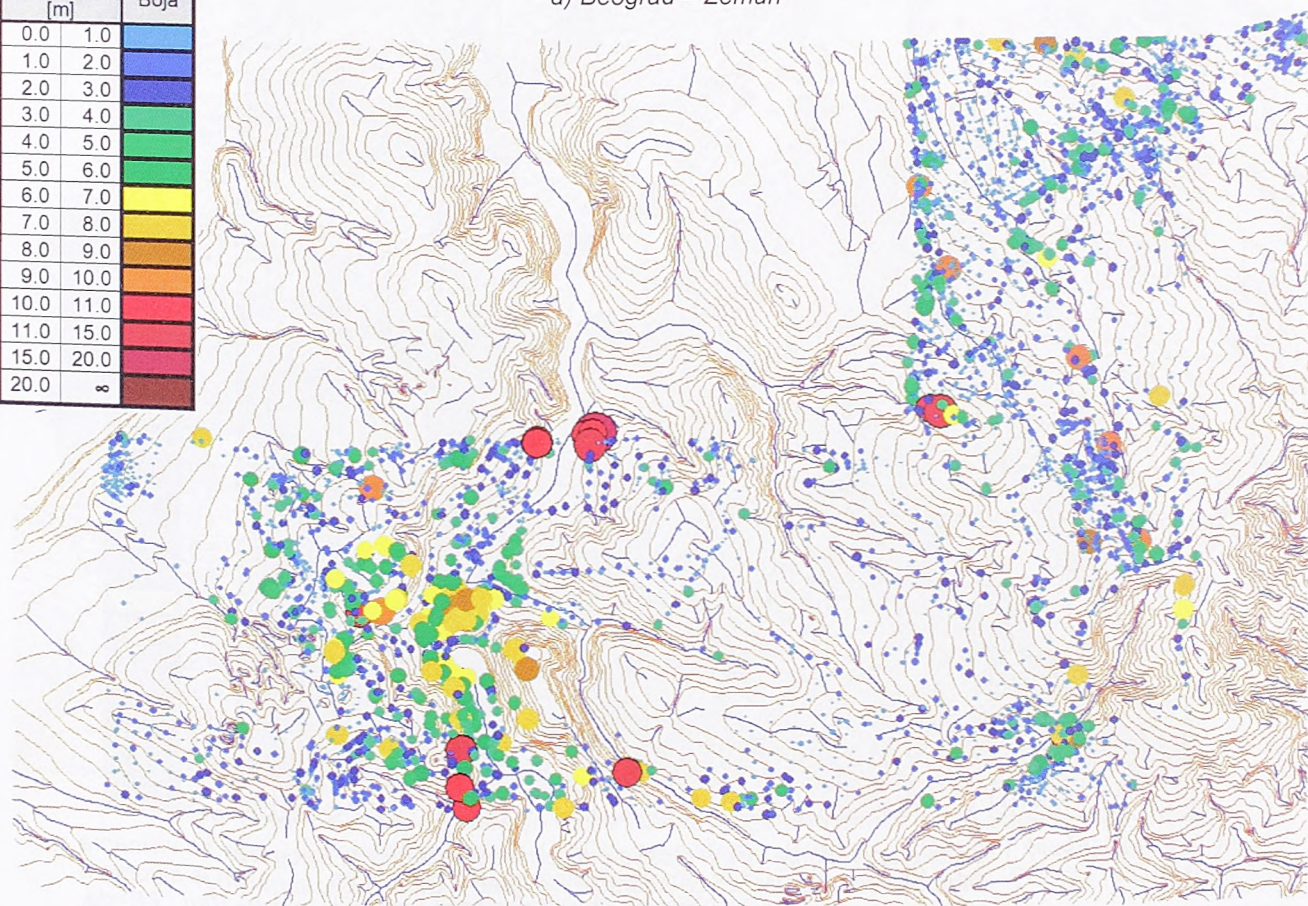
Slika E-17 : Greške upoređenja visina tačaka poligonske mreže grada Beograda sa visinama interpolovanim iz DMT25 za područje Beograd – Ostruznica; korišćen je algoritam VS; parametri obrade: CFDT=da, RTSDV=1m, ITER=5, MCS=10m, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10m





a) Beograd – Zemun

Raspon [m]	Boja
0.0 1.0	Light Blue
1.0 2.0	Blue
2.0 3.0	Dark Blue
3.0 4.0	Green
4.0 5.0	Light Green
5.0 6.0	Yellow-Green
6.0 7.0	Yellow
7.0 8.0	Orange
8.0 9.0	Light Orange
9.0 10.0	Red-Orange
10.0 11.0	Red
11.0 15.0	Dark Red
15.0 20.0	Brown
20.0 ∞	Dark Brown



b) Beograd - Kumodraž

Slika E-18 : Greške upoređenja visina tačaka poligonske mreže grada Beograda sa visinama interpolovanim iz DMT25 za područje Beograda – Zemun i Kumodraž; korišćen je algoritam VS; parametri obrade: CFDT=da, RTSDV=5m, ITER=5, MCS=10m, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10m; grube greške su odstranjene iz rezultata za područje Zemuna



### E.5 Upoređenje visina interpolovanih iz DMT5 i visina poligonskih tačaka (PM)

Beograd DMT5, poligonska mreža, grube greške odstranjene							
CUBIC interpolation statistics							
Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum	
3.923	27395	1.065	1.054	0.079	-10.032	12.165	
-----							
0.0	5.0	21217	0.965	0.965	0.025	-9.902	9.916
5.0	10.0	4550	1.166	1.140	0.245	-10.032	12.165
10.0	15.0	681	1.615	1.547	0.463	-8.155	9.890
15.0	20.0	319	1.626	1.622	0.113	-7.900	7.605
20.0	25.0	236	1.611	1.609	0.071	-6.264	8.086
25.0	30.0	146	2.158	2.138	0.291	-6.802	8.930
30.0	35.0	84	1.507	1.503	0.120	-4.021	6.455
35.0	40.0	41	2.467	2.466	0.058	-9.712	3.541
40.0	45.0	19	1.570	1.397	0.699	-1.267	3.515
45.0	50.0	17	1.671	1.671	0.052	-3.811	2.669
50.0	55.0	16	2.423	2.164	1.057	-1.798	7.798
55.0	60.0	23	2.795	2.719	0.630	-6.445	7.556
60.0	65.0	21	2.398	2.041	1.229	-2.859	6.155
65.0	70.0	12	2.579	2.576	-0.135	-6.046	3.075
70.0	75.0	8	5.403	4.398	2.936	-2.907	9.927
75.0	80.0	5	2.193	1.599	1.300	-0.470	2.726
LINEAR REGRESSION							
	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr	
RMSE	0.945	0.001	1.223	0.005		0.117	
STDEV	0.948	0.001	1.094	0.005		0.114	
LINEAR interpolation statistics							
Slope	No. pts	RMSE	STDEV	Average	Minimum	Maximum	
3.915	27395	1.064	1.052	0.089	-9.979	11.205	
-----							
0.0	5.0	21217	0.963	0.962	0.032	-9.898	9.930
5.0	10.0	4550	1.166	1.136	0.264	-9.979	11.205
10.0	15.0	681	1.617	1.544	0.479	-7.984	8.950
15.0	20.0	319	1.670	1.663	0.154	-7.899	7.415
20.0	25.0	236	1.630	1.628	0.073	-6.267	8.081
25.0	30.0	146	2.132	2.113	0.276	-6.875	9.110
30.0	35.0	84	1.518	1.512	0.137	-4.019	6.425
35.0	40.0	41	2.419	2.417	0.080	-8.951	3.523
40.0	45.0	19	1.523	1.335	0.714	-1.491	3.409
45.0	50.0	17	1.698	1.697	0.051	-3.815	3.051
50.0	55.0	16	2.475	2.216	1.067	-1.744	8.143
55.0	60.0	23	2.789	2.718	0.610	-6.444	7.594
60.0	65.0	21	2.451	2.085	1.258	-2.956	6.169
65.0	70.0	12	2.474	2.463	-0.221	-6.077	2.695
70.0	75.0	8	5.314	4.405	2.781	-3.230	9.789
75.0	80.0	5	2.086	1.460	1.290	-0.264	2.738
LINEAR REGRESSION							
	Intercept	StdErr	Slope	StdErr	Model	StdErr	
RMSE	0.943	0.001	1.224	0.005		0.119	
STDEV	0.945	0.001	1.094	0.005		0.116	
ERROR DISTRIBUTION							
		CUBIC			LINEAR		
Range	No.pts	%	No.pts	%			
0.0m - 1.0m	22834	83.4%	22826	83.3%			
1.0m - 2.0m	3292	12.0%	3280	12.0%			
2.0m - 5.0m	1056	3.9%	1078	3.9%			
5.0m - 10.0m	210	0.8%	209	0.8%			
10.0m - 12.2m	3	0.0%	2	0.0%			

Izveštaj E-33 : Upoređenje visina tačaka poligonske mreže grada Beograda i visina interpolovanih iz DTK5 DMT-a za područje Beograda (centar, Borča, Kumodraž, Ostružnica i Zemun) – tačke poligonske mreže sa grubim greškama su odstranjene (Slika E-19)



Projekat	DMT5										Tip interpolacije	Prosečan nagib terena	Broj tačaka	Srednja kvadratna greška (RMSE) [m]	Standardna devijacija ( $\sigma$ ) [m]	Prosečna greška [m]	Minimalna greška [m]	Maksimalna greška [m]	
	CFDT	MCS [m]	DL	LB	LIH	LINK	MaxSDV [m]	SPLINE [m]	RTSDV [m]	ITER									KOTE
Barajevo	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Kubna	6.643	1219	1.133	1.052	0.323	-6.352	10.155
	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Linearna	6.215	1219	1.184	1.073	0.438	-5.878	10.146
Kruševac	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Kubna	1.826	3467	1.564	1.221	-0.971	-8.581	8.231
	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Linearna	1.778	3467	1.560	1.213	-0.974	-8.575	8.236
Lazarevac	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Kubna	5.206	2807	1.167	1.141	0.189	-9.052	8.856
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Linearna	4.913	2807	1.229	1.185	0.267	-9.066	8.556
Sopot	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Kubna	7.384	1083	1.185	1.149	0.273	-6.971	11.510
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Linearna	6.914	1083	1.241	1.175	0.382	-6.392	11.650
Vrčin	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Kubna	6.955	598	1.901	1.763	0.368	-5.376	11.040
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Linearna	7.086	598	2.140	1.962	0.503	-5.750	11.200
Centar i Borča	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Kubna	4.000	15707	1.028	1.011	0.176	-10.032	12.165
	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Linearna	3.993	15707	1.026	1.006	0.186	-9.979	11.205
Kumodraž	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Kubna	5.282	3482	1.187	1.153	0.237	-9.712	9.076
	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Linearna	5.308	3482	1.191	1.153	0.257	-9.303	9.035
Ostružnica	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Kubna	5.340	2445	1.211	1.188	0.059	-9.134	9.890
	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Linearna	5.325	2445	1.215	1.189	0.074	-9.127	9.110
Zemun	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Kubna	2.471	6120	1.043	0.986	-0.250	-9.452	9.927
	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Linearna	2.443	6120	1.041	0.984	-0.249	-9.432	9.789
Celokupan	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Kubna	3.923	27395	1.065	1.054	0.079	-10.032	12.165
	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Linearna	3.915	27395	1.064	1.052	0.089	-9.979	11.205

Tabela E-6 : Upoređenje visina interpolovanih iz DMT5 i visina tačaka poligonskih mreža



Slika E-19 : Greške upoređenja visina tačaka poligonske mreže grada Beograda i visina interpolovanih iz DTK5 DMT-a za područje Beograda (centar, Borča, Kumodraž, Ostružnica i Zemun) – tačke poligonske mreže sa grubim greškama su odstranjene(Izveštaj E-33)



E.6 Upoređenje visina interpolovanih iz DMT25 i visina dobijenih iz DOF5, ODK5, DTK5, TP1 i PM – prikaz po nagibima terena

Nagib terena		Barajevo		Lazarevac		Sopot		Vrčin		Kruševac	
od	do	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV
0,0	5,0	1,076	1,063	1,057	1,052	1,107	1,079	1,591	1,583	1,524	1,170
5,0	10,0	0,998	0,945	1,146	1,119	1,148	1,127	1,571	1,518	1,851	1,656
10,0	15,0	1,286	1,092	1,322	1,273	1,326	1,255	2,715	2,399	2,283	1,992
15,0	20,0	1,467	1,343	2,461	2,263	1,166	1,082	3,063	2,392	-	-
20,0	25,0	1,742	1,395	1,298	1,255	2,137	2,032	2,509	2,493	-	-
		1,104	1,041	1,154	1,130	1,182	1,145	1,915	1,775	1,557	1,220

Nagib terena		Broj merenja (broj visina tačaka)						
od	do	Ba	La	So	Vč	Kš	Σ	
0,0	5,0	541	1626	369	253	3179	5968	
5,0	10,0	474	868	464	213	243	2262	
10,0	15,0	124	204	178	81	34	621	
15,0	20,0	45	57	50	37	5	194	
20,0	25,0	23	30	12	12	0	77	
	Σ	1207	2785	1073	596	3461	9122	

Nagib terena		Prosečna greška sa težinama		Prosečna greška bez težina	
od	do	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV
0,0	5,0	1,353	1,145	1,293	1,206
5,0	10,0	1,258	1,200	1,380	1,301
10,0	15,0	1,629	1,480	1,884	1,680
15,0	20,0	2,102	1,821	2,177	1,859
20,0	25,0	1,804	1,675	1,974	1,862
		1,375	1,208	1,775	1,606

Tabela E-7 : Statistički pokazatelji upoređenja visina interpolovanih iz DMT5 (DOF5) i visina tačaka poligonske mreže grada Beograda

Eksperimentalna ocena kvaliteta DMT25 formiranog po predloženoj metodologiji

Nagib terena		Centar i Borča		Kumodraž		Zemun		Ostružnica	
od	do	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV
0,0	5,0	0,949	0,937	1,017	1,002	0,965	0,925	1,031	1,030
5,0	10,0	1,166	1,143	1,135	1,097	1,330	1,323	1,168	1,122
10,0	15,0	1,581	1,510	1,893	1,765	2,214	2,182	1,673	1,633
15,0	20,0	1,396	1,390	2,053	2,030	1,430	1,389	1,682	1,677
20,0	25,0	1,271	1,270	2,536	2,411	1,818	1,802	1,602	1,600
25,0	30,0	1,537	1,494	1,873	1,873	2,489	2,488	3,096	3,021
30,0	35,0	1,728	1,593	1,436	1,434	1,472	1,362	1,336	1,336
		1,025	1,008	1,162	1,131	1,007	0,969	1,205	1,189

Nagib terena		Broj merenja (broj visina tačaka)					Σ
od	do	Centar i Borča	Kumodraž	Zemun	Ostružnica		
0,0	5,0	11909	2173	5755	1602	21439	
5,0	10,0	3021	995	157	484	4657	
10,0	15,0	361	158	31	142	692	
15,0	20,0	144	64	36	84	328	
20,0	25,0	120	27	28	65	240	
25,0	30,0	61	30	23	34	148	
30,0	35,0	30	18	15	22	85	
		15646	3465	6045	2433	27589	

Nagib terena		Prosečna greška sa težinama		Prosečna greška bez težina	
od	do	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV
0,0	5,0	0,967	0,948	0,991	0,974
5,0	10,0	1,166	1,138	1,202	1,175
10,0	15,0	1,708	1,631	1,856	1,790
15,0	20,0	1,621	1,608	1,661	1,643
20,0	25,0	1,616	1,591	1,865	1,819
25,0	30,0	2,202	2,166	2,327	2,294
30,0	35,0	1,528	1,456	1,500	1,435
		1,056	1,033	1,681	1,642

Tabela E-8 : Statistički pokazatelji upoređenja visina interpolovanih iz DMT5 (DTK5) i visina tačaka poligonske mreže grada Beograda



Eksperimentalna ocena kvaliteta DMT25 formiranog po predloženoj metodologiji

Nagib terena	Kruševac		Novi Pazar		Valjevo 1		Valjevo 2		Pančevo		Čačak		Barajevo		Lazarevac		Sopot		Vrčin		
	od	do	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV	
0,0	5,0	2,225	1,829	3,223	3,016	2,470	2,436	2,432	2,430	1,398	1,393	1,704	1,652	3,686	3,617	2,828	2,827	2,329	2,326	2,629	2,609
5,0	10,0	2,751	2,656	3,650	3,280	2,654	2,650	2,994	2,918	2,822	2,815	2,901	2,784	4,324	4,293	3,110	3,086	2,820	2,788	2,846	2,816
10,0	15,0	3,725	3,691	4,025	3,517	3,174	3,171	4,013	3,851	3,735	3,733	3,981	3,867	5,298	5,291	3,908	3,904	3,679	3,570	3,329	3,328
15,0	20,0	5,089	5,087	4,871	4,224	3,760	3,748	4,667	4,540	4,811	4,811	5,755	5,688	6,064	6,027	4,807	4,789	4,218	3,800	4,067	4,065
20,0	25,0	6,314	6,226	5,745	5,007	4,451	4,430	5,429	5,269	5,422	5,395	7,175	7,130	6,392	6,329	5,605	5,491	6,726	6,566	5,069	4,869
25,0	30,0	7,086	6,933	6,228	5,462	5,249	5,180	6,427	6,354	5,871	5,782	8,202	8,193	6,577	6,547	6,229	5,990	-	-	5,876	5,784
30,0	35,0	7,861	7,644	6,786	5,950	5,733	5,704	6,894	6,722	7,186	7,171	9,106	9,106	7,182	7,158	6,763	6,367	-	-	6,810	6,568
35,0	40,0	8,262	8,147	6,433	6,130	6,040	6,005	7,513	7,411	7,478	7,247	10,067	10,068	6,949	6,814	6,482	6,073	-	-	-	-
40,0	45,0	8,643	8,441	6,967	6,540	5,347	5,280	7,527	7,464	8,355	8,278	10,212	10,201	6,710	5,976	7,528	6,912	-	-	-	-
45,0	50,0	10,232	9,913	7,440	6,972	5,720	5,719	7,307	7,165	-	-	10,085	10,085	-	-	7,434	6,296	-	-	-	-
50,0	55,0	8,822	8,753	-	-	4,363	3,624	-	-	-	-	12,036	12,041	-	-	8,629	7,603	-	-	-	-
		2,952	2,748	4,470	3,953	3,440	3,426	4,073	3,958	1,777	1,772	3,701	3,638	4,482	4,437	3,482	3,455	2,662	2,629	3,140	3,119

Nagib terena	Broj merenja (broj visina tačaka)															Σ
	od	do	KŠ	NP	VA-1	VA-2	PA	ČA	Ba	La	So	Vč	Σ			
0,0	5,0	212494	5325	2434	2824	152482	35766	3801	76518	1283	2793	495720				
5,0	10,0	84564	6368	7065	8014	15193	20917	2284	51482	690	2942	199519				
10,0	15,0	35311	7250	9129	7963	4493	12306	1050	28544	119	1355	107520				
15,0	20,0	13678	5128	5641	4752	1518	6234	531	12412	32	558	50484				
20,0	25,0	6389	3186	2571	2217	591	3377	289	5407	11	251	24289				
25,0	30,0	3373	1750	1046	915	211	1787	98	2281	0	108	11569				
30,0	35,0	1417	672	429	360	106	832	49	915	0	38	4818				
35,0	40,0	644	269	140	130	57	411	19	379	0	0	2049				
40,0	45,0	219	93	64	50	25	191	13	130	0	0	785				
45,0	50,0	97	41	18	24	0	111	0	46	0	0	337				
50,0	55,0	33	0	10	0	0	40	0	18	0	0	101				
		358219	30082	28547	27249	174676	81972	8134	178132	2135	8045	897191				

Nagib terena	Prosečna greška sa težinama		Prosečna greška bez težina		
	od	do	RMSE	STDEV	RMSE
0,0	5,0	2,121	1,943	2,572	2,495
5,0	10,0	2,930	2,856	3,126	3,047
10,0	15,0	3,818	3,745	3,924	3,832
15,0	20,0	4,910	4,820	4,858	4,734
20,0	25,0	5,936	5,773	5,884	5,729
25,0	30,0	6,755	6,548	6,465	6,306
30,0	35,0	7,490	7,239	7,199	6,998
35,0	40,0	7,941	7,797	7,501	7,350
40,0	45,0	8,382	8,171	7,780	7,531
45,0	50,0	9,136	8,861	8,197	7,877
50,0	55,0	9,897	9,698	8,891	8,552
		3,097	2,977	6,372	6,180

Tabela E-9 : Statistički pokazatelji upoređenja visina interpolovanih iz DMT25 i visina visinskih tačaka dobijenih iz projekata ortofotoprodukcije (DOF5)

Eksperimentalna ocena kvaliteta DMT25 formiranog po predloženoj metodologiji

Nagib terena		Kruševac		Novi Pazar		Valjevo 1		Valjevo 2		Čačak	
od	do	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV
0,0	5,0	4,737	4,422	4,329	4,256	3,309	3,154	2,582	2,547	3,337	3,098
5,0	10,0	4,075	3,975	4,113	3,883	3,818	3,520	3,450	3,195	3,997	3,743
10,0	15,0	4,407	4,340	4,486	4,116	4,549	3,889	4,319	3,854	5,248	5,004
15,0	20,0	5,303	5,263	4,708	4,278	5,422	4,518	5,202	4,611	6,064	5,718
20,0	25,0	5,872	5,753	5,321	4,891	6,124	5,191	6,064	5,375	6,335	5,833
25,0	30,0	6,689	6,542	5,525	5,005	6,287	5,214	6,769	5,572	6,564	6,104
30,0	35,0	7,644	7,116	6,126	5,524	6,346	5,079	8,166	6,629	6,951	6,469
35,0	40,0	8,191	7,162	6,995	6,110	7,460	5,682	6,973	5,638	7,225	6,872
40,0	45,0	9,283	8,150	7,746	6,940	7,620	6,063	8,464	5,813	7,020	6,997
45,0	50,0	11,414	8,923	8,757	8,552	5,135	4,566	8,426	4,910	7,398	7,345
50,0	55,0	8,517	7,543	8,672	7,334	-	-	-	-	6,484	6,346
		4,774	4,558	4,636	4,325	4,571	3,969	4,449	3,945	4,514	4,228

Nagib terena		Broj merenja (broj visina tačaka)							Σ		
od	do	KŠ	NP	VA-1	VA-2	ČA	Σ	RMSE	STDEV		
0,0	5,0	17862	4861	1933	1513	16232	42401	4,074	3,831		
5,0	10,0	8658	4260	4719	3804	5343	26784	3,938	3,733		
10,0	15,0	5638	4376	4191	3236	4203	21644	4,612	4,283		
15,0	20,0	2806	3046	2081	1828	3112	12873	5,372	4,959		
20,0	25,0	1414	2025	981	871	1936	7227	5,912	5,425		
25,0	30,0	695	946	441	435	1172	3689	6,330	5,765		
30,0	35,0	355	375	198	185	606	1719	7,007	6,290		
35,0	40,0	190	165	78	97	182	712	7,437	6,502		
40,0	45,0	90	55	30	39	82	296	8,144	7,133		
45,0	50,0	43	23	10	14	49	139	9,018	7,725		
50,0	55,0	14	11	0	0	29	54	7,530	6,880		
Σ		37765	20143	14662	12022	32946	117538	4,620	4,295	7,016	6,275

Nagib terena		Prosečna greška sa težinama		Prosečna greška bez težina	
od	do	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV
0,0	5,0	4,074	3,831	4,181	3,991
5,0	10,0	3,938	3,733	4,358	4,108
10,0	15,0	4,612	4,283	5,158	4,764
15,0	20,0	5,372	4,959	5,990	5,486
20,0	25,0	5,912	5,425	6,656	6,060
25,0	30,0	6,330	5,765	7,136	6,390
30,0	35,0	7,007	6,290	7,925	6,942
35,0	40,0	7,437	6,502	8,254	7,070
40,0	45,0	8,144	7,133	9,016	7,650
45,0	50,0	9,018	7,725	8,474	7,932
50,0	55,0	7,530	6,880	7,954	7,094
		4,620	4,295	7,016	6,275

Tabela E-10: Statistički pokazatelji upoređenja visina interpolovanih iz DMT25 i visina tačaka visinskih linija dobijenih iz projekata ortofotoprodukcije (DOF5)



Ekperimentalna ocena kvaliteta DMT25 formiranog po predloženoj metodologiji

Nagib terena		Barajevo		Lazarevac		Sopot		Vrčin		Pančevo	
od	do	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV
0,0	5,0	3,646	3,564	1,876	1,866	2,666	2,612	2,060	2,056	1,771	1,754
5,0	10,0	3,587	3,565	2,298	2,298	2,506	2,486	2,429	2,425	2,849	2,849
10,0	15,0	3,588	3,583	3,074	3,074	3,198	3,172	2,806	2,795	3,519	3,516
15,0	20,0	3,793	3,792	3,813	3,792	3,865	3,864	3,260	3,259	4,244	4,222
20,0	25,0	4,024	4,024	4,525	4,458	4,406	4,390	3,404	3,394	4,806	4,742
25,0	30,0	4,484	4,469	4,872	4,738	4,919	4,881	3,925	3,924	5,340	5,193
30,0	35,0	5,207	5,146	4,963	4,766	5,229	5,203	3,530	3,530	5,920	5,640
35,0	40,0	5,831	5,673	5,309	5,195	5,521	5,478	4,405	4,404	6,362	5,922
40,0	45,0	5,777	5,591	5,614	5,346	5,319	5,295	5,348	4,357	6,513	6,032
45,0	50,0	6,337	6,130	5,818	5,582	4,883	4,833	-	-	6,739	5,963
50,0	55,0	7,187	7,110	5,799	5,666	4,610	4,584	-	-	7,676	6,231
55,0	60,0	7,471	7,424	6,548	6,349	6,221	6,217	-	-	6,403	5,730
		<b>3,680</b>	<b>3,646</b>	<b>2,480</b>	<b>2,468</b>	<b>3,132</b>	<b>3,108</b>	<b>2,577</b>	<b>2,571</b>	<b>2,854</b>	<b>2,802</b>

Nagib terena		Broj merenja (broj visina tačaka):								Prosečna greška sa težinama		Prosečna greška bez težina	
od	do	Ba	La	So	Vč	Pa	Σ	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV
0,0	5,0	82717	260691	95149	5406	177141	621104			2,295	2,261	2,502	2,462
5,0	10,0	126098	233500	210967	10043	51756	632364			2,715	2,703	2,773	2,763
10,0	15,0	50334	78703	127480	4183	33768	294468			3,269	3,256	3,250	3,241
15,0	20,0	24544	30685	62707	1841	17913	137690			3,885	3,877	3,808	3,798
20,0	25,0	11556	13674	28816	775	10398	65219			4,423	4,390	4,261	4,227
25,0	30,0	4847	5590	13101	306	6339	30183			4,927	4,850	4,732	4,661
30,0	35,0	2052	2310	5378	118	3958	13816			5,379	5,243	5,032	4,910
35,0	40,0	793	865	2195	41	2502	6396			5,869	5,638	5,524	5,360
40,0	45,0	277	342	805	10	1518	2952			6,034	5,715	5,731	5,352
45,0	50,0	88	125	341	0	735	1289			6,183	5,661	5,985	5,649
50,0	55,0	56	69	136	0	288	549			6,758	5,896	6,431	5,969
55,0	60,0	35	30	59	0	112	236			6,547	6,208	6,678	6,460
		<b>303397</b>	<b>626584</b>	<b>547134</b>	<b>22723</b>	<b>306428</b>	<b>1806266</b>			<b>2,974</b>	<b>2,948</b>	<b>4,916</b>	<b>4,734</b>

Tabela E-11 : Statistički pokazatelji upoređenja visina interpolovanih iz DMT25 i visina tačaka izohipsi digitalizovanih sa ODK5





Eksperimentalna ocena kvaliteta DMT25 formiranog po predloženoj metodologiji

Nagib terena		Barajevo		Lazarevac		Sopot		Vrčin		Kruševac	
od	do	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV
0,0	5,0	2,085	2,056	1,608	1,598	2,325	2,311	2,635	2,620	1,140	1,126
5,0	10,0	2,461	2,397	2,013	1,946	2,017	1,984	2,165	2,709	1,709	1,608
10,0	15,0	3,054	2,896	2,361	2,110	2,686	2,592	2,628	2,525	1,992	1,983
15,0	20,0	3,993	3,397	3,215	3,002	3,879	3,701	3,889	3,851	-	-
20,0	25,0	4,655	3,951	-	-	3,172	3,141	-	-	-	-
		2,429	2,339	1,796	1,749	2,347	2,301	2,765	2,721	1,197	1,174

Nagib terena		Broj merenja (broj visina tačaka)							
od	do	Ba	La	So	Vc	Kš	Σ		
0,0	5,0	588	1849	361	238	3188	6224		
5,0	10,0	481	784	512	242	256	2275		
10,0	15,0	101	148	138	78	16	481		
15,0	20,0	30	27	50	30	0	137		
20,0	25,0	12	0	14	0	0	26		
		1212	2808	1075	588	3460	9143		

Nagib terena		Prosečna greška sa težinama		Prosečna greška bez težina	
od	do	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV
0,0	5,0	1,557	1,543	2,029	2,013
5,0	10,0	2,176	2,116	2,225	2,163
10,0	15,0	2,645	2,495	2,569	2,445
15,0	20,0	3,766	3,543	3,757	3,503
20,0	25,0	3,927	3,538	3,983	3,569
		1,859	1,813	3,021	2,818

Tabela E-14: Statistički pokazatelji upoređenja visina interpolovanih iz DMT25 i visina tačaka poligonske mreže grada Beograda (DOF5 projekti)

Nagib terena		Centar i Borča		Kumodraž		Zemun		Ostružnica	
od	do	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV
0,0	5,0	1,796	1,793	2,144	2,143	2,142	2,138	2,030	2,029
5,0	10,0	2,061	2,052	1,972	1,900	3,857	3,849	2,196	2,118
10,0	15,0	2,800	2,740	3,615	3,538	6,880	6,769	3,164	3,050
15,0	20,0	3,320	3,309	4,799	4,710	4,939	4,842	4,225	4,070
20,0	25,0	3,905	3,748	5,287	5,282	5,054	4,953	-	-
25,0	30,0	-	-	5,143	5,027	2,847	1,863	-	-
		1,898	1,891	2,265	2,235	2,434	2,422	2,135	2,111

Nagib terena		Broj merenja (broj visina tačaka)				
od	do	Centar i Borča	Kumodraž	Zemun	Ostružnica	Σ
0,0	5,0	11865	2167	6589	1854	22475
5,0	10,0	3383	1448	371	487	5689
10,0	15,0	348	179	97	71	695
15,0	20,0	68	50	45	22	185
20,0	25,0	28	18	31	0	77
25,0	30,0	0	11	11	0	22
		15692	3873	7144	2434	29143

Nagib terena		Prosečna greška sa težinama		Prosečna greška bez težina	
od	do	RMSE	STDEV	RMSE	STDEV
0,0	5,0	1,957	1,954	2,033	2,031
5,0	10,0	2,213	2,185	2,638	2,604
10,0	15,0	3,863	3,785	4,423	4,334
15,0	20,0	4,282	4,228	4,367	4,296
20,0	25,0	4,729	4,638	4,787	4,707
25,0	30,0	4,090	3,791	4,090	3,791
		2,111	2,098	3,859	3,757

Tabela E-15: Statistički pokazatelji upoređenja visina interpolovanih iz DMT25 i visina tačaka poligonske mreže grada Beograda za područje Beograd DTK5

### E.7 Upoređenje visina digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DMT25 sa visinama interpolovanim iz DMT5 (DOF5) za područje grada Beograda

NAPOMENA : Prikaz test područja pod nazivom Beograd 2003 (DOF5) dat je u poglavlju C.4 (Slika C-2).

Vrsta kontrolnih tačaka		RMSE <sub>K</sub> [m]	RMSE <sub>L</sub> [m]	Broj tačaka	n <sub>m</sub>	Maksimalna razlika [m]	n <sub>v</sub>	
		DMT25 kubna	DMT25 Linearna					
DMT5 linearna interpolacija	KOTE	1.90		1194	1165	-18.77	29	
	TRIGONOMETRI	1.72		2674	2641	15.93	33	
	KONTROLNE TAČKE	ZBIRNO (A-L)	2.02	2.16	15103	15035	18.49	68
		A - ravan (čisto)	1.14	1.11	7376	7376	9.86	0
		B - ravan (naselje)	1.55	1.58	1224	1223	11.00	1
		C - ravan (šume)	1.91	1.92	665	663	-13.30	2
		D - brežuljkast, do 20° (čisto)	1.85	2.01	2434	2433	15.44	1
		E - brežuljkast, do 20° (naselje)	2.07	2.13	940	938	-13.94	2
		F - brežuljkast, do 20° (šume)	3.93	3.92	448	434	-16.00	14
		G - brežuljkast (rečne doline)	2.36	3.35	977	977	-14.04	0
		H - brežuljkast (rečne doline obrasle)	3.54	4.06	308	305	15.30	3
		I - nagib preko 20° (naselje)	1.56	1.52	8	8	2.91	0
		J - nagib preko 20° (šume)	6.06	6.00	263	233	17.83	30
		K - nagib preko 20° (rečne doline)	3.13	2.58	4	4	5.42	0
L - nagib preko 20° (rečne doline obrasle)	4.14	4.46	453	441	18.49	12		
DMT5 kubna interpolacija	KOTE	1.81		1194	1165	-18.78	29	
	TRIGONOMETRI	1.54		2674	2641	16.39	33	
	KONTROLNE TAČKE	ZBIRNO (A-L)	2.02	2.16	15103	15035	-18.46	68
		A - ravan (čisto)	1.16	1.13	7378	7378	9.81	0
		B - ravan (naselje)	1.56	1.61	1223	1222	11.05	1
		C - ravan (šume)	1.90	1.90	667	665	-11.11	2
		D - brežuljkast, do 20° (čisto)	1.86	2.07	2443	2443	-15.41	0
		E - brežuljkast, do 20° (naselje)	2.07	2.19	943	941	-11.78	2
		F - brežuljkast, do 20° (šume)	4.02	4.03	448	430	-16.35	18
		G - brežuljkast (rečne doline)	2.41	3.54	1006	1006	9.35	0
		H - brežuljkast (rečne doline obrasle)	3.54	4.14	315	312	13.24	3
		I - nagib preko 20° (naselje)	1.52	1.52	8	8	2.98	0
		J - nagib preko 20° (šume)	6.18	6.12	262	231	-18.46	31
		K - nagib preko 20° (rečne doline)	2.35	2.27	5	5	4.65	0
L - nagib preko 20° (rečne doline obrasle)	4.13	4.52	469	457	18.23	12		

Tabela E-16: Sažeti prikaz statistike upoređenja visina interpolovanih iz DMT25 (TK25) i visina interpolovanih iz DMT5 za područje Beograd 2003 DOF5; n<sub>m</sub> je broj tačaka kod kojih je  $\Delta Z_k < 5m$  (za kote i trigonometre), odnosno  $\Delta Z_k < 10m$  (za kontrolne tačke); n<sub>v</sub> je broj tačaka kod kojih je  $\Delta Z_k > 5m$  (za kote i trigonometre), odnosno  $\Delta Z_k > 10m$  (za kontrolne tačke) (Stojanovic 2004)



Ekperimentalna ocena kvaliteta DMT25 formiranog po predloženoj metodologiji

Tip kontrolnih tačaka	Tip interpolacije iz DMT25	Sa grubim greškama						Bez grubih grešaka					
		Broj tačaka	RMSE [m]	$\sigma$ [m]	Prosečna gr. [m]	Min. greška [m]	Maks. greška [m]	Broj tačaka	RMSE [m]	$\sigma$ [m]	Prosečna gr. [m]	Min. greška [m]	Maks. greška [m]
Trigonometri	-	2674	1,717	1,535	0,769	-6,408	15,930	2641	1,503	1,327	0,704	-4,454	7,200
Kote	-	1194	1,896	1,896	-0,048	-18,774	15,959	1165	1,335	1,334	0,017	-6,000	7,000
A-L	Kubna	15103	2,020	2,020	0,015	-17,778	18,486	15035	1,824	1,824	-0,006	-9,649	9,784
	Linearna	15103	2,162	2,160	-0,110	-17,469	17,359	15035	1,996	1,992	-0,131	-15,436	9,998
A - ravan, čist	Kubna	7376	1,143	1,143	-0,024	-8,822	9,673	7376	1,143	1,143	-0,024	-8,822	9,673
	Linearna	7376	1,105	1,105	-0,022	-8,046	9,864	7376	1,105	1,105	-0,022	-8,046	9,864
B - ravan, izgrađen	Kubna	1224	1,554	1,501	0,402	-7,761	10,062	1223	1,527	1,476	0,394	-7,761	7,693
	Linearna	1224	1,579	1,487	0,531	-8,598	11,002	1223	1,548	1,457	0,522	-8,598	7,675
C - ravan, šuma	Kubna	665	1,912	1,862	-0,436	-13,295	5,404	663	1,793	1,748	-0,400	-8,214	5,404
	Linearna	665	1,920	1,885	-0,367	-12,542	9,998	663	1,809	1,778	-0,332	-8,887	9,998
D - do 20°, čist	Kubna	2434	1,847	1,845	-0,083	-10,068	9,608	2433	1,836	1,834	-0,079	-9,468	9,608
	Linearna	2434	2,014	2,013	-0,070	-15,436	8,711	2433	2,006	2,005	-0,067	-15,436	8,711
E - do 20°, izgrađen	Kubna	940	2,067	2,028	0,399	-13,936	12,005	938	1,980	1,939	0,402	-6,440	7,586
	Linearna	940	2,127	2,054	0,556	-12,983	10,021	940	2,127	2,054	0,556	-12,983	10,021
F - do 20°, šuma	Kubna	448	3,929	3,888	0,567	-15,998	14,733	434	3,278	3,222	0,605	-8,346	9,784
	Linearna	448	3,918	3,870	0,614	-15,539	14,324	434	3,302	3,238	0,647	-8,694	9,907
G - do 20°, rečne doline	Kubna	977	2,360	2,333	-0,356	-9,079	9,351	977	2,360	2,333	-0,356	-9,079	9,351
	Linearna	977	3,349	2,708	-1,969	-14,040	8,448	977	3,349	2,708	-1,969	-14,040	8,448
H - do 20°, rečne doline obrasle	Kubna	308	3,536	3,474	-0,657	-10,661	15,319	305	3,334	3,256	-0,714	-8,988	8,267
	Linearna	308	4,065	3,737	-1,599	-10,419	15,000	305	3,906	3,533	-1,665	-10,419	8,142
I - preko 20°, izgrađen	Kubna	8	1,556	1,539	0,229	-1,857	2,906	8	1,556	1,539	0,229	-1,857	2,906
	Linearna	8	1,523	1,502	0,251	-1,480	2,852	8	1,523	1,502	0,251	-1,480	2,852
J - preko 20°, šuma	Kubna	263	6,057	5,957	1,095	-17,778	17,834	233	4,358	4,334	0,460	-9,350	9,467
	Linearna	263	5,996	5,897	1,084	-17,469	17,359	233	4,398	4,374	0,459	-9,058	9,875
K - preko 20°, rečne doline	Kubna	4	3,132	2,661	1,652	-1,500	5,416	4	3,132	2,661	1,652	-1,500	5,416
	Linearna	4	2,583	2,577	0,183	-2,340	4,121	4	2,583	2,577	0,183	-2,340	4,121
L - preko 20°, rečne doline obrasle	Kubna	453	4,144	4,144	-0,018	-10,944	18,486	441	3,544	3,533	-0,287	-9,649	9,054
	Linearna	453	4,462	4,356	-0,968	-10,591	16,685	441	4,019	3,824	-1,238	-10,000	9,876

Tabela E-17: Statistički pokazatelji upoređenja visina interpolovanih iz DMT25 (TK25) i visina interpolovanih iz DMT5 za područje Beograd 2003 DOF5; korišćena je LINEARNA interpolacija visina iz DMT5; prag za izbacivanje grubih grešaka je 10m za kontrolne tačke i 5m za trigonometre i kote



Eksperimentalna ocena kvaliteta DMT25 formiranog po predloženoj metodologiji

Tip kontrolnih tačaka	Tip interpolacije iz DMT25	Sa grubim greškama						Bez grubih grešaka					
		Broj tačaka	RMSE [m]	$\sigma$ [m]	Prosečna gr. [m]	Min. greška [m]	Maks. greška [m]	Broj tačaka	RMSE [m]	$\sigma$ [m]	Prosečna gr. [m]	Min. greška [m]	Maks. greška [m]
Trigonometri	-	2674	1,540	1,432	0,568	-6,561	16,385	2641	1,312	1,211	0,505	-4,444	4,963
Kote	-	1194	1,810	1,809	-0,022	-18,780	16,045	1165	1,214	1,214	0,042	-4,699	4,585
A-L	Kubna	15171	2,048	2,048	0,007	-18,464	18,233	15098	1,846	1,845	-0,020	-9,793	9,994
	Linearna	15171	2,231	2,228	-0,128	-18,155	17,314	15098	2,061	2,056	-0,154	-15,411	10,066
A - ravan, čist	Kubna	7378	1,161	1,161	-0,016	-8,885	9,806	7378	1,161	1,161	-0,016	-8,885	9,806
	Linearna	7378	1,132	1,132	-0,013	-8,679	9,997	7378	1,132	1,132	-0,013	-8,679	9,997
B - ravan, izgrađen	Kubna	1223	1,562	1,505	0,417	-7,632	10,108	1222	1,535	1,480	0,409	-7,632	7,483
	Linearna	1223	1,605	1,510	0,544	-9,412	11,048	1222	1,574	1,481	0,535	-9,412	7,201
C - ravan, šuma	Kubna	667	1,896	1,847	-0,426	-11,109	5,453	665	1,804	1,761	-0,395	-8,193	5,453
	Linearna	667	1,904	1,870	-0,358	-11,149	9,991	665	1,819	1,789	-0,328	-8,866	9,991
D - do 20°, čist	Kubna	2443	1,855	1,855	-0,027	-9,436	9,602	2443	1,855	1,855	-0,027	-9,436	9,602
	Linearna	2443	2,072	2,072	-0,018	-15,411	8,705	2443	2,072	2,072	-0,018	-15,411	8,705
E - do 20°, izgrađen	Kubna	943	2,074	2,019	0,477	-11,775	11,687	941	2,005	1,947	0,478	-6,128	7,754
	Linearna	943	2,187	2,090	0,644	-10,822	9,703	941	2,137	2,037	0,647	-6,251	7,772
F - do 20°, šuma	Kubna	448	4,021	3,979	0,582	-16,348	15,065	430	3,232	3,189	0,527	-9,753	9,994
	Linearna	448	4,033	3,983	0,629	-15,712	14,656	430	3,286	3,236	0,569	-8,607	10,066
G - do 20°, rečne doline	Kubna	1006	2,412	2,329	-0,627	-9,303	9,345	1006	2,412	2,329	-0,627	-9,303	9,345
	Linearna	1006	3,545	2,713	-2,282	-14,048	8,087	1006	3,545	2,713	-2,282	-14,048	8,087
H - do 20°, rečne doline obrasle	Kubna	315	3,535	3,433	-0,844	-10,673	13,242	312	3,365	3,244	-0,895	-8,896	8,523
	Linearna	315	4,139	3,712	-1,830	-10,486	12,923	312	4,009	3,536	-1,891	-10,486	8,398
I - preko 20°, izgrađen	Kubna	8	1,524	1,503	0,253	-1,953	2,976	8	1,524	1,503	0,253	-1,953	2,976
	Linearna	8	1,520	1,495	0,275	-1,576	2,922	8	1,520	1,495	0,275	-1,576	2,922
J - preko 20°, šuma	Kubna	262	6,176	6,069	1,146	-18,464	17,689	231	4,399	4,376	0,448	-9,267	9,235
	Linearna	262	6,124	6,018	1,134	-18,155	17,314	231	4,447	4,425	0,444	-9,083	9,403
K - preko 20°, rečne doline	Kubna	5	2,351	2,147	0,958	-1,607	4,647	5	2,351	2,147	0,958	-1,607	4,647
	Linearna	5	2,265	2,169	-0,654	-2,447	3,352	5	2,265	2,169	-0,654	-2,447	3,352
L - preko 20°, rečne doline obrasle	Kubna	469	4,131	4,123	-0,253	-11,118	18,233	457	3,577	3,540	-0,511	-9,793	8,864
	Linearna	469	4,522	4,344	-1,256	-11,482	16,432	457	4,124	3,835	-1,516	-11,482	9,541

Tabela E-18: Statistički pokazatelji upoređenja visina interpolovanih iz DMT25 (TK25) i visina interpolovanih iz DMT5 za područje Beograd 2003 DOF5; korišćena je KUBNA interpolacija visina iz DMT5; prag za izbacivanje grubih grešaka je 10m za kontrolne tačke i 5m za trigonometre i kote





## INDEKS

### a. Slike

Slika 2-1	: Automatska eliminacija pogrešnih merenja u okruženju SOCET SET-a .....	15
Slika 2-2	: Princip rada laserskog skeniranja iz vazduha.....	22
Slika 2-3	: Rezultat filtriranja LiDAR podataka primenom iterativne robustne linearne predikcije.....	26
Slika 2-4	: Upoređenje prelomnih linija terena dobijenih različitim postupcima.....	28
Slika 2-5	: Princip radarskog snimanja .....	31
Slika 2-6	: Preklap i senka kod SAR-a.....	32
Slika 2-7	: Princip interferometrije kod InSAR-a .....	33
Slika 2-8	: Primer korisničkog interfejsa softvera R2V firme Able Software Corp. sa vektorizovanim izohipsama .....	39
Slika 2-9	: Podešavanje parametara za vektorizaciju kod ArcScan ekstenzije softvera ArcGIS.....	40
Slika 2-10	: Ugao za limitiranje opsega u okviru kog se traži veza za nastavak prekinute linije .....	40
Slika 2-11	: Graf sa topologijom izohipsi.....	42
Slika 2-12	: Dijagram toka kod identifikacije izohipsi koju sprovodi operater i faze koje bi se mogle automatizovati obradom na računaru .....	42
Slika 3-1	: Primer uniformnog grid DMT-a .....	51
Slika 3-2	: Primer tekstualne datoteke u ESRI ArcView formatu sa podacima koji odgovaraju grid DMT-u .....	53
Slika 3-3	: Perspektivni prikaz DMT-a sa promenljivom veličinom elemenata grida .....	53
Slika 3-4	: Perspektivni prikaz hibridnog DMT-a sa gridom i ugrađenim prelomnim i strukturnim linijama terena .....	54
Slika 3-5	: Primer TIN-a sa predstavljanjem strukture preko stranica, tj. quad-edge struktura .....	55
Slika 3-6	: Modeliranje terena korišćenjem TIN-a .....	56
Slika 3-7	: DMT sa hibridnom strukturom podataka.....	58
Slika 3-8	: Primer profila terena površi određene metodom inverznih odstojanja na osnovu podataka u vidu izohipsi .....	60
Slika 3-9	: Izbor relevantnih tačaka po sektorima .....	61
Slika 3-10	: Kovarijaciona funkcija zavisnosti vrednosti od rastojanja između tačaka .....	64
Slika 3-11	: Poluvarigram .....	65
Slika 3-11a	: Bikubni pravougaoni element .....	65
Slika 3-12	: Perspektivni pogled grid DMT-a, gde se modeliranje površi terena vrši razbijanjem elementa grida na dva trougla.....	76
Slika 3-13	: Kriterijum Delaunay-jeve triangulacije (lokalni Delaunay-jevi trouglovi i stranice).....	77
Slika 3-14	: Delaunay-jeva triangulacija i Voronoi dijagram.....	78



Slika 3-15	: Procedura otkrivanja novih Delaunay-jevih stranica koje povezuju levu i desnu celinu .....	80
Slika 3-16	: Prikaz formiranja DT kod sweepline algoritma .....	81
Slika 3-17	: Insertovanje tačke sa brisanjem trouglova i triangulacijom poligona .....	82
Slika 3-18	: Insertovanje tačke korišćenjem Lawson-ovog kriterijuma .....	82
Slika 3-19	: Ulazni skup sa podacima u formi planarnog grafa sa pravim linijama (PSLG) i CDT triangulacija .....	84
Slika 3-20	: Primeri ograničenih Delaunay-jevih stranica i trouglova .....	85
Slika 3-21	: Ubacivanje linijskih segmenata u triangulaciju .....	86
Slika 3-22	: Izduženi trouglovi kod kojih je poluprečnik opisane kružnice veći od najkraće stranice trougla .....	87
Slika 3-23	: CDT sa izduženim trouglovima .....	87
Slika 3-24	: Profinjavanje triangulacije ubacivanjem novih tačaka na centre kružnica opisanih oko izduženih trouglova i naknadna lokalna prekorekcija trouglova da bi se zadovoljio Delaunay-jev kriterijum .....	88
Slika 3-25	: Deljenje linijskih segmenata čije opisane kružnice sadrže temena mreže .....	89
Slika 3-26	: AR kriterijum za ocenu kvaliteta trouglova u mreži i ubacivanje nove tačke u triangulaciju .....	89
Slika 3-27	: Izbor susednih tačaka u TIN-u .....	92
Slika 3-28	: Proračun normale na površ terena na osnovu susednih tačaka u mreži .....	93
Slika 3-29	: Voronoi površina B oko temena P .....	95
Slika 3-30	: Bézier-ova kontrolna mreža i Bézier-ov trougao (trougaona površinska zakrpa reda 4 i granične krive za kubnu zakrpu .....	97
Slika 3-31	: Kontinualnost za dva Bézier-ova trougla P i Q .....	98
Slika 3-32	: Uticaj kontrolnih tačaka na kontinualnost susednih Bézier-ovih trougaonih površi .....	100
Slika 3-33	: Označavanje vektora stranica i normala u trouglu .....	102
Slika 3-34	: Clough-Tocher šema kontrolnih tačaka .....	106
Slika 3-35	: Sukcesivno deljenje mreže .....	110
Slika 3-36	: Loop šema za deljenje mreže trouglova sa maskama .....	111
Slika 3-37	: Modifikovana Butterfly šema za deljenje mreže trouglova sa maskama .....	111
Slika 3-38	: Interpolacija po profilu sa najvećim padom .....	114
Slika 3-39	: Respektovanje strukturnih linija terena kod interpolacije po profilu sa najvećim padom .....	116
Slika 3-40	: Pojava horizontalnih trouglova kod TIN-a na osnovu podataka u vidu izohipsi .....	119
Slika 3-41	: Horizontalni trouglovi i tačke skeleta određeni korišćenjem središnjih tačaka linija i centroida .....	121
Slika 3-42	: Geomorfološki solidna ocena normala u tačkama izohipsi .....	124
Slika 3-43	: Kora i skeleton – konstrukcija korišćenjem Voronoi dijagrama i Delaunay-jeve triangulacija .....	125
Slika 3-44	: Kriterijum selekcije Voronoi stranica koje čine skelet i Delaunay-jevih stranica koje čine koru .....	125
Slika 3-45	: Voronoi stranice (VS) i srednje ose izohipsi .....	126
Slika 3-46	: Način određivanja visina za tačke skeleta .....	127
Slika 3-47	: Sibson-ov metod interpolacije (interpolacija prirodnog suseda) .....	127
Slika 3-48	: Vrednost visine u tački sračunata iz uslova pripadnosti tangentnoj ravni date referentne tačke .....	128
Slika 3-49	: Linearna i Hermite interpolacija .....	128
Slika 3-50	: Ocena nagiba u tačkama izohipsi .....	129
Slika 3-51	: Primer redukcije podataka kroz formiranje TIN-a .....	134
Slika 3-52	: VIPM progresivne mreže za LOD predstavljanje površi terena .....	135
Slika 3-53	: Profinjavanje mreže u zavisnosti od pogleda (VDPM) korišćenjem frustuma i greške za geometrijsku toleranciju u prostoru ekrana .....	135
Slika 3-54	: Primer neograničenog i ograničenog kvadratnog stabla .....	136
Slika 3-55	: Primer pukotina koje nastaju prilikom poligonalne predstave površi kvadratnim elementima kvadratnog stabla .....	136

Slika 3-56	: Podudarajuća triangulacija tačaka uređenih u kvadratno stablo.....	136
Slika 3-57	: Vidno polje ( view frustum) .....	137
Slika 4-1	: Korisnički interfejs Surfing-a.....	149
Slika 4-2	: Algoritam za formiranje TIN DMT-a implementiran u okviru softvera Surfing.....	150
Slika 4-3	: Dijalog sa podešavanjima za formiranje TIN DMT-a .....	151
Slika 4-4	: Upoređenje TIN-a (DMT-a) bez profinjenja i sa profinjenjem (eliminacija izduženih i tankih trouglova) .....	152
Slika 4-5	: Napredna podešavanja za formiranje DMT-a.....	153
Slika 4-6	: Proračun normala po profilu u tačkama vododelnica i vodoslivnica.....	156
Slika 4-7	: Proračun normala po profilu u tačkama izohipsi.....	157
Slika 4-8	: Uticaj algoritma za proračun normala na model površi terena.....	158
Slika 4-9	: Problem određivanja normale za tačku izohipse kada su dve tačke profila na istoj visini.....	159
Slika 4-10	: Proračun trougaonih zakrpa za trouglove razdvojene prelomnom linijom terena .....	160
Slika 4-11	: Rezultat modeliranja površi korišćenjem implementiranih postupaka za proračun Bézier-ovih trougaonih zakrpa sa respektovanjem prelomnih linija terena .....	161
Slika 4-12	: Rezultat modeliranja površi korišćenjem implementiranih postupaka za proračun Bézier-ovih trougaonih zakrpa.....	161
Slika 4-13	: Algoritam za ekstrakciju strukturnih linija terena iz TIN DMT-a formiranog na osnovu izohipsi.....	164
Slika 4-14	: Horizontalni trouglovi TIN-a dobijenog na osnovu izohipsi; segmenti i tačke izohipsi su prikazane narandžastom, a potencijalne forme terena plavom bojom .....	166
Slika 4-15	: Formiranje segmenata strukturnih linija povezivanjem središnjih tačaka linija koje spajaju središnje tačke linija koje seče strukturna linija – algoritam ME .....	167
Slika 4-16	: Formiranje segmenata strukturnih linija na osnovu osrednjenih težišta susednih trouglova – algoritam GC .....	167
Slika 4-17	: Formiranje segmenata strukturnih linija povezivanjem centara opisanih kružnica susednih trouglova – algoritam CC.....	168
Slika 4-18	: Formiranje segmenata strukturnih linija povezivanjem središnjih tačaka linija koje seče strukturna linija – algoritam EM .....	168
Slika 4-19	: Postupak određivanja tačke strukturne linije koristeći zahtev da je ta tačka lokalni ekstremum po profilu manje-više upravnom na strukturnu liniju.....	169
Slika 4-20	: Formiranje segmenata strukturnih linija korišćenjem Voronoi dijagrama i Delaunay-jeve triangulacije, tj. principa skeleta i kore – algoritam VS.....	170
Slika 4-21	: Povezivanje (produžavanje) segmenata detektovanih strukturnih linija do izohipsi.....	171
Slika 4-22	: Krivina krive u tački.....	174
Slika 4-23	: Redukcija grida – nivoi tačaka kod promenljivog grida sa čvorovima kvadratnog stabla.....	176
Slika 4-24	: Redukcija podataka - testiranje značaja tačke grida za modeliranje površi terena.....	176
Slika 4-25	: Proračun odstupanja tačke grida od profila definisanog susednim tačkama .....	177
Slika 4-26	: Dijalog sa parametrima za prelazak sa uniformnog na promenljivi grid.....	177
Slika 4-27	: Parametri za konstrukciju i isctavanje izohipsi.....	179
Slika 4-28	: Izohipse konstruisane u Surfing-u korišćenjem diskretizacije svake kubne trougaone zakrpe Bézier-ovog trougla sa 225 podtrouglova .....	180
Slika 4-29	: Verifikacija DMT-a korišćenjem funkcije za konstruisanje podužnog profila.....	180
Slika 4-30	: Prikaz 3D vizuelizacije u Surfing-u korišćenjem različitih opcija prikaza .....	182
Slika 4-31	: Funkcija za vizuelizaciju trouglova kod kojih je visinska razlika između temena veća od zadatog praga .....	185
Slika 4-32	: Odstupanje rekonstruisane površi terena (kubna Bézier-ova površ) od trougaonih faceta (linearna interpolacija iz TIN-a).....	186
Slika 4-33	: Funkcija za vizuelizaciju trouglova kod kojih kubna površ i površ trougaone facete odstupaju više od zadatog praga.....	187



Slika 5-1	: Primer jednog bloka za 7.5-minutni DEM .....	200
Slika 5-2	: Primer terena složene strukture sa kartografskom predstavom koja izuzetno komplikuje rekonstrukciju površi terena na osnovu digitalizovanih podataka .....	207
Slika 5-3	: Tipičan primer slaganja sadržaja nezavisno georeferenciranih RO situacije i kolorne karte TK25.....	213
Slika 5-4	: Tipičan primer slaganja sadržaja nezavisno skeniranih i georeferenciranih RO visinske predstave i kolorne karte TK25 .....	213
Slika 5-5	: Korisnički interfejs MapSoft-a .....	225
Slika 5-6	: Grafičko okruženje softvera SCOP++ .....	228
Slika 5-7	: Izbor optimalnih parametara interpolacije – ArcGIS Geostatistical Wizard .....	229
Slika 5-8	: Interfejs TopDM softvera za rukovanje DMT podacima .....	230
Slika 5-9	: Detalj kolorne karte ODK 1:5000 skenirane u koloru .....	234
Slika 5-10	: Detalj kolorne karte ODK 1:5000 skenirane u koloru nakon separacije sadržaja koji odgovara sepija tonovima i pretvaranja u sliku sa 1 bitom po pikselu .....	235
Slika 5-11	: Detalj oleate visinske predstave ODK 1:5000 skenirane u crno-belaj tehnici.....	235
Slika 5-12	: Detalj kolorne karte TK25 skenirane u koloru.....	236
Slika 5-13	: Detalj kolorne karte TK25 koja je skenirana u koloru nakon separacije sadržaja koji odgovara sepija tonovima i pretvaranja u sliku sa 1 bitom po pikselu .....	236
Slika 5-14	: Korisnički interfejs softvera DigiScan 2000 .....	240
Slika 5-15	: Odstupanja hidrografije digitalizovane sa radnih originala od georeferencirane i kalibrisane topografske karte .....	241
Slika 5-16	: Tipične greške kod automatske vektorizacije .....	242
Slika 5-17	: Greške kod automatske vektorizacije – uvećano .....	243
Slika 5-18	: Primer optimalne gustine tačaka za predstavljanje vektorizovane izohipse .....	243
Slika 5-19	: Primer prevelike gustine tačaka za predstavljanje vektorizovane izohipse .....	244
Slika 5-20	: Primer nedovoljne gustine tačaka za predstavljanje vektorizovane izohipse .....	244
Slika 5-21	: Primeri strukturnih i prelomnih linija koje su date na karti ali njihova digitalizacija ne bi bila racionalna.....	246
Slika 5-22	: Problematična mesta za interpolaciju splajn funkcijama .....	247
Slika 5-23	: Primer terena gde treba definisati površinu pod rekom .....	249
Slika 5-24	: Dijagram obrade podataka .....	252
Slika 5-25	: Primer ispoljavanja grešaka u podacima na konstruisanim izohipsama.....	253
Slika 5-26	: 3D vizuelizacija greške u ulaznim podacima u okruženju SurfInG-a.....	254
Slika 5-27	: Primer terena sa izrazito složenim reljefom.....	255
Slika A-1	: Kubna Bézier-ova kriva sa kontrolnim poligonom i princip deljenja po de Casteljau algoritmu .....	A-1
Slika A-2	: Bazne funkcije za kubnu Bézier-ovu krivu (splajn) .....	A-2
Slika A-3	: Baricentrične koordinate trougla .....	A-7
Slika A-4	: Kontrolna mreža za kubni Bézier-ov trougao i grafički prikaz rekurzivnog de Casteljau algoritma za proračun vrednosti površi u tački $P(u,v,w) =: P_{000}^3$ .....	A-8
Slika A-5	: Numeracija i raspored kontrolnih tačaka za Bézier-ove trouglove trećeg, četvrtog i petog stepena... A-9	A-9
Slika A-6	: Postupak deljenja Bézier-ovog trougla sukcesivnim ubacivanjem novih tačaka na sredinama stranica trouglova i formiranje novih kontrolnih mreža .....	A-11
Slika B-1	: DMT formiran samo na osnovu podataka izohipsi, bez korišćenja hidrografije .....	B-2
Slika B-2	: DMT formiran uz korišćenje digitalizovanih linija hidrografije gde su visine tačaka linija određene kubnom interpolacijom iz DMT-a formiranom na osnovu ostalih podataka .....	B-2
Slika B-3	: DMT formiran uz korišćenje digitalizovanih linija hidrografije gde su visine tačaka linija određene linearnom interpolacijom od presečnih tačaka sa izohipsama.....	B-2
Slika B-4	: DMT formiran uz korišćenje digitalizovanih linija hidrografije gde su visine tačaka linija određene kubnom interpolacijom iz DMT-a.....	B-3

Slika B-5	: DMT formiran uz korišćenje digitalizovanih linija hidrografije gde su visine tačaka linija određene linearnom interpolacijom od izohips; a podaci su dopunjeni automatski detektovanim strukturnim linijama .....	B-3
Slika B-6	: DMT formiran bez linija hidrografije; podaci izohipsi su dopunjeni automatski detektovanim strukturnim linijama.....	B-3
Slika B-7	: Prikaz rezultata dobijenih primenom algoritma ME.....	B-4
Slika B-8	: Prikaz rezultata dobijenih primenom algoritma GC.....	B-5
Slika B-9	: Prikaz rezultata dobijenih primenom algoritma CC.....	B-6
Slika B-10	: Prikaz rezultata dobijenih primenom algoritma EM.....	B-7
Slika B-11	: Prikaz rezultata dobijenih primenom algoritma VS .....	B-8
Slika B-12	: Upoređenje originalnih izohipsi na $e=10m$ i izohipsi na $e=5m$ interpolovanih iz DMT-a korišćenjem algoritma VS (CFDT=da, MCS=8m, LINK=da) sa varijacijama parametara za korigovanje visina tačaka visinskih linija (LIH) i tretiranja detektovanih linija kao prelomnih linija (LB).....	B-9
Slika B-13	: Upoređenje rezultata detekcije i ekstrakcije strukturnih linija primenom algoritama ME i VS .....	B-10
Slika B-14	: Test područje za realizaciju eksperimenta za ocenu kvaliteta različitih metoda formiranja DMT-a na osnovu ulaznih podataka u formi izohipsi .....	B-11
Slika B-15	: Rezultat detekcije i ekstrakcije strukturnih linija terena; korišćen je algoritam VS; parametri obrade: CFDT=da, RTSDV=1m, ITER=5, MCS=10m, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=11m ...	B-26
Slika B-16	: Upoređenje strukturnih i prelomnih linija terena merenih na fotogrametrijskom instrumentu; algoritam VS; parametri obrade: CFDT=da, RTSDV=1m, ITER=5, MCS=10m, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=11m .....	B-27
Slika B-17	: Grafički prikaz odstupanja rekonstruisane površi terena od teoretske površi; izohipse na $e=10m$ , CFDT=da, RTSDV=Ne, MaxSDV=Ne, MCS=Ne, DL=Ne, kubna interpolacija.....	B-28
Slika B-18	: Grafički prikaz odstupanja rekonstruisane površi terena od teoretske površi; izohipse na $e=10m$ ;CFDT=da, RTSDV=Ne, MaxSDV=Ne, MCS=Ne, DL=Ne, linearna interpolacija.....	B-29
Slika B-19	: Grafički prikaz odstupanja rekonstruisane površi terena od teoretske površi; izohipse na $e=10m$ ; CFDT=da, RTSDV=5m, ITER=5, MCS=Ne, DL=Ne, LB=Ne, LIH=Ne, LINK=Ne, MaxSDV=Ne, kubna interpolacija.....	B-29
Slika B-20	: Grafički prikaz odstupanja rekonstruisane površi terena od teoretske površi; izohipse na $e=10m$ uz dodatak izohipsi na $e=5m$ na ravnom terenu; CFDT=da, RTSDV=5m, ITER=5, MCS=10m, DL=VS, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10m, kubna interpolacija .....	B-30
Slika B-21	: Grafički prikaz odstupanja rekonstruisane površi terena od teoretske površi; izohipse na $e=10m$ ; CFDT=da, RTSDV=1m, ITER=5, MCS=10m, DL=VS, LB=Ne, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=11, kubna interpolacija.....	B-30
Slika B-22	: Grafički prikaz odstupanja rekonstruisane površi terena od teoretske površi; izohipse na $e=10m$ i sa definisanjem izohipsi gde padina prelazi naglo u dolinu; CFDT=da, RTSDV=Ne, MaxSDV=Ne, MCS=Ne, DL=Ne, kubna interpolacija.....	B-31
Slika B-23	: Grafički prikaz odstupanja rekonstruisane površi terena od teoretske površi; izohipse na $e=10m$ sa definisanjem izohipsi gde padina prelazi naglo u dolinu i izohipsama na $e=5m$ na ravnom terenu; CFDT=da, RTSDV=Ne, MaxSDV=Ne, MCS=Ne, DL=Ne, kubna interpolacija.....	B-31
Slika B-24	: Grafički prikaz odstupanja rekonstruisane površi terena od teoretske površi; izohipse na $e=10m$ sa definisanjem izohipsi gde padina prelazi u dolinu i izohipsama na $e=5m$ na ravnom terenu, CFDT=da, RTSDV=1m, ITER=5, MaxSDV=Ne, MCS=Ne, DL=Ne, kubna interpolacija .....	B-32
Slika B-25	: Grafički prikaz odstupanja rekonstruisane površi terena od teoretske površi; izohipse na $e=10m$ sa definisanjem izohipsi gde padina prelazi u dolinu i izohipsama na $e=5m$ na ravnom terenu; CFDT=da, RTSDV=1m, ITER=5, MCS=10m, DL=VS, LB=da, LIH=Ne, LINK=da, MaxSDV=10, kubna interpolacija.....	B-32
Slika B-26	: Grafički prikaz odstupanja rekonstruisane površi terena od teoretske površi; izohipse na $e=10m$ sa definisanjem izohipsi gde padina prelazi u dolinu i izohipsama na $e=5m$ na ravnom terenu; CFDT=da, RTSDV=1m, ITER=5, MCS=10m, DL=VS, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10, kubna interpolacija.....	B-33
Slika B-27	: Grafički prikaz odstupanja rekonstruisane površi terena od teoretske površi; izohipse na $e=10m$ sa definisanjem izohipsi gde padina prelazi u dolinu i izohipsama na $e=5m$ na ravnom terenu; CFDT=da, RTSDV=1m, ITER=5, MCS=10m, DL=VS, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10, linearna interpolacija.....	B-33



Slika B-28	: Test područje Valjeva za realizaciju eksperimenta sa ciljem uporedne analize različitih metoda formiranja DMT-a na osnovu ulaznih podataka u formi izohipsi .....	B-34
Slika B-29	: Rezultat detekcije i ekstrakcije strukturnih linija terena; korišćen je algoritam VS; parametri obrade: CFDT=da, RTSDV=1m, ITER=5, MCS=10m, LB=da, LIH=da, LINK=da, MaxSDV=10m ...	B-41
Slika B-30	: Grafički prikaz odstupanja rekonstruisane površi terena od teoretske površi; izohipse e=10m, CFDT=Ne, RTSDV=Ne, MaxSDV=Ne, MCS=Ne, DL=Ne, linearna interpolacija .....	B-42
Slika B-31	: Grafički prikaz odstupanja rekonstruisane površi terena od teoretske površi; izohipse na e=10m, CFDT=Ne, RTSDV=Ne, MaxSDV=Ne, MCS=Ne, DL=Ne, kubna interpolacija .....	B-42
Slika B-32	: Grafički prikaz odstupanja rekonstruisane površi terena od teoretske površi; izohipse na e=10m, CFDT=da, RTSDV=5m, ITER=5, MCS=10m, DL=VS, LB=da, LIH=da, LINK=DA, MaxSDV=10m, kubna interpolacija .....	B-43
Slika B-33	: Grafički prikaz odstupanja rekonstruisane površi terena od teoretske površi; izohipsi na e=10m, CFDT=da, RTSDV=1m, ITER=5, MCS=100m, DL=ME, LB=da, LIH=Ne, LINK=DA, MaxSDV=10m, kubna interpolacija .....	B-43
Slika B-34	: Greške dobijene korišćenjem interpolacije po metodi prirodnog suseda (NN) .....	B-44
Slika B-35	: Greške dobijene korišćenjem interpolacije po metodi inverznih odstojanja (IDWN12) .....	B-44
Slika B-36	: Greške dobijene korišćenjem interpolacije po metodi običnog kriginga (Ord. kriging) .....	B-45
Slika B-37	: Greške dobijene korišćenjem interpolacije po metodi konačnih razlika sa uslovom odvodnjavanja (ANUDEM algoritam, TopoToRaster) .....	B-45
Slika B-38	: Greške dobijene korišćenjem interpolacije po metodi radijalnih baznih funkcija; za baznu funkciju je izabrana multikvadratna funkcija (RBF-MQ) .....	B-46
Slika B-39	: Greške dobijene korišćenjem interpolacije po metodi radijalnih baznih funkcija; za baznu funkciju je izabran splajn sa tenzijom (RBF-ST ) .....	B-46
Slika B-40	: Greške dobijene korišćenjem interpolacije po metodi prirodnog suseda (NN, grid 5m) .....	B-47
Slika B-41	: Greške dobijene korišćenjem interpolacije po metodi inverznih odstojanja (IDWN12) .....	B-47
Slika B-42	: Greške dobijene korišćenjem interpolacije po metodi univerzalnog kriginga (Univerzalni kriging) ...	B-48
Slika B-43	: Greške dobijene korišćenjem interpolacije po metodi konačnih razlika sa uslovom odvodnjavanja (ANUDEM algoritam, TopoToRaster) .....	B-48
Slika B-44	: Greške dobijene korišćenjem interpolacije po metodi radijalnih baznih funkcija; za baznu funkciju je izabrana multikvadratna funkcija (RBF-MQ2) .....	B-49
Slika B-45	: Greške dobijene korišćenjem interpolacije po metodi radijalnih baznih funkcija; za baznu funkciju je izabran splajn sa tenzijom (RBF-ST ) .....	B-49
Slika B-46	: Greške dobijene korišćenjem interpolacije po metodi splajna sa tenzijom (T01N50); parametar težina iznosi 0.1, a broj tačaka za proračun je 50 .....	B-50
Slika B-47	: Greške dobijene korišćenjem interpolacije po metodi splajna sa tenzijom (T01N100); parametar težina iznosi 0.1, a broj tačaka za proračun je 100 .....	B-50
Slika B-48	: 3D prikaz DMT-a korišćenjem trougaonih faceta TIN-a; FLAT senke; DMT je formiran samo na osnovu izohipsi i bez detekcije i ugradnje strukturnih linija terena .....	B-51
Slika B-49	: 3D prikaz DMT-a korišćenjem trougaonih faceta TIN-a; FLAT senke; DMT je formiran samo na osnovu izohipsi i sa detekcijom i ugradnjom strukturnih linija terena (algoritam VS) .....	B-51
Slika B-50	: 3D prikaz terena korišćenjem trougaonih faceta TIN-a; FLAT senke; DMT je formiran na osnovu tačaka pravilnog grida na rastojanju od 25m; grid je interpolovan iz DMT-a formiranog na osnovu izohipsi i sa detekcijom i ugradnjom strukturnih linija terena (algoritam VS) .....	B-52
Slika B-51	: 3D prikaz terena korišćenjem trougaonih faceta TIN-a; GOURAUD senke; DMT formiran na osnovu tačaka pravilnog grida 25m; grid interpolovan iz DMT-a formiranog na osnovu izohipsi i sa detekcijom i ugradnjom strukturnih linija terena (algoritam VS) .....	B-52
Slika B-52	: 3D prikaz terena korišćenjem trougaonih faceta TIN-a; FLAT senke; DMT formiran na osnovu tačaka varijabilnog grida 25m i uz dodatak detektovanih strukturnih linija; grid i linije dobijene iz DMT-a formiranog na osnovu izohipsi i sa detekcijom i ugradnjom strukturnih linija terena (algoritam VS); grid je redukovan korišćenjem algoritma sa 4 profila .....	B-53
Slika B-53	: 3D prikaz terena korišćenjem trougaonih faceta TIN-a; GOURAUD senke; DMT formiran na osnovu tačaka varijabilnog grida 25m i uz dodatak detektovanih strukturnih linija; grid i linije dobijene iz DMT-a formiranog na osnovu izohipsi i sa detekcijom i ugradnjom strukturnih linija terena (algoritam VS); grid je redukovan korišćenjem algoritma sa 4 profila .....	B-53

Slika B-54	: Formiranje DMT-a za područje koje pokriva list 478-Valjevo karte 1:100000.....	B-54
Slika C-1	: Pregled statusa radova na izradi Osnovne državne karte za teritoriju Srbije.....	C--2
Slika C-2	: Test područja za koja su podaci visinske predstave TK25 verifikovani i ocenjivani.....	C-5
Slika C-3	: Greške upoređenja visina tačaka izohipsi digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DTK5 DMT-a za područje Beograda – grube greške su prethodno odstranjene .....	C-30
Slika D-1	: Rezultati algoritama za formiranje promenljivog grida na osnovu polaznog regularnog grida .....	D--2
Slika D-2	: TIN DMT formiran na osnovu tačaka pravilnog grida; grid 10m i grid 25m .....	D-3
Slika D-3	: TIN DMT formiran na osnovu tačaka promenljivog grida; tačke su dobijene redukcijom broja tačaka pravilnog grida; parametri obrade: minimalna veličina polaznog grida 10m, maksimalno rastojanje 32x10m, 4 profila, prag za eliminaciju visine 1m .....	D-4
Slika D-4	: TIN DMT formiran na osnovu tačaka promenljivog grida; tačke su dobijene redukcijom broja tačaka pravilnog grida; parametri obrade: minimalna veličina grida 25m, maksimalno rastojanje 32x10m, 4 profila, prag za eliminaciju visine 2m .....	D-5
Slika D-5	: TIN DMT formiran na osnovu tačaka promenljivog grida; tačke su dobijene redukcijom broja tačaka pravilnog grida; parametri obrade: minimalna veličina grida 25m, maksimalno rastojanje 32x10m, 4 profila, prag za eliminaciju visine 2m, sa detektovanim strukturnim linijama.....	D-6
Slika E-1	: Prikaz tačaka poligonskih mreža grada Beograda koje su korišćene za ocenu kvaliteta DMT25.....	E-2
Slika E-2	: Rezultat detekcije i ekstrakcije strukturnih linija terena za područje Kragujevca .....	E-42
Slika E-3	: Greške upoređenja visina visinskih tačaka iz TP1 sa visinama interpolovanim iz DMT25 za područje Kragujevca.....	E-43
Slika E-4	: DMT podaci za područje Kruševca.....	E-44
Slika E-5	: Greške upoređenja visina visinskih tačaka iz DOF5 sa visinama interpolovanim iz DMT25 za područje Kruševca.....	E-45
Slika E-6	: Formiranje DMT-a za područje Novog Pazara .....	E-46
Slika E-7	: Greške upoređenja visina visinskih tačaka iz DOF5 sa visinama interpolovanim iz DMT25 za područje Novog Pazara .....	E-47
Slika E-8	: Formiranje DMT-a za područje Čačka.....	E-48
Slika E-9	: Greške upoređenja visina visinskih tačaka iz DOF5 sa visinama interpolovanim iz DMT25 za područje Čačka.....	E-49
Slika E-10	: Formiranje DMT-a za područje Sopot.....	E-50
Slika E-11	: Greške upoređenja visina iz DOF5 (ODK5) sa visinama interpolovanim iz DMT25 za područje Sopot.....	E-51
Slika E-12	: Formiranje DMT-a za područje Vrčina.....	E-52
Slika E-13	: Greške upoređenja visina visinskih tačaka iz DTK5 sa visinama interpolovanim iz DMT25 za područje Beograd DTK5 – Centar i Borča .....	E-55
Slika E-14	: Greške upoređenja visina visinskih tačaka iz DTK5 sa visinama interpolovanim iz DMT25 za područje Beograd DTK5 - Ostružnica.....	E-56
Slika E-15	: Greške upoređenja visina visinskih tačaka iz DOF5 sa visinama interpolovanim iz DMT25 za područje Beograd DTK5 – Zemun i Kumodraž.....	E-57
Slika E-16	: Greške upoređenja visina tačaka poligonske sa visinama interpolovanim iz DMT25 za područje Beograd – Centar i Borča .....	E-60
Slika E-17	: Greške upoređenja visina tačaka poligonske sa visinama interpolovanim iz DMT25 za područje Beograd – Ostružnica.....	E-61
Slika E-18	: Greške upoređenja visina tačaka poligonske sa visinama interpolovanim iz DMT25 za područje Beograda – Zemun i Kumodraž.....	E-62
Slika E-19	: Greške upoređenja visina tačaka poligonske mreže i visina interpolovanih iz DTK5 DMT-a za područje Beograda – tačke poligonske mreže sa grubim greškama su odstranjene .....	E-65



## b. Tabele

Tabela 2-1	: Kvantifikacija sistematskih i slučajnih grešaka kod LiDAR-a u zavisnosti od tipa terena .....	27
Tabela 2-2	: Tipične talasne dužine i frekvencija SAR sistema (Dowman 2004) .....	30
Tabela 2-3	: Glavne tehničke specifikacije Intermap STAR sistema (Li 2004).....	35
Tabela 2-4	: Vrednosti koeficijenata A i B i visinska tačnost za različite tipove podloga .....	44
Tabela 2-5	: Okvirne cene DMT-a u zavisnosti od izvora i metode prikupljanja podataka i tačnosti.....	46
Tabela 4-1	: Upoređenje rezultata rekonstrukcije površi terena primenom ArcGIS i Surfing interpolatora .....	194
Tabela 5-1	: Greške fotogrametrijskog merenja visina za pojedinačne tačke i izohipse kod izrade TK25 .....	210
Tabela 5-2	: Greške georeferenciranja skeniranih RO situacije TK52 (na osnovu obrade 356 lista).....	213
Tabela 5-3	: Greške georeferenciranja kolorne karte TK52 (na osnovu obrade 308 listova).....	213
Tabela 5-4	: Greške visina kod sekundarnog prikupljanja podataka sa RO visinske predstave .....	214
Tabela 5-5	: Greške digitalizovanih visina sa TK25 .....	215
Tabela 5-6	: Veličine rasterskih slika u Mb za list karte 1:25000 u zavisnosti od rezolucije skeniranja, broja bita po pikselu i formata zapisa .....	233
Tabela 5-7	: Broj tačaka pravilnog grida po nivoima.....	263
Tabela 5-8	: Prikaz broja kontrolnih visina .....	266
Tabela B-1	: Osnovne karakteristike test područja Novi Pazar .....	B-11
Tabela B-2	: Greške rekonstrukcije površi terena na osnovu izohipsi korišćenjem različitih metoda interpolacije implementiranih u okviru ArcGIS softvera - test područje Novi Pazar .....	B-12
Tabela B-3	: Greške rekonstrukcije površi na osnovu izohipsi sa ekvidistancijom $e=10m$ - test područje Novi Pazar .....	B-15
Tabela B-4	: Greške rekonstrukcije površi na osnovu izohipsi sa ekvidistancijom $e=10m$ i izabranog broja izohipsi sa poluekvidistancijom $5m$ na TK25 - test područje Novi Pazar .....	B-16
Tabela B-5	: Greške rekonstrukcije površi na osnovu izohipsi sa ekvidistancijom $e=5m$ - test područje Novi Pazar .....	B-17
Tabela B-6	: Greške rekonstrukcije površi na osnovu izohipsi sa ekvidistancijom $e=10m$ i strukturnih i prelomnih linija terena izmerenih na fotogrametrijskom instrumentu - test područje Novi Pazar ....	B-18
Tabela B-7	: Greške rekonstrukcije površi na osnovu izohipsi sa ekvidistancijom $e=10m$ i prelomnim linijama terena prikupljenim manuelnom digitalizacijom sa TK25 - test područje Novi Pazar .....	B-19
Tabela B-8	: Greške rekonstrukcije površi na osnovu izohipsi sa ekvidistancijom $e=10m$ uz označavanje izohipsi koje razdvajaju strme padine od ravničarskog dela terena - test područje Novi Pazar .....	B-20
Tabela B-9	: Greške rekonstrukcije površi na osnovu izohipsi sa ekvidistancijom $e=5m$ uz označavanje izohipsi koje razdvajaju strme padine od ravničarskog dela terena - test područje Novi Pazar .....	B-21
Tabela B-10	: Greške rekonstrukcije površi na osnovu izohipsi sa ekvidistancijom $e=10m$ , uz dodatak izabranog broja izohipsi sa poluekvidistancijom na $5m$ uz označavanje izohipsi koje razdvajaju strme padine od ravničarskog dela terena.....	B-22
Tabela B-11	: Boje korišćene za obeležavanje odstupanja na kontrolnim tačkama u zavisnosti od apsolutnog iznosa odstupanja.....	B-28
Tabela B-12	: Osnovne karakteristike test područja Valjevo .....	B-34
Tabela B-13	: Greške rekonstrukcije površi terena na osnovu izohipsi korišćenjem različitih metoda interpolacije implementiranih u okviru ArcGIS softvera - test područje Valjevo .....	B-35
Tabela B-14	: Greške rekonstrukcije površi korišćenjem izohipsi sa ekvidistancijom $e=10m$ (u visinskim tačkama) - test područje Valjevo .....	B-37
Tabela B-15	: Greške rekonstrukcije površi korišćenjem izohipsi sa ekvidistancijom $e=10m$ (u tačkama pravilnog grida veličine $50m$ ) - test područje Valjevo.....	B-38
Tabela B-16	: Greške rekonstrukcije površi korišćenjem izohipsi sa ekvidistancijom $e=10m$ (u tačkama pravilnog grida veličine $10m$ ) - test područje Valjevo.....	B-39
Tabela C-1	: Upoređenje deformacija za izabrane listove karata TK25 utvrđenih afinom transformacijom i kolokacijom.....	C-3

Tabela C-2	: Količine podataka dobijenih digitalizacijom visinske predstave TK25 za celu teritoriju SCG .....	C-4
Tabela C-3	: Statistički pokazatelji upoređenja visina digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DMT-ova dobijenih iz DOF5 i DTK5 projekata, digitalizacije visinske predstave sa ODK5 i topografskog premera Kragujevca 1:1000 (TP1) .....	C-33
Tabela C-4	: Raspodela grešaka po nagibima terena za greške dobijene iz upoređenja visina tačaka izohipsi sa TK25 i visina interpolovanih iz DMT-ova iz DOF5 projekata .....	C-34
Tabela C-5	: Raspodela grešaka po nagibima terena za greške dobijene iz upoređenja visina tačaka izohipsi sa TK25 i visina interpolovanih iz DMT-ova iz DOF5 i ODK5, topografskog premera i DTK5 projekata .....	C-35
Tabela C-6	: Raspodela grešaka po nagibima terena za greške dobijene iz upoređenja visina trigonometara sa TK25 i visina interpolovanih iz DMT-ova iz DOF5, DOF5 i ODK5, TP1 i DTK5 projekata .....	C-36
Tabela C-7	: Raspodela grešaka po nagibima terena za greške dobijene z upoređenja visina kota sa TK25 i visina interpolovanih iz DMT-ova dobijenih iz DOF5, DOF5 i ODK5, TP1 i DTK5 projekata.....	C-37
Tabela D-1	: Statistički pokazatelji gubitka tačnosti DMT-a zbog prelaska na grid (uniformni ili promenljivi).....	D-1
Tabela E-1	: Upoređenje visina interpolovanih iz DMT25 iz visina dobijenih iz DOF5, TP1, ODK5 i PM .....	E-41
Tabela E-2	: Osnovne karakteristike test područja Kragujevac .....	E-43
Tabela E-3	: Osnovne karakteristike test područja Kruševac .....	E-44
Tabela E-4	: Upoređenje visina interpolovanih iz DMT25 i visina visinskih tačaka dobijenih iz DTK5 za područje Beograd DTK5 .....	E-54
Tabela E-5	: Upoređenje visina interpolovanih iz DMT25 i visina tačaka poligonskih mreža.....	E-59
Tabela E-6	: Upoređenje visina interpolovanih iz DMT5 i visina tačaka poligonskih mreža.....	E-64
Tabela E-7	: Statistički pokazatelji upoređenja visina interpolovanih iz DMT5 (DOF5) i visina tačaka poligonske mreže grada Beograda .....	E-66
Tabela E-8	: Statistički pokazatelji upoređenja visina interpolovanih iz DMT5 (DTK5) i visina tačaka poligonske mreže grada Beograda .....	E-67
Tabela E-9	: Statistički pokazatelji upoređenja visina interpolovanih iz DMT25 i visina visinskih tačaka dobijenih iz projekata ortofotoprodukcije (DOF5).....	E-68
Tabela E-10	: Statistički pokazatelji upoređenja visina interpolovanih iz DMT25 i visina tačaka visinskih linija dobijenih iz projekata ortofotoprodukcije (DOF5).....	E-69
Tabela E-11	: Statistički pokazatelji upoređenja visina interpolovanih iz DMT25 i visina tačaka izohipsi digitalizovanih sa ODK5.....	E-70
Tabela E-12	: Statistički pokazatelji upoređenja visina interpolovanih iz DMT25 i visina tačaka dobijenih iz projekata izrade digitalne ODK u razmeri 1:5000 (DTK5).....	E-71
Tabela E-13	: Statistički pokazatelji upoređenja visina interpolovanih iz DMT25 i visina dobijenih iz podataka premera grada Kragujevca u razmeri 1:1000 (TP1).....	E-71
Tabela E-14	: Statistički pokazatelji upoređenja visina interpolovanih iz DMT25 i visina tačaka poligonske mreže grada Beograda (DOF5 projekti).....	E-72
Tabela E-15	: Statistički pokazatelji upoređenja visina interpolovanih iz DMT25 i visina tačaka poligonske mreže za područje Beograd DTK5.....	E-72
Tabela E-16	: Sažeti prikaz statistike upoređenja visina interpolovanih iz DMT25 (TK25) i visina interpolovanih iz DMT5 za područje Beograd 2003 DOF5.....	E-73
Tabela E-17	: Statistički pokazatelji upoređenja visina interpolovanih iz DMT25 i visina interpolovanih iz DMT5 za područje Beograd 2003 - LINEARNA interpolacija visina iz DMT5.....	E-74
Tabela E-18	: Statistički pokazatelji upoređenja visina interpolovanih iz DMT25 (TK25) i visina interpolovanih iz DMT5 za područje Beograd 2003 - KUBNA interpolacija visina iz DMT5.....	E-75



### c. Izveštaji

Izveštaj B-1	: Upoređenje referentnih visina grida na 25m i visina interpolovanih iz DMT25 dobijenog na osnovu izohipsi na e=10m - test područje Novi Pazar.....	B-23
Izveštaj B-2	: Upoređenje referentnih visina grida na 25m i visina interpolovanih iz DMT25 dobijenog na osnovu izohipsi na e=10m i izabranih izohipsi na e=5m - test područje Novi Pazar.....	B-24
Izveštaj B-3	: Upoređenje referentnih visina grida na 25m i visina interpolovanih iz DMT25 dobijenog na osnovu izohipsi na e=10m, uz dodatak izabranih izohipsi na e=5m i manuelno označavanje izohipsi gde brdo naglo prelazi u dolinu - test područje Novi Pazar.....	B-25
Izveštaj B-4	: Upoređenje referentnih visina grida na 10m i visina interpolovanih iz DMT25 dobijenog na osnovu izohipsi na e=10m - test područje Valjevo.....	B-40
Izveštaj C-1	: Upoređenje visina trigonometara digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DOF5 DMT-a za područje Kruševca.....	C-6
Izveštaj C-2	: Upoređenje visina kota digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DOF5 DMT-a za područje Kruševca.....	C-7
Izveštaj C-3	: Upoređenje visina tačaka izohipsi digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DOF5 DMT-a za područje Kruševca.....	C-8
Izveštaj C-4	: Upoređenje visina tačaka izohipsi digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DOF5 DMT-a za područje Kruševca – grube greške su prethodno odstranjene.....	C-9
Izveštaj C-5	: Upoređenje visina kota digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DOF5 DMT-a za područje Novog Pazara.....	C-10
Izveštaj C-6	: Upoređenje visina tačaka izohipsi digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DOF5 DMT-a za područje Valjevo 1 – grube greške su prethodno odstranjene.....	C-11
Izveštaj C-7	: Upoređenje visina tačaka izohipsi digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DOF5 DMT-a za područje Valjevo 2 – grube greške su prethodno odstranjene.....	C-12
Izveštaj C-8	: Upoređenje visina tačaka izohipsi digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DOF5 DMT-a za područje Valjevo 3 – grube greške su prethodno odstranjene.....	C-13
Izveštaj C-9	: Upoređenje visina tačaka izohipsi digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DOF5 DMT-a za područje Barajeva.....	C-14
Izveštaj C-10	: Upoređenje visina trigonometara digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DOF5 DMT-a za područje Lazarevca – grube greške su prethodno odstranjene.....	C-15
Izveštaj C-11	: Upoređenje visina kota digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DOF5 DMT-a za područje Lazarevca.....	C-16
Izveštaj C-12	: Upoređenje visina tačaka izohipsi digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DOF5 DMT-a za područje Lazarevca.....	C-17
Izveštaj C-13	: Upoređenje visina tačaka izohipsi digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DOF5 DMT-a za područje Lazarevca – grube greške su prethodno odstranjene.....	C-18
Izveštaj C-14	: Upoređenje visina trigonometara digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DOF5 DMT-a za područje Sopota.....	C-19
Izveštaj C-15	: Upoređenje visina tačaka izohipsi digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DOF5 DMT-a za područje Sopota – grube greške su prethodno odstranjene.....	C-20
Izveštaj C-16	: Upoređenje visina tačaka izohipsi digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DOF5 DMT-a za područje Vrčina – grube greške su prethodno odstranjene.....	C-21
Izveštaj C-17	: Upoređenje visina trigonometara digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DOF5 DMT-a za područje Pančeva.....	C-22
Izveštaj C-18	: Upoređenje visina kota digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DOF5 DMT-a za područje Pančeva.....	C-23
Izveštaj C-19	: Upoređenje visina tačaka izohipsi digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DOF5 DMT-a za područje Pančeva – grube greške prethodno odstranjene.....	C-24

Izveštaj C-20 : Upoređenje visina tačaka izohipsi digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DOF5 DMT-a za područje Kragujevca – grube greške su prethodno odstranjene .....	C-25
Izveštaj C-21 : Upoređenje visina trigonometara digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DOF5 DMT-a za područje Čačka .....	C-26
Izveštaj C-22 : Upoređenje visina tačaka izohipsi digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DOF5 DMT-a za područje Čačka – grube greške su prethodno odstranjene .....	C-27
Izveštaj C-23 : Upoređenje visina trigonometara gitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DTK5 DMT-a za područje Beograda .....	C-28
Izveštaj C-24 : Upoređenje visina tačaka izohipsi digitalizovanih sa TK25 i visina interpolovanih iz DTK5 DMT-a za područje Beograda – grube greške prethodno odstranjene .....	C-29
Izveštaj E-1 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina tačaka poligonske mreže za područje Barajeva .....	E-3
Izveštaj E-2 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina visinskih tačaka iz DOF5 za područje Barajeva .....	E-4
Izveštaj E-3 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina tačaka izohipsi sa ODK5 za područje Barajeva .....	E-5
Izveštaj E-4 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina tačaka visinskih linija iz DOF5 za područje Čačka .....	E-6
Izveštaj E-5 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina visinskih tačaka iz DOF5 za područje Čačka .....	E-7
Izveštaj E-6 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina tačaka izohipsi iz TP1 za područje Kragujevca .....	E-8
Izveštaj E-7 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina tačaka visinskih linija iz TP1 za područje Kragujevca .....	E-9
Izveštaj E-8 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina visinskih tačaka iz TP1 za područje Kragujevca .....	E-10
Izveštaj E-9 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina tačaka visinskih linija iz DOF5 za područje Kruševca .....	E-11
Izveštaj E-10 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina visinskih tačaka iz DOF5 za područje Kruševca .....	E-12
Izveštaj E-11 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina tačaka poligonske mreže za područje Kruševca .....	E-13
Izveštaj E-12 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina tačaka izohipsi sa ODK5 za područje Lazarevca .....	E-14
Izveštaj E-13 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina visinskih tačaka iz DOF5 za područje Lazarevca .....	E-15
Izveštaj E-14 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina tačaka iz DOF5 za područje Lazarevca .....	E-16
Izveštaj E-15 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina tačaka poligonske mreže za područje Lazarevca .....	E-17
Izveštaj E-16 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina tačaka vis. linija iz DOF5 za područje Novog Pazara .....	E-18
Izveštaj E-17 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina visinskih tačaka iz DOF5 za područje Novog Pazara .....	E-19
Izveštaj E-18 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina tačaka izohipsi sa ODK5 za područje Pančeva .....	E-20
Izveštaj E-19 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina visinskih tačaka iz DOF5 za područje Pančeva .....	E-21
Izveštaj E-20 : Upoređenje visina iz DMT25 i kota sa ODK5 za područje Pančeva .....	E-22
Izveštaj E-21 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina visinskih tačaka iz DOF5 za područje Sopota .....	E-23
Izveštaj E-22 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina tačaka izohipsi sa ODK5 za područje Sopota .....	E-24
Izveštaj E-23 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina tačaka Beograda za područje Sopota .....	E-25
Izveštaj E-24 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina tačaka visinskih linija iz DOF5 za područje Valjevo 1 .....	E-26
Izveštaj E-25 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina visinskih tačaka iz DOF5 za područje Valjevo 1 .....	E-27
Izveštaj E-26 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina tačaka visinskih linija iz DOF5 za područje Valjevo 2 .....	E-28
Izveštaj E-27 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina visinskih tačaka iz DOF5 za područje Valjevo 2 .....	E-29
Izveštaj E-28 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina tačaka izohipsi sa ODK5 za područje Vrčina .....	E-30
Izveštaj E-29 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina visinskih tačaka iz DOF5 za područje Vrčina .....	E-31
Izveštaj E-30 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina tačaka poligonske mreže za područje Vrčina .....	E-32
Izveštaj E-31 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina visinskih tačaka iz DTK5 za područje Beograd DTK5 .....	E-53
Izveštaj E-32 : Upoređenje visina iz DMT25 i visina poligonskih tačaka za područje Beograd DTK5 .....	E-58
Izveštaj E-33 : Upoređenje visina tačaka poligonske mreže i visina interpolovanih iz DTK5 DMT-a za područje Beograda – tačke poligonske mreže sa grubim greškama su odstranjene .....	E-63













РД 18650



300136412

COBISS