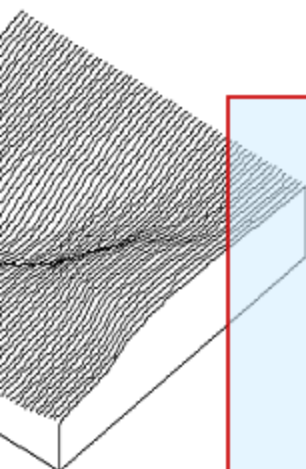


**Dušan Prodanović**

Model Terena



Podslivovi

**Unapređenje metoda  
primene**

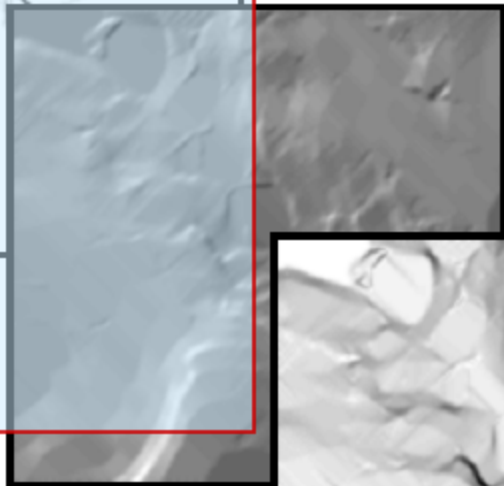
Površinski tok

**hidroinformatike**

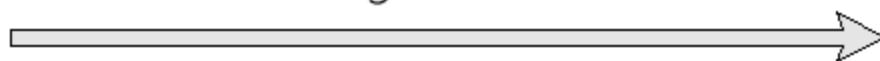
**u analizi oticanja**

Izloženost suncu

**sa urbanih površina**



Maksimalni nagibi terena



**- doktorska disertacija -**

Univerzitet u Beogradu  
Građevinski fakultet

**Unapređenje metoda primene  
hidroinformatike u analizi  
oticanja sa urbanih površina**

–Doktorska disertacija–

**Dušan Prodanović**

Beograd, jun 1999.

Ovo je prazna leva strana.....

Univerzitet u Beogradu  
**Građevinski fakultet**

Dušan Prodanović

**Unapređenje metoda primene  
hidroinformatike u analizi  
oticanja sa urbanih površina**

–Doktorska disertacija–

Beograd, jun 1999.

**Mentor:**

prof. dr Čedo Maksimović  
Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, i  
Imperial College, London, UK

**Članovi komisije:**

prof. dr Vojislav Vukmirović, Građevinski fakultet Beograd  
prof. dr Čedo Maksimović, Građevinski fakultet Beograd  
prof. dr Miroslav Marković, Rudarsko geološki fakultet Beograd  
prof. dr Marko Ivetić, Građevinski fakultet Beograd  
doc. dr Dragan Mihajlović, Građevinski fakultet Beograd

**Datum odbrane:****Datum promocije:****Doktorat tehničkih nauka**

# Unapređenje metoda primene hidroinformatike u analizi oticanja sa urbanih površina

## Rezime

Matematičko modelovanje fizičkih procesa je poslednjih godina u punom zamahu zahvaljujući razvoju numeričkih metoda i računarske tehnologije. U oblasti odvodnjavanja urbanih sredina, standardno su u upotrebi matematički modeli procesa transformacije kiše u oticaj sa površine terena, formiranja hidrograma površinskog oticaja koji ulaze u kanalizacioni sistem i transformacije hidrograma kroz mrežu cevi i objekata.

Pored matematičkih modela, intenzivno se razvijaju i informatičke tehnologije. Razvijenim alatima obezbeđuju se novi izvori podataka, puna kontrola nad zahtevanom tačnošću podataka, prati se njihovo starenje (smanjenje tačnosti) u toku operacija nad njima kao i lako povezivanje različitih izvora podataka. Najznačajniji predstavnici informatičkih tehnologija su Geografski Informacioni Sistemi (GIS).

U ovom radu se daje prikaz hidroinformatičkog modela, koji u potpunosti integriše postojeće modele oticanja vode sa urbanih površina sa posebno razvijenim informatičkim alatima. U fazu pripreme podataka za modele odvodnjavanja uvode se novi programski alati koji na bazi dostupnih podataka generišu informacije i parametre za modele. Rezultat je značajno ubrzanje postupka pripreme podataka uz povećanje pouzdanosti a smanjenje subjektivnosti korisnika.

Najveći deo rada se odnosi na prikaz informatičkog modela razvijenog u ovoj disertaciji, njegovih komponenti, slojeva sa ulaznim podacima i kreiranim novim informacijama, programskih modula za analizu tečenja vode po površini terena i za kreiranje slivnih površina, kao i modula za izračunavanje parametara specifičnih za neke standardne programe za simulaciju odvodnjavanja urbanih površina. Takođe, u radu se predlaže i koncepcija novog računskog modela sa poboljšanim povezivanjem površinskog i toka vode u kanalizacionoj mreži. Umesto strogog razdvajanja tih tokova, predloženi model dvojnog odvodnjavanja koristi razvijeni informatički model za uspostavljanje pune, "dvosmerne" veze između površinskog i podzemnog toka. Model korektno računa tečenje izlivena vode po površini sve dok je ne prihvati neki nizvodni slivnik, retenzija ili dok ne otekne sa sliva. Pored konceptualnog rešenja modela dvojnog odvodnjavanja, dati su i svi potrebni parametri kao i mogući način programske implementacije.

Kako je osnovni cilj ovog rada bilo unapređenje projektantske prakse korišćenjem hidroinformatike, sve faze razvoja informatičkog modela su proveravane na realnim projektima. Prikazani su rezultati pet primera, koji hronološki prate faze razvoja modela. Uz svaki primer su navedena i stečena iskustva, koja su zatim bila primenjena u narednim fazama razvoja modela.

**Ključne reči:** *Modeli odvodnjavanja urbanih površina, informatički modeli, Geografski Informacioni Sistemi, dvojno odvodnjavanje*

# Improvement of the methods for the hydroinformatics application in urban runoff analysis

## Abstract

Mathematical modelling of physical processes has been boosted up by development of numerical methods and informatic technologies. In the area of urban drainage, numerical models capable of rainfall to runoff transformation, generation of the surface hydrograph as the input for underground sewer system and computation of unsteady flow in network of pipes and control structures, are in common use nowadays.

Apart from numerical models, the informatics technologies, dealing with all kind of data, are also in high level of development. New sources of data are now available with developed tools, and full control over data accuracy, aging, degradation through transformation is achieved, together with data linkage between different sources.

The development of hydroinformatics system that integrates existing numerical models with newly developed informatics model has been presented in this thesis. The tools have been developed for the numerical model data preparation stage, that are using available data to generate the new information and model parameters. The significant time savings have been achieved with increased reliability and reduced influence of user's subjective judgment.

The largest portion of this thesis deals with the development of informatics model, its components, layers with input data and newly created information, program modules for surface flow analysis and subcatchment delineation, as well as modules for calculation of parameters specific for some commercial urban drainage software packages. One chapter is also devoted to the concept of the new computational model with improved linkage between surface and underground component of water flow. The model is referred to as "dual drainage model" and, instead of strict separation of the two flows, it comprises the full interactive (or two-way) linkage between the two components. It is based on developed informatics system and it follows the surface flow from flooded area downstream the nearest unsurcharged inlet or retention basin or until it flows out of the catchment. Apart from the model concept, all needed parameters are given, together with possible program implementation.

Having in mind that the hydroinformatics improvements are to be introduced in the everyday design practice, all phases of informatics model development have been implemented in full scale projects. Five examples have been presented in the chronological order, together with experience gained that have later been incorporated in further phases of model development.

**Keywords:** *Urban runoff models, information systems, Geographical Information Systems, dual drainage*

# Sadržaj

<b>1</b>	<b>Uvod</b>	<b>1</b>
1.1	Predmet istraživanja . . . . .	1
1.2	Obrazloženje teme . . . . .	2
1.3	Cilj rada . . . . .	3
1.4	Pregled svih poglavlja rada . . . . .	4
1.5	Kratka predistorija ovog rada . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Informatički model odvodnjavanja urbanih površina</b>	<b>7</b>
2.1	Matematički model OUP-a . . . . .	7
2.2	Opis informatičkog modela OUP-a . . . . .	10
2.2.1	Komponente informatičkog modela OUP-a . . . . .	11
2.2.2	Prostorni model podataka . . . . .	13
2.2.3	Slojevi u informatičkom modelu . . . . .	17
2.2.4	Razvijeni alati u informatičkom modelu . . . . .	19
2.3	Povezivanje matematičkog i informatičkog modela OUP-a . . . . .	21
<b>3</b>	<b>Priprema podataka za numeričke modele OUP-a</b>	<b>23</b>
3.1	Površinska i podzemna mreža za odvodnjavanje urbanih voda . . . . .	23
3.1.1	Vrste mreža za odvodnjavanje urbanih površina . . . . .	24
3.1.2	Unos i kontrola podataka . . . . .	25
3.1.3	Konverzija vektorskog zapisa u rasterski . . . . .	28
3.2	Kreiranje digitalnog modela terena . . . . .	29
3.2.1	Metode interpolacije prostora . . . . .	31
3.2.2	Načini za prikaz DMT-a . . . . .	41
3.2.3	Unos i kontrola podataka . . . . .	44
3.2.4	Osnovni slojevi izvedeni iz DMT-a . . . . .	51
3.3	Podaci o nameni površine terena . . . . .	54
3.3.1	Unos i kontrola podataka . . . . .	55
3.3.2	Sloj namene površina u modelima OUP-a . . . . .	61
3.4	Podaci o površinskom sloju tla . . . . .	62



<b>4</b>	<b>Kreiranje sloja površinskog toka vode</b>	<b>65</b>
4.1	Digitalni model terena bez depresija . . . . .	65
4.1.1	Definicija DMT-a bez depresija . . . . .	65
4.1.2	Delineacija depresija u DMT-u . . . . .	66
4.2	Kreiranje podataka o površinskom toku . . . . .	69
4.2.1	Uticao objekata na površinski tok vode . . . . .	70
4.2.2	Metode automatskog određivanja pravaca površinskog toka . .	71
4.2.3	Slika sumarnih dotoka - grid orijentisani proračun . . . . .	73
4.2.4	Slika sumarnih dotoka - vektorski orijentisani proračun . . . .	74
4.2.5	Slika površinskog toka vode . . . . .	79
4.2.6	Vektorizacija slike površinskog toka . . . . .	86
<b>5</b>	<b>Kreiranje sloja sa granicama podslivova (delineacija sliva na podslivove)</b>	<b>91</b>
5.1	Geometrijska delineacija sliva . . . . .	92
5.2	Delineacija sliva prema DMT-u . . . . .	94
5.2.1	Primenjeni algoritam . . . . .	96
5.2.2	Delineacija sliva prema DMT-u bez uzimanja u obzir sloja namene površina . . . . .	101
5.2.3	Uticao sloja namene površina na delineaciju sliva – visinska korekcija DMT-a . . . . .	108
5.2.4	Uticao sloja namene površina na delineaciju sliva – promenljivi ugao tečenja i granična vrednost nagiba . . . . .	110
5.2.5	Unošenje inercijalne komponente u proces delineacije sliva . .	112
5.2.6	Osetljivost algoritma na loše ulazne podatke . . . . .	116
5.3	Prikaz rezultata delineacije . . . . .	117
5.3.1	Vektorizacija granica podslivova . . . . .	118
5.3.2	Reklasifikacija i prikaz podslivova . . . . .	119
<b>6</b>	<b>Proračun parametara za “klasične” modele OUP-a</b>	<b>123</b>
6.1	Površina i oblik podsliva . . . . .	124
6.1.1	Oblik podsliva za BEMUS model . . . . .	124
6.1.2	Oblik podsliva za MOUSE model . . . . .	128
6.1.3	Oblik podsliva za Hystem-Extran model . . . . .	128
6.2	Nagib podsliva . . . . .	129
6.3	Zastupljenost različitih tipova površine . . . . .	131
6.4	Procena količina upotrebljene vode . . . . .	132
<b>7</b>	<b>Koncepcija modela dvojnog odvodnjavanja urbanih površina</b>	<b>135</b>
7.1	Definisanje problema u urbanom odvodnjavanju . . . . .	136
7.2	Savremeni pristup proračunu urbanog odvodnjavanja . . . . .	137
7.3	Predloženi model dvojnog odvodnjavanja urbanih površina . . . . .	140
7.3.1	Usvojena šematizacija dvojnog odvodnjavanja . . . . .	140

7.3.2	Veza kanalizacione mreže i površinskog toka . . . . .	143
7.3.3	Parametri potrebni za model dvojnog odvodnjavanja . . . . .	146
7.3.4	Način implementacije koncepta dvojnog odvodnjavanja . . . . .	149
<b>8</b>	<b>Primeri primene razvijenog hidroinformatičkog modela</b>	<b>153</b>
8.1	Eksperimentalni sliv Miljakovac – Beograd . . . . .	153
8.2	Centralni deo grada Drezdena . . . . .	159
8.3	Kladovo . . . . .	165
8.4	Novi Sad . . . . .	169
8.5	Kumodraž – Beograd . . . . .	173
<b>9</b>	<b>Zaključak</b>	<b>183</b>
9.1	Pregled obavljenih istraživanja i zaključci . . . . .	183
9.2	Pravci daljeg razvoja prikazanog hidroinformatičkog modela . . . . .	185



# Slike

2.1	Faze u razvoju modela kojim se opisuju fizički procesi [76]	8
2.2	Modelovanje urbanog sliva je iterativni proces	8
2.3	Povezivanje različitih informatičkih sistema na nivou firme	12
2.4	Tipovi podataka u geografskim bazama	13
2.5	Rasterska i vektorska prezentacija istog sadržaja geografske karte	15
2.6	Rasterizacija vektorskih podataka o mreži	16
2.7	Slojevi informatičkog sistema u AutoCAD-u [70, 72]	17
2.8	Povezivanje matematičkog i informatičkog modela OUP-a	21
3.1	Razmena podataka između GIPS baze i integrisanog IM	26
3.2	Kontrole podataka o mreži implementirane u IM OUP-a	27
3.3	Veza između vektorskih i rasterskih podataka	28
3.4	DMT prikazan TIN-om i grid-om u CAD sistemu	30
3.5	Primena DMT-a u kontroli podataka	30
3.6	DMT baziran na mreži pravilnih kvadrata - grid model	32
3.7	Interpolacija visine u grid modelu na osnovu rasutih tačaka	33
3.8	Rezultati interpolacije istih podataka u grid modelu	35
3.9	Upotrebljivost grid modela u analizi tečenja vode po terenu	37
3.10	Isti teren predstavljen pomoću grida i TIN-a	38
3.11	Primeri triangulacije	38
3.12	TIN struktura podataka	39
3.13	Rezultati interpolacije istih podataka u TIN modelu	40
3.14	Različiti načini prikaza terena	43
3.15	Osnovni princip stereo aerofotogrametrije	45
3.16	Skidanje podataka visine terena sa stereo aerofotografija	45
3.17	Radarsko aerosnimanje sa malih visina - princip rada	47
3.18	Problemi u digitalizaciji papirnih karti	48
3.19	Linearna interpolacija visina duž ulica	49
3.20	Primer greški u DMT-u	50
3.21	Histogram nagiba DMT-a kreiranog grid interpolacijom	51
3.22	Proračun nagiba terena	51
3.23	Efekat niskopropusnog filtera (osrednjavanje) na DMT	53
3.24	Neki slojevi bazirani na DMT-u koji se koriste u projektima OUP-a	54
3.25	Skenirana papirna karta (levo) i slika sloja namene površine (desno)	55

3.26	Nestruktuiran CAD crtež je neupotrebljiv za sliku namene površina . . .	56
3.27	Načini digitalizacije sloja namene površine . . . . .	59
3.28	QuickCross/Fence program za obradu rezultata istražnih radova . . .	63
4.1	Podužni presek kroz DMT sa velikim i malim depresijama . . . . .	66
4.2	Primer delineacije depresije u fiktivnom DMT-u . . . . .	68
4.3	Primer delineacije depresija: polazni DMT i DMT bez depresija . . .	70
4.4	Pravci maksimalnih nagiba pre i nakon korekcije DMT-a . . . . .	71
4.5	Automatsko određivanje površinskog toka . . . . .	72
4.6	Pravci maksimalnih nagiba i slika sumarnih dotoka . . . . .	73
4.7	Način određivanja nizvodne ćelije u gridu . . . . .	74
4.8	Način određivanja putanje vode po terenu u vektorskom sistemu . . .	75
4.9	Povezivanje svih depresija u DMT-u (4.3) i slika sumarnih dotoka . .	76
4.10	Ukupan broj uzvodnih ćelija kodiran intenzitetom crne boje . . . . .	79
4.11	Slika površinskog toka vode . . . . .	80
4.12	Slika površinskog toka vode Hime River, Japan [99] . . . . .	81
4.13	Histogram sloja sumarnih dotoka, datog na slici 4.9 . . . . .	82
4.14	Uveličani deo histograma sloja sumarnih dotoka sa slike 4.13 . . . . .	82
4.15	Reklasifikacija sloja sumarnih dotoka bez i sa lokalnom korekcijom . .	83
4.16	Različiti algoritmi za stanjivanje linije u slici površinskog toka . . . .	84
4.17	Primer vektorizacije slike površinskog toka za prstenastu mrežu . . .	87
4.18	Primer vektorizacije za podatke sa slike 4.9 . . . . .	89
5.1	Geometrijska delineacija . . . . .	92
5.2	Rezultat geometrijske delineacije sa primerom skrivenih ćelija . . . .	95
5.3	Primer iterativnog i rekurzivnog određivanja podslivova . . . . .	96
5.4	Postupak kreiranja slike pravaca tokova i konačan rezultat . . . . .	98
5.5	Kriterijum provere okolnih ćelija da li su nizvodne . . . . .	99
5.6	Delineacija depresija primenom algoritma za delineaciju slivova . . . .	100
5.7	Delineacija sliva samo prema DMT-u sa slike 4.3 . . . . .	101
5.8	Delineacija sliva samo prema DMT-u bez svih depresija . . . . .	102
5.9	Kreiranje DMT-a sa uklonjenim malim depresijama . . . . .	103
5.10	Pravci maksimalnih nagiba u okolini depresije koju drenira kolektor .	104
5.11	Delineacija sliva samo prema DMT-u bez malih depresija . . . . .	105
5.12	Rezultati simulacije tečenja BEMUS programom, za test primere . . .	106
5.13	Rezultati simulacije tečenja za rezultate sa sl 5.2 i 5.7 . . . . .	107
5.14	Efekat promene visine terena na slivne površine . . . . .	108
5.15	Prikaz algoritma za visinsku korekciju DMT-a . . . . .	109
5.16	Detalj uzvodno od kuće, nakon visinske korekcije DMT-a . . . . .	111
5.17	Primeri delineacije sliva . . . . .	112
5.18	Zavisnost ugla $\alpha$ od nagiba terena $G$ za različite tipove površina . . .	113
5.19	Određivanje relativnog udaljenja od uzvodne granice sliva . . . . .	114
5.20	Slika relativnih udaljenja od granice sliva i slika uglova tečenja . . . .	114

5.21	Rezultati pojedinih iteracija delineacije . . . . .	115
5.22	Konverzija granica podslivova iz rasterskog u vektorski oblik . . . . .	118
5.23	Reklasifikacija podslivova zbog jasnijeg prikaza . . . . .	120
6.1	Šematizacija površinskog tečenja kod BEMUS modela . . . . .	124
6.2	Primer uticaja oblika sliva u simulacionom modelu BEMUS . . . . .	125
6.3	Šematizacija tečenja prema srednjoj vrednosti pravca nagiba . . . . .	126
6.4	Parametri podslivova $C_W$ i $C_S$ za Hystem-Extran model [30] . . . . .	128
6.5	Težinski koeficijenti za proračun srednjeg nagiba podsliva . . . . .	130
6.6	Nagib terena prema DMT-u i korigovan težinskim koeficijentima . . . . .	131
6.7	Zastupljenost različitih tipova površine u okviru podsliva . . . . .	132
6.8	Delineacija sliva za određivanje količina upotrebljenih voda . . . . .	133
7.1	Virtualni rezervoar za smeštaj viška vode u kanalizaciji . . . . .	136
7.2	Dvosmerni vertikalni bilans voda u modelu . . . . .	137
7.3	Hidrološki model SHE [1] . . . . .	138
7.4	Interakcija toka između podzemnog kolektora i terena [43] . . . . .	139
7.5	Model dvojnog odvodnjavanja [81] . . . . .	141
7.6	Transformacija kiše u oticaj bez i sa potapanjem podsliva . . . . .	142
7.7	Podužni presek kroz teren, slučaj bez kanalizacije i sa kanalizacijom . . . . .	144
7.8	Slučajevi izlivanja vode iz kanalizacionog šahta i tečenja po terenu . . . . .	144
7.9	Šematizacija tečenja u modelu dvojnog odvodnjavanja . . . . .	147
7.10	Multi agent pristup u modelima dvojnog odvodnjavanja . . . . .	151
8.1	Miljakovac II, aerofotografija sliva . . . . .	155
8.2	Miljakovac II, sloj namene površina . . . . .	156
8.3	Miljakovac II, ulazni i generisani slojevi . . . . .	157
8.4	Miljakovac II, upoređenje rezultata simulacije oticaja . . . . .	158
8.5	Drezden, satelitski snimci . . . . .	160
8.6	Drezden, kolor kompozitna slika i sloj namene površine . . . . .	161
8.7	Drezden, digitalni model terena . . . . .	162
8.8	Drezden, generisane granice podslivova . . . . .	163
8.9	Kladovo, tri gradska sliva, kanalizaciona mreža i podslivovi . . . . .	166
8.10	Kladovo, digitalni model terena . . . . .	167
8.11	Kladovo, simulacija oticaja za tri dela sliva . . . . .	168
8.12	Novi Sad, položaj sliva Klisa . . . . .	169
8.13	Novi Sad, ulazni i generisani slojevi . . . . .	170
8.14	Novi Sad, digitalni model terena i sloj namene površina . . . . .	171
8.15	Novi Sad, hidrogrami i nivogrami u pojedinim delovima sliva . . . . .	172
8.16	Kumodraž, lokacija sliva u Beogradu . . . . .	174
8.17	Kumodraž, postojeće stanje i varijante rešenja . . . . .	175
8.18	Kumodraž, namena površina i podslivovi . . . . .	177
8.19	Kumodraž, DMT i analiza površinskog toka . . . . .	178
8.20	Kumodraž, rezultat simulacije oticaja od realne kiše . . . . .	180

8.21 Kumodraž, prikaz stepena popunjenosti kolektora . . . . .	181
8.22 Kumodraž, vizualizacija rezultata proračuna . . . . .	182

# Tabele

3.1	Načini unosa podataka o nameni površine terena . . . . .	57
3.2	Matrica grešaka za sliku namene površine . . . . .	61
5.1	Vrednost u jednoj ćeliji slike pravaca tokova . . . . .	97
5.2	Osnovni pokazatelji rezultata simulacije na test slivu . . . . .	106
5.3	Statistički pokazatelji nagiba terena . . . . .	113
6.1	Površina, obim, kompaktnost, dužina i oblik podslivova . . . . .	127
8.1	Resursi upotrebljeni u primeni GIS tehnologija za projekat OUP-a . .	164





# Glava 1

## Uvod

### 1.1 Predmet istraživanja

Tema ovog rada je primena hidroinformatike u oblasti matematičkog modelovanja i analize oticanja vode sa urbanih površina. Sam pojam *hidroinformatika* je uveo prof. Michael B. Abbott [1, 2], vizionarski predviđajući početkom 90-tih godina neophodnost povezivanja sve složenijih hidrauličkih računskih modela sa informatičkim modelima, koji se bave podacima u najširem smislu. On je uvideo stratešku potrebu da hidrauličari uspostave interakciju informacija i informatičke tehnologije sa životnom sredinom, čime se ostvaruje put ka kvalitetnijem i pouzdanijem modelovanju složenih procesa u prirodi.

Predmet istraživanja disertacije je mogućnost povezivanja informatičkih tehnologija i računске hidraulike, koncentrišući se na jedan uži segment u oblasti komunalne hidrotehnike, na odvođenje voda sa urbanih površina. Numerički modeli za modelovanje oticaja sa urbanih slivova su postali deo svakodnevne inženjerske prakse pri dimenzionisanju ili proveru propusne moći sistema za odvođenje voda (kolektori i kanali) i sistema za privremeno skladištenje (retenzioni bazeni) i analizu procesa promene kvaliteta vode. U centar pažnje programera kao i korisnika, zbog svoje složenosti najčešće se postavlja sam model. Visok nivo razvijenih numeričkih modela, međutim, nije praćen i razvojem procedura za pripremu kvalitetnih ulaznih podataka kao i za prezentaciju rezultata proračuna. Uloga hidroinformatike je da fokus korisnika usmeri od numeričkog simulacionog modela prema ulaznim podacima za taj model i prema alatima koji omogućavaju pouzdaniji i jednostavniji unos podataka, automatsko kreiranje novih informacija, analizu i vizualizaciju.

## 1.2 Obrazloženje teme

Tehnologije koje omogućavaju primenu hidroinformatike u oblasti numeričkog modelovanja odvođenja voda sa urbanih sredina su CAD<sup>1</sup> i GIS.<sup>2</sup> Prvi radovi na primeni GIS-a su bili u oblasti analize satelitskih snimaka i kreiranja digitalnih modela terena, sa ciljem boljeg sagledavanja hidroloških karakteristika sliva, krajem 70-tih i početkom 80-tih godina [57, 84, 96]. Ti radovi su se uglavnom odnosili na velike ruralne slivove, sa jasno diferenciranom površinskom mrežom vodotokova. Korisnici takvih istraživanja su gotovo isključivo bile vojne agencije, koje su imale pristup potrebnim računarskim resursima.

Početakom 90-tih godina, pojavljuju se i radovi, prvo na integraciji CAD sistema, a zatim i GIS sa hidrološkim modelima oticanja [63, 89]. Zajedničko za te radove je da se CAD i GIS prevashodno koriste kao alati za unos struktuiranih i georeferenciranih podataka, formiranje relacionih baza podataka čime se olakšava rad sa podacima, kao i da se primenjuju postojeći GIS alati za analizu hidroloških parametara slivnog područja. Oblast interesovanja su ruralni slivovi i razvijene metode hidroloških analiza nisu direktno primenjive na male, urbane površine. Autori koji su analizirali mogućnosti prilagođenja razvijenih postupaka su zaključili da je struktura površinskog toka u urbanom slivu, iako globalno pod uticajem prirodnih nagiba terena, većim delom diktirana veštačkim objektima često veoma malih dimenzija, čime se znatno smanjuje dimenzija razmatrane elementarne površine i time povećava potrebna količina informacija [17].

U istom periodu počinje i razvoj hidroinformatičkih metoda baziranih na GIS-u direktno prilagođenih urbanom slivu [26, 53]. Prvi radovi su ukazali na upotrebljivost hidroinformatike u oblasti urbanog odvodnjavanja, pogotovu u fazi kreiranja novih informacija na bazi unetih podataka o slivu, uz potpunu integraciju sa postojećim numeričkim modelima za simuliranje oticaja sa urbanih površina.

Pored pristupa prilagođavanja informatičkih modela numeričkim, sa ciljem pripreme potrebnih ulaznih podataka, postoji i pristup prilagođavanja numeričkih modela i njihovih koncepata raspoloživim informatičkim tehnologijama. Podelom sliva na male elementarne površine, unutar kojih se rešava potpuni horizontalni i vertikalni bilans voda, formirana je čvrsta integracija informatičkog i numeričkog modela, čime se otvara mogućnost za kvalitetnije simuliranje hidrološkog ciklusa [1, 91]. Međutim, takvi modeli su preglomazni da bi se koristili u simulaciji pojava plavljenja urbanih površina usled jakih kiša, kada podzemni kanalizacioni sistem nije u stanju da primi svu vodu i kada dolazi do interakcije podzemnog toka i površinskog. Modeli koji su u stanju da simuliraju i takve ekscesne situacije [19, 43] su još u fazi razvoja i traženja kvalitetnog hidroinformatičkog koncepta, kako bi postali upotrebljivi u standardnoj inženjerskoj praksi.

---

<sup>1</sup>CAD – Computer Aided Design, projektovanje pomoću kompjutera.

<sup>2</sup>GIS – Geografski Informacioni Sistemi.

## 1.3 Cilj rada

Cilj ovog rada je da razvojem hidroiinformatičkog modela, koji obuhvata postupke i nove programske module, izvrši integraciju postojećih informatičkih sistema, u koje prvenstveno spadaju CAD i GIS sa pripadajućim brojnim alatima, sa postojećim numeričkim modelima za proračun oticanja sa urbanih površina BEMUS, Hystem-Extran i MOUSE.<sup>3</sup> Polazna pretpostavka u ovom radu je da hidroiinformatika treba da doprinese *povećanoj upotrebljivosti* postojećih matematičkih modela uz *unapređenje kvaliteta* ulaznih podataka i *povećanje objektivnosti* u pripremi simulacionih parametara za model i značajno *ubrzanje rada*. Pored parametara vezanih za oticaj vode od kiše, cilj ovog rada je da se istim tehnologijama obrade i parametri vezani uz upotrebljene vode. Konačni rezultat primene novih tehnologija je dobijanje *detaljnijeg opisa sliva* i *pouzdanijih rezultata simulacije* procesa oticaja uz *povećanu mogućnost analize* uticaja različitih faktora na slivu na procese generisanja oticaja vode kao i na promene njenog kvaliteta.

Jedan od postavljenih ciljeva u ovom radu je očuvanje balansa između zaista velikih mogućnosti informatičkih tehnologija i stvarnih potreba numeričkih modela, kako bi razvijeni hidroiinformatički model bio upotrebljiv u projektantske svrhe. U toku razvoja novih postupaka i programskih modula za kreiranje informacija potrebnih simulacionim paketima, kontinualno su *verifikovane* njihove funkcije na pravim primerima, projektima iz svakodnevnog prakse. Takođe, cilj je bio i razviti module tako da budu *programski i sistemski nezavisni*, čime im se obezbeđuje relativno dug životni vek i jednostavno prilagođavanje promenama u ciljnim matematičkim i informatičkim modelima.

Mada je osnovni cilj rada prilagođavanje informatičkih tehnologija postojećim numeričkim modelima oticanja, stečena iskustva u razvoju alata kojima se analizira tečenje vode po površini urbanog terena su, poput informatičke povratne veze, iskorišćena u koncipiranju modela *dvojnog odvodnjavanja*. Modeli dvojnog odvodnjavanja su takvi modeli koji verno simuliraju proces plavljenja urbanog terena usled jakih kiša, kada postojeća kanalizaciona mreža nije u stanju da primi svu vodu i kada površinski tok aktivno učestvuje u procesu oticanja. Predloženi koncept modela dvojnog odvodnjavanja uvodi *punu interakciju površinske i podzemne komponente* toka u delovima sliva gde je došlo do potapanja, uz kontinualnu *dvosmernu vezu sa hidroiinformatičkim modelom*, koji kreira potrebne nove podatke za svaki vremenski korak proračuna.

---

<sup>3</sup>Standardni numerički modeli simuliranja oticanja vode sa urbanih slivova:  
–BEMUS (BEogradski Model Urbanih Slivova), razvijen na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu [83];  
–Hystem-Extran razvijen na univerzitetu Hanover;  
–MOUSE (MOdeling of Urban SEwer systems) razvijen na Danish Hydraulic Institute.

## 1.4 Pregled svih poglavlja rada

U ovom radu je usvojen prilaz da se, u prvoj fazi integracije numeričkih i informatičkih modela, koja je detaljno obrađena, hidroinformatika iskoristi za pripremu ulaznih podataka za matematičke modele i za interpretaciju rezultata simulacije. U poglavlju *Informatički model odvodnjavanja urbanih površina* se u prvoj tački ukratko obrađuju osnovne karakteristike fizički baziranih modela, a zatim se daje opis razvijenog informatičkog modela: komponente koje su obrađene, prostorni model podataka, slojevi i alati, raspoloživi i novokreirani. Na kraju poglavlja se daju mogućnosti povezivanja dva modela, matematičkog i informatičkog.

U narednom poglavlju, *Priprema podataka za numeričke modele odvodnjavanja urbanih površina*, obrađuju se procedure za unos struktuiranih, postojećih podataka u informatički model. Obrađeni su podaci o podzemnoj mreži (kanalizacionoj) ili površinskoj (kanali), o visinskoj predstavi terena i o objektima na terenu. Za svaku od ovih grupa, date su procedure za unos i kontrolu podataka, kreiranje potrebnih slojeva i njihov prikaz. Na osnovu tih podataka, u poglavlju *Kreiranje sloja površinskog toka vode*, analiziraju se uslovi tečenja vode po površini terena i kreiraju slojevi novih informacija o depresijama i površinskim kanalima. Poglavlje *Kreiranje sloja sa granicama podslivova (delineacija sliva na podslivove)* na bazi unetih podataka i analize tečenja vode po površini urbanog terena, pokazuje načine kreiranja sloja sa granicama podslivova. Razvijene procedure su posebno prilagođene urbanim uslovima, ali su primenjive i za neurbanizovane slivove.

Deo rada koji se odnosi na prilagođavanje informatičkog modela postojećim numeričkim modelima se završava poglavljem *Proračun parametara za "klasične" modele OUP-a*. U tom poglavlju se daju "recepti" za proračun svih potrebnih hidroloških (konceptualiziranih) i hidrauličkih parametara za modele BEMUS, Hystem-Extran i MOUSE, koristeći unete i novokreirane slojeve.

Mada je najveći deo ovog rada posvećen pripremi podataka za postojeće numeričke modele, u poglavlju *Konceptija modela dvojnog odvodnjavanja urbanih površina* se na osnovu do sada razvijenih i prikazanih alata daje predlog za poboljšanje aktuelnih fizički baziranih matematičkih modela. Poboljšanje se odnosi na kvalitetniji proračun procesa plavljenja urbanog terena i tečenja vode po terenu, kada postojeća kanalizaciona mreža nije u stanju da primi svu vodu. Posle definicije problema, prikazani su neki postojeći postupci za njegovo rešavanje, kao i koncept predloženog rešenja dvojnog odvodnjavanja. Detaljno su obrađeni potrebni parametri koji se mogu odrediti iz već uspostavljenog informatičkog modela. Dat je i način programske implementacije modela kojom se kompleksan problem svodi na upotrebljiv nivo.

Na kraju rada, u poglavlju *Primeri primene razvijenog hidroinformatičkog modela*, daje se kratak prikaz do sada urađenih projekata. Projekti su poređani hronološki, onako kako su i razvijani i kako su uvođeni u upotrebu pojedini novi alati. Za svaki projekat su dati samo najosnovniji podaci, sa osvrtom na primenjene tehnologije pripreme podataka i procene upotrebljenih resursa. Takođe, navedena su i

stečena iskustva, koja su kasnije ugrađena u informatički model.

U početku rada na razvoju informatičkog modela, postojala je ambicija da se razviju i moduli za vizualizaciju rezultata simulacije, posebno prilagođeni potrebama urbanog odvodnjavanja. Brz razvoj računarske tehnike je, međutim otvorio prostor za razvoj nezavisnih grafičkih aplikacija za prikaz podataka u vremenu i prostoru. Zajedničko za sve te aplikacije je da zahtevaju dobro strukturane i georeferencirane podatke, a to su bile upravo polazne premise u ovom radu. Takođe, za sve analize koje spadaju u domen standardnih GIS operacija, kao što su preklapanje sloja namene površine terena sa slojem visine terena i slojem dubine vode, radi određivanja plavljenih površina i procene ukupne štete, nisu razvijani posebni moduli u ovom radu, jer ih je danas lako obaviti primenom nekih od standardnih paketa. Zahvaljujući informatičkom pristupu, strukturanim slojevima podataka i primeni standardnih formata datoteka, razvijeni moduli se lako integrišu sa mnogim GIS i CAD programima.

## 1.5 Kratka predistorija ovog rada

Prve ideje za formiranje informatičkog modela odvodnjavanja urbanih površina, su potekle iz saradnje sa dr. John Elgyjem, u okviru TEMPUS projekta “Upgrade of Engineering Curricula in Advanced Information Systems for Environmental Improvement in Hydraulic Engineering”, na Univerzitetu ASTON, Birmingham, UK, početkom 1992. godine. Zahvaljujući prof. Čedi Maksimoviću, mentoru ovog rada, inicijalne ideje su dobile pun zamah kroz niz domaćih i međunarodnih projekata, a pre svega u saradnji sa institutom ITWH (Institut für Technisch-Wissenschaftliche Hydrologie) iz Hanovera i dr. Lothar Fuchsom i firmom Hydroinform a.s., Prag i dr. Evzen Zemanom. S obzirom na multidisciplinarnost teme, značajnu pomoć u razvoju su pružile i kolege iz Instituta za geodeziju Građevinskog fakulteta Beograd, doc. Dragan Mihajlović i mr. Željko Cvijetinović (autor algoritma za kreiranje TIN modela), kao i kolege iz Instituta za hidrotehniku Građevinskog fakulteta Beograd, prof. Marko Ivetić (komentor i dežurna savest autora) i mr. Slobodan Đorđević, ekspert za BEMUS i pažljivi sagovornik, posebno u domenu razvoja informatičkog modela dvojnog odvodnjavanja.



## Glava 2

# Informatički model odvodnjavanja urbanih površina

Razvoju matematičkih modela sistema za Odvodnjavanje Urbanih Površina (OUP) se u prethodnom periodu poklanjala izuzetno velika pažnja. Opšta karakteristika tog razvoja je stalno smanjenje reprezentativne površine ili zapremine, u kojoj se svi fizički procesi osrednjavaju primenom nekog od usvojenih koncepata, a koja predstavlja osnovni računski element (računsku jedinicu). Posledica tog smanjenja računskog elementa je naglo povećanje količine i potrebnog kvaliteta ulaznih podataka.

Težište ove disertacije je na podacima koji se koriste u matematičkim modelima OUP-a. Kao što se definiše matematički model, potrebno je definisati i razviti i informatički model. Takav informatički model, u ovoj fazi, je prilagođen sadašnjim matematičkim modelima, dok će potpuna integracija oba modela nastupiti tek kada informatički model unese određene uticaje u fazu koncipiranja razvoja matematičkog modela (u poglavlju 7 je dat predlog jedne takve integracije).

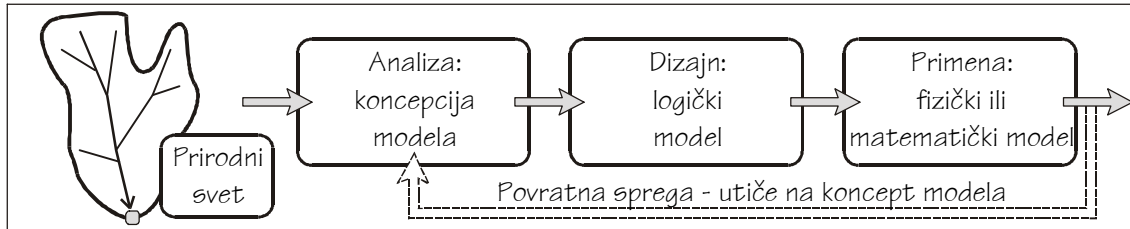
U ovom poglavlju će se dati kratak prikaz matematičkih modela OUP-a za koje se razvija informatički model. Nakon toga, definisaće se komponente informatičkog modela, korišćeni prostorni model podataka kao i podržavani slojevi. U posebnoj tački će se dati pregled razvijenih hidrofornih alata, koji će biti detaljnije prikazani u ovom radu. Integracijom postojećih matematičkih modela i razvijenog informatičkog modela dolazi se, na kraju, do korisničkih paketa u kojima se, primenom hidrofornosti, znatno ubrzava rad uz povećanje kvaliteta dobijenih rezultata.

## 2.1 Matematički model OUP-a

Procesi koji se odvijaju u prirodnom svetu su (još uvek) suviše kompleksni da bi bilo moguće napraviti njihovu potpunu simulaciju matematičkim modelima. Proces generisanja kiše u atmosferi, padanja na tle i njene infiltracije, odnosno transformacije u površinski oticaj, poniranje dela tog oticaja u kanalizacioni sistem i tečenje

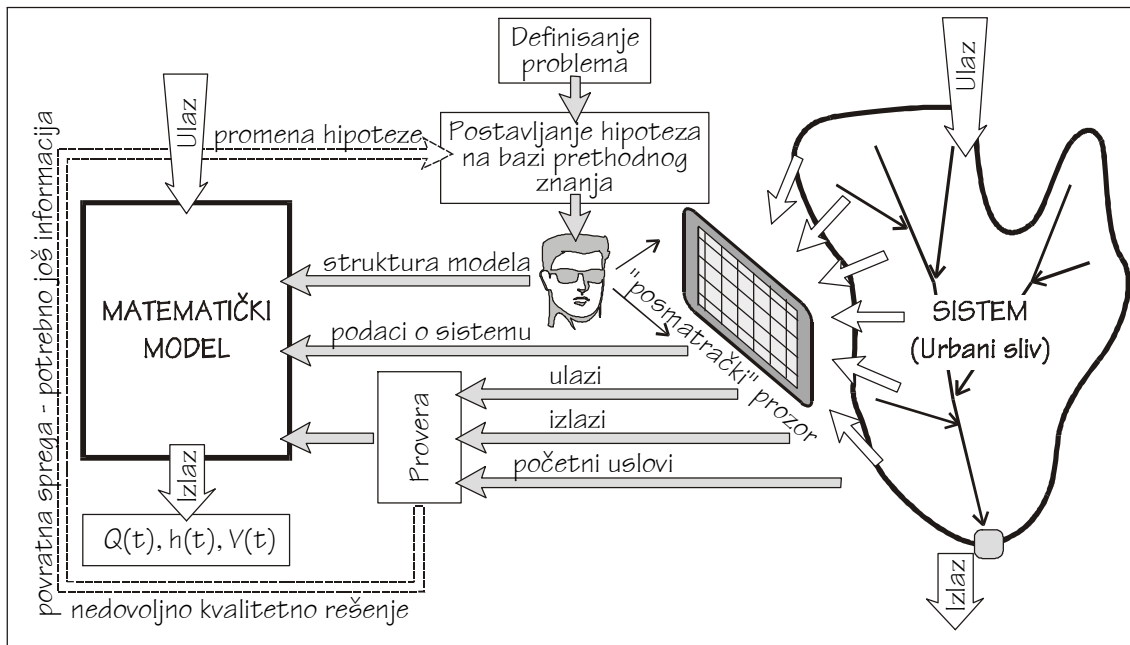


kolektorima do nekog izliva, je izuzetno složen. Ali, i pored sve svoje složenosti, taj proces je neophodno opisati matematičkim modelom, kako bi se omogućilo njegovo izučavanje sa ciljem projektovanja sistema za pravovremeno prikupljanje i odvođenje voda [1].



Slika 2.1: Faze u razvoju modela kojim se opisuju fizički procesi [76]

Na slici 2.1 su predstavljene faze razvoja modela kojim se simuliraju procesi iz prirodnog sveta [76]. Prvi i najvažniji korak je analiza fizičkih procesa, uspostavljanje logične veze u vidu koncepta modela, kojim će se ti procesi preslikati u znatno jednostavnije, rešive postojećim matematičkim aparatom. Nakon konceptualizacije stvarnih procesa, ide se na fazu dizajniranja, projektovanja, razvoja i testiranja modela, i na kraju primene modela.



Slika 2.2: Modelovanje urbanog sliva je iterativni proces: u svakoj iteraciji, nove informacije o sistemu se prikupljaju i usvojene hipoteze se modifikuju, odbacuju ili postavljaju nove [46]

U toku modelovanja urbanog sliva, kao i bilo kog drugog složenog sistema, ne sme se zaboraviti činjenica da je proces modelovanja iterativni postupak, kao što je

to prikazano na slici 2.2 [46, 47]. Stalnim izučavanjem problema, polazne hipoteze postavljene u fazi konceptualnog rešenja problema se modifikuju, odbacuju ili se postavljaju potpuno nove. Proces promena hipoteza zavisi i od tehnološkog napretka: broj dostupnih podataka o sistemu kontinualno raste, kao što rastu i naše mogućnosti da se obradi veća količina informacija u jedinici vremena.

Prvi pristup kreiranju modela za OUP je bilo uspostavljanje direktne veze između kiše i zabeleženog hidrograma u nekoj tački na slivu, koristeći brojne parametre koji nisu zasnovani na fizičkim zakonima. Značajan napredak je postignut kada je ceo sliv podeljen na manje delove, podslivove, i kada je za svaki podsliv postavljena odgovarajuća zavisnost veze kiša-otica. Pažljivim osmatranjem i kalibracijom brojnih parametara, moguće je postići dobro poklapanje između stvarnih događaja na slivu i odgovora matematičkog modela. Tačnost takvih modela u uslovima ekstrapolacije (simuliranja kišnih epizoda koje su različite od merenih) je, međutim, veoma sumnjiva i teško ju je proceniti. Primenjujući takav pristup, iskustva sa jednog urbanog sliva je teško preneti na drugi sliv, zbog nemogućnosti preslikavanja morfoloških karakteristika.

Unošenjem elemenata simulacije pojedinih fizičkih procesa na slivu, postignut je znatan napredak u modelovanju OUP-a. Složeni proces je podeljen na dva modela: prvi deo se bavi procesima padanja kiše, njene infiltracije i evaporacije, tečenja po hrapavoj propusnoj površini i tečenja po ulicama, zaključno do formiranja hidrograma na ulazu u kanalizacioni sistem. Drugi model koristi sračunate hidrograme kao ulaz u sistem cevi i rešavanjem jednostavnijih ili složenijih jednačina, simulira kretanje vode u kolektorima, rad kontrolnih organa (preliva, ispusta, itd.) i crpnih stanica. Spoj dva modela je u svakom računskom čvoru kolektorske mreže, koga čini šaht sa dodatom funkcijom slivnika.

Opšti naziv za sve ovakve modele je “fizički bazirani” modeli, jer koriste manji broj parametara vezanih za fizičke karakteristike sistema, kao što su Manning-ov “koeficijent” trenja, Horton-ova (ili slična) formula za infiltraciju, konceptualno predstavljanje sliva mrežom podslivova i čvorova i slično, dok se proračun bazira na osnovnim principima održanja mase, količine kretanja i energije. Najveći broj trenutno aktivnih simulacionih modela u Evropi pripada ovoj grupi: MOUSE, Hystem-Extran, BEMUS, Hydroworks.

Usavršavanjem koncepta modela, generalno rastu potrebe za količinom i kvalitetom ulaznih podataka. Za većinu savremenih fizički baziranih modela, potrebni su sledeći podaci [20, 78]:

**Opšti podaci** za kontrolu rada programa, imena ulaznih i izlaznih datoteka i slično.

U ovu grupu spada i kontrola stepena detaljnosti hidrološkog i hidrauličkog modelovanja, što zavisi od raspoloživih ulaznih podataka kao i zahtevane brzine rada modela.

**Podaci o kiši** koje čine istorijski zapisi (ako postoje), merodavna kiša, ITP<sup>1</sup> krive, podaci o pokretnim kišama itd.

<sup>1</sup>Kriva Intenzitet-Trajanje-Povratni period, na engleskom *IDF Intensity-Duration-Frequency*.

**Hidraulički podaci** o kanalizacionoj mreži, bazni i dodatni dotoci u sistem, nizvodni uslovi i karakteristike kontrolnih organa. Kod simulacionih modela namenjenih kontroli i upravljanju radom kanalizacionog sistema u realnom vremenu, ovaj segment podataka je povezan sa telemetrijskim sistemom koji daje trenutna stanja svih kontrolnih organa.

**Podaci o mreži** koje čine podaci o šahtovima, značajnijim slivnicima i kolektorima. Na delu sliva gde ne postoji podzemna kanalizaciona mreža, tečenje po površini terena se odvija mrežom postojećih drenažnih kanala ili prirodno formiranih tokova. U ovu grupu podataka spadaju veće depresije i retenzioni bazeni, kao i njihova veza sa površinskom ili podzemnom mrežom.

**Podaci o slivu** odnosno podaci o podslivovima i njihovim granicama, površini, nagibu, obliku, strukturi objekata na površini terena, vrsti tla itd. U uslovima postojanja kanalizacione mreže, osnova za kreiranje granica podslivova su računski čvorovi kolektorske mreže ili sami kolektori (zavisi od primenjenog koncepta u modelu površinskog oticanja) a na ruralnom delu sliva kao osnova za određivanje podslivova služi mreža površinskih kanala.

Od svih nabrojanih ulaznih podataka koji su potrebni fizički baziranim modelima OUP-a, u okviru ovog rada se razmatraju poslednje dve grupe, podaci o mreži i podaci o slivu. Koristeći savremene informatičke alate i razvijajući nove, cilj ovog rada je da se unapredi kvalitet i pouzdanost pripreme podataka ne bi li detaljniji opis sliva dao pouzdaniju simulaciju procesa oticaja, uz povećanje mogućnosti analize uticaja različitih faktora na slivu na procese generisanja oticaja vode kao i na promene njenog kvaliteta. Zadržavanjem postojećih standardnih paketa za OUP i njihovim integrisanjem sa razvijenim alatima postiže se znatno povećanje produktivnosti, uz smanjenje subjektivnosti u proceni ulaznih parametara za model.

U toku razvoja informatičkog modela prilagođenog postojećim matematičkim modelima, došlo se na ideju o mogućim izmenama u koncepciji rešenja dela koji se odnosi na površinski tok. Zahvaljujući novim informacijama koje su na raspolaganju, moguće je znatno vernije modelovati ponašanje sliva u ekscenim situacijama, kada dođe do površinskog plavljenja. Informatičko rešenje tog problema bazirano na razvijenim alatima će biti dato u poglavlju 7 *Koncepcija modela dvojnog odvodnjanja urbanih površina*.

## 2.2 Opis informatičkog modela OUP-a

Razvoj matematičkog modela oticaja sa urbanog sliva je kompleksan zadatak. Rešavajući brojne koncepcijske i numeričke probleme, često se o potrebnim ulaznim podacima razmišlja na samom kraju: koristi se neka od raspoloživih baza podataka i formiraju se maske za unos podataka koje korisnik treba da popuni. Bolji pristup problemu unosa podataka je korišćenje nezavisnih CAD programa, gde se vizuelno

unose podaci o mreži. Na taj način, međutim, nije moguće rešiti pitanje kreiranja novih informacija, kao ni struktuiranost i održavanje postojećih.

Pored matematičkog (numeričkog) modela, potrebno je razviti i informatički model: način kako podaci “teku” od kreatora do korisnika podataka ili između jednog i drugog korisnika [76, 77]. Informatički model mora da definiše model podataka, koji osim strukture podataka sadrži i “metapodatke”, podatke o podacima (izvor podataka, domen tačnost, raspoloživost, datum, struktura itd.), slojeve u kojima se čuvaju podaci i vezu između njih, kao i alate, odnosno postupke kojima se ti slojevi kreiraju i održavaju. Konačno, informatički model obezbeđuje dvostranu komunikaciju sa matematičkim modelom i to snabdevajući model potrebnim podacima kao i preuzimanjem rezultata simulacije radi njihovog čuvanja i prikaza.

### 2.2.1 Komponente informatičkog modela OUP-a

Informatički model<sup>2</sup> prilagođen odvodnjavanju urbanih površina korišćenjem fizički baziranih simulacionih programa, sadrži sledeće komponente [63, 75]:

**Prikupljanje podataka** ili unos podataka. Koriste se sve raspoložive tehnike, pri čemu u najvećem broju slučajeva raspoloživi resursi projekta OUP određuju izvor podataka. U ovom radu će se kod svakog od ulaznih podataka pobrojati mogući izvori podataka kao i realni izvori.

Svaki podatak je georeferenciran, poznate su njegove  $X, Y$  koordinate u jedinstvenom, izabranom geodetskom sistemu. Ukoliko se preuzimaju podaci iz više različitih sistema, neophodno je, primenom standardnih GIS alata, obaviti preračunavanje i uklapanje koordinatnih sistema u izabrani sistem.

**Verifikacija podataka** odnosno kontrola kojom se daje mera neodređenosti ulaznih podataka. Nakon verifikacije, kreiraju se metapodaci. U svakom narednom koraku analize ulaznih podataka, metapodacima se prati geneologija kreiranja novih informacija. O verifikaciji podataka kao i tačnosti različitih izvora će biti reči u okviru poglavlja 3 *Priprema podataka za numeričke modele OUP-a*.

**Organizacija čuvanja podataka** i timski rad na projektu, čuvanje različitih verzija proračuna i druga organizaciona pitanja. O ovom delu informatičkog modela u radu neće biti govora, mada predstavlja izuzetno složen problem. Uobičajeni projekti OUP-a generišu velike količine podataka usled rada na više varijanti rešenja i zahtevaju angažovanje većeg broja projekatanta. Standardne relacione baze podataka ne daju direktno rešenje za sve ove probleme, dok su objektno orijentisane baze još uvek u fazi razvoja [93].

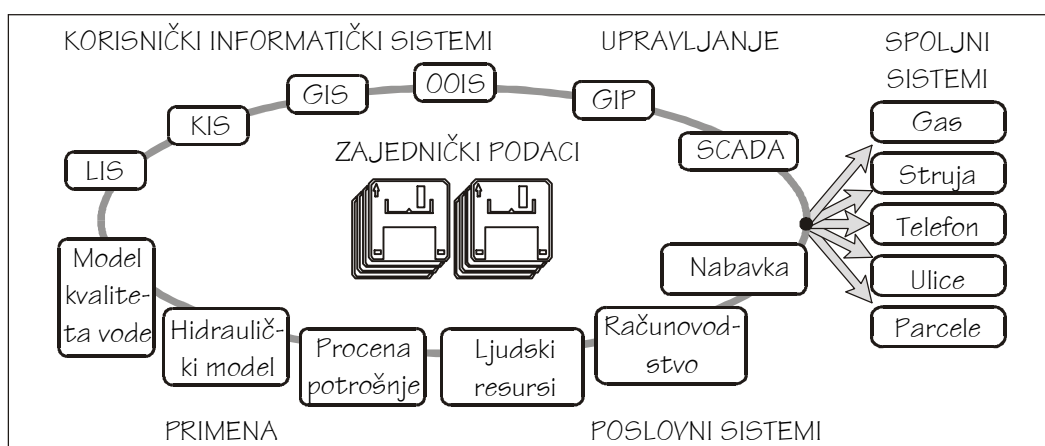
---

<sup>2</sup>Informatički model je nešto uži pojam od informatičkog sistema. Prema nabrojanim komponentama modela, nedostaje samo jedna, ali veoma značajna komponenta da bi se razvijeni model nazvao sistem”, a to je masovna i univerzalna primenjivost podataka kroz duži vremenski period. U razvijenom modelu, radi se o podacima namenjenim sistemima OUP-a i koriste se, uglavnom, u periodu projektovanja sistema od strane manjeg broja korisnika.

**Analitički deo modela** čini kreiranje novih slojeva informatičkog modela na osnovu unetih podataka i metapodataka. U kreiranju se koriste klasični GIS postupci (reklasifikacija podataka, preklapanje, itd.) kao i novorazvijeni u ovom radu (analiza tečenja po površini terena, određivanje podslivova, itd.).

**Veza sa simulacionim modelima OUP-a** je ili jednosmerna, kod svih fizički baziranih modela trenutno u upotrebi, gde se na osnovu slojeva u informatičkom modelu kreiraju podaci potrebni simulacionom modelu, ili dvosmerna, kod novih modela koji su prilagođeni interaktivnom radu sa informatičkim modelom. U ovom radu se detaljno prikazuju postupci za uspostavljanje jednosmerne veze sa nekoliko standardnih simulacionih modela. Takođe, daje se i predlog novog koncepta odvodnjavanja urbanih voda, koja uspostavlja čvršću vezu između matematičkog i informatičkog modela.

**Prezentacija rezultata simulacije** u prostoru i vremenu je izuzetno važan segment informatičkog modela. Kako na tržištu postoji veći broj programa koji uspešno prikazuju dobro strukturirane prostorne podatke, u ovom radu je segment prezentacije izostavljen, težište je prebačeno na strukturiranje ulaznih podataka i kreiranje novih informacija.



Slika 2.3: Povezivanje različitih informatičkih sistema na nivou firme (skraćenice sa slike: LIS - laboratorijski informatički sistem, KIS - podaci o korisnicima, GIS - geografski informatički sistem, OOIS - opravka i održavanje, GIP - upravljanje gubicima i procurivanjima, SCADA - nadzor nad sistemom i prikupljanje podataka)

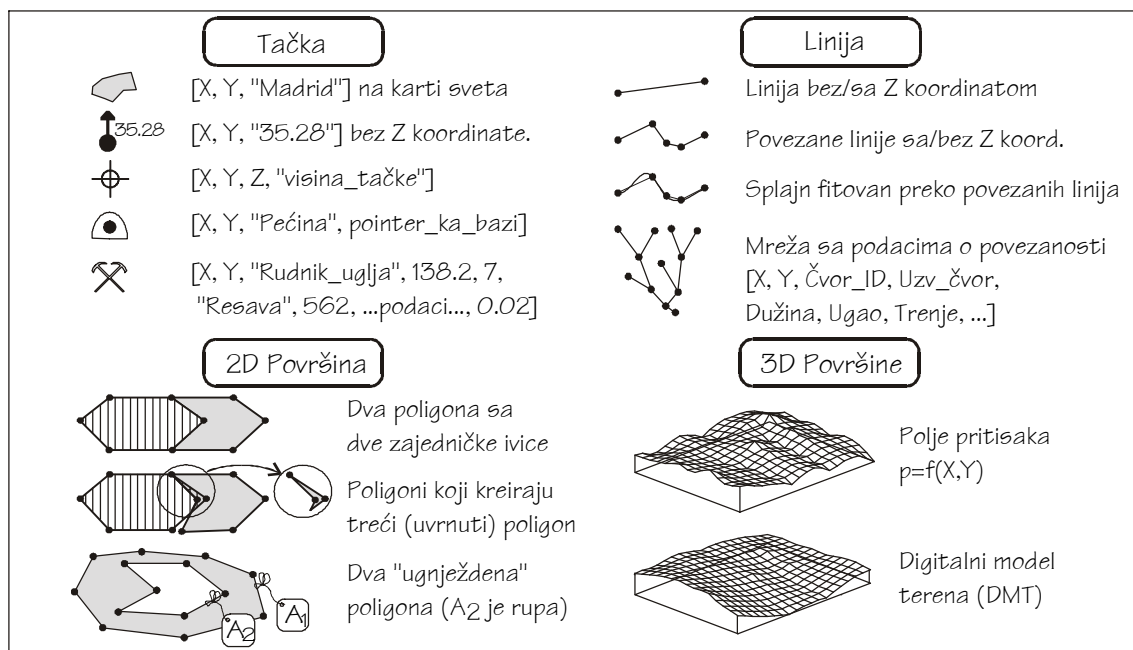
**Veza ka drugim informatičkim sistemima** je, ne samo na našim prostorima, još uvek u rudimentarnom stepenu razvoja. Povezivanje različitih informatičkih sistema na nivou jedne vodovodne/komunalne organizacije (slika 2.3), ili na nivou grada, zahteva razvijenu komunikacionu i računarsku infrastrukturu, kao i znatne promene u organizaciji rada. Razvijeni informatički model u okviru

ovog rada, može lako da se integriše sa širim, korporativnim ili gradskim informatičkim sistemom, jer je baziran na strukturanim georeferenciranim podacima.

Prvu komponentu informatičkog modela čini masovan unos podataka. S obzirom da se u okviru ovog rada razvija informatički model kao podrška postojećim simulacionim paketima OUP-a, kao i da svaki od tih paketa već ima neki svoj način za unos podataka, ovde nije razvijan novi grafički, GIS bazirani program za unos podataka. Prednost je data već postojećim sistemima, na koje su se korisnici navikli. Umesto programa za unos podataka, razvijeni su moduli za preuzimanje podataka iz postojećih baza, u koje su implementirane rutine za njihovu proveru i za formiranje potrebnih slojeva za rad informatičkog modela.

## 2.2.2 Prostorni model podataka

Svi podaci koji se preuzimaju iz korisničkih baza, direktno unose ili se kreiraju na osnovu već postojećih, mogu biti predstavljeni korišćenjem 4 standardna geografska (i geometrijska) entiteta: tačke, linije, dvodimenzionalne i trodimenzionalne površine.



Slika 2.4: Tipovi podataka u geografskim bazama

Tačke su najprostiji prostorni entiteti bez dimenzija (slika 2.4 gore levo), imaju samo položaj  $X, Y$  i, eventualno,  $Z$  kotu. Uz tačku se po pravilu vezuje neki dodatni sadržaj, koji pokazuje šta ta tačka predstavlja (visina terena, ime pijezometra ili lokacija epicentra zemljotresa). U vizualizaciji podataka, simbol kojim se prikazuje tačka zavisi od njenog sadržaja ali i od razmere prikaza. U razvijenom informatičkom

modelu, tačkama su predstavljeni računski čvorovi kanalizacione mreže, tačke sa poznatom kotom na terenu, dno i izlaz iz depresije, kao i čvorovi površinske mreže.

Linije su entiteti sa jednom dimenzijom, dužinom, nastali spajanjem dve ili više tačaka (slika 2.4 gore desno). Najprostiju liniju određuju dve tačke i prateći atributi (identifikacioni broj, simbol za prikaz, boja itd.), dok u složenije linijske entitete spadaju povezane linije (poligoni) sa pravim ili krivolinijskim segmentima. Poligoni se koriste u razvijenom informatičkom modelu kao jedan od načina unosa podataka o visini terena: izohipsa sa atributom jednakim  $Z$  koti, izohipse.

Mreže spadaju u dinamički tip linije, jer objedinjuju ne samo podatke o tačkama (čvorovima) već i podatke o povezanosti čvorova, uzvodnim/nizvodnim čvorom, hijerarhijskim rednim brojem čvora, itd. Takva mreža se naziva topološki uređena struktura i nad njom je moguća primena GIS operacija. Mreža se u ovom radu koristi za opis kanalizacije, granate ili prstenaste. U procesu preuzimanja podataka iz korisničke baze, vrši se strukturna provera mreže. Uređena struktura mreže se koristi u procesu generisanja informacija o površinskom toku i povezanosti depresija.

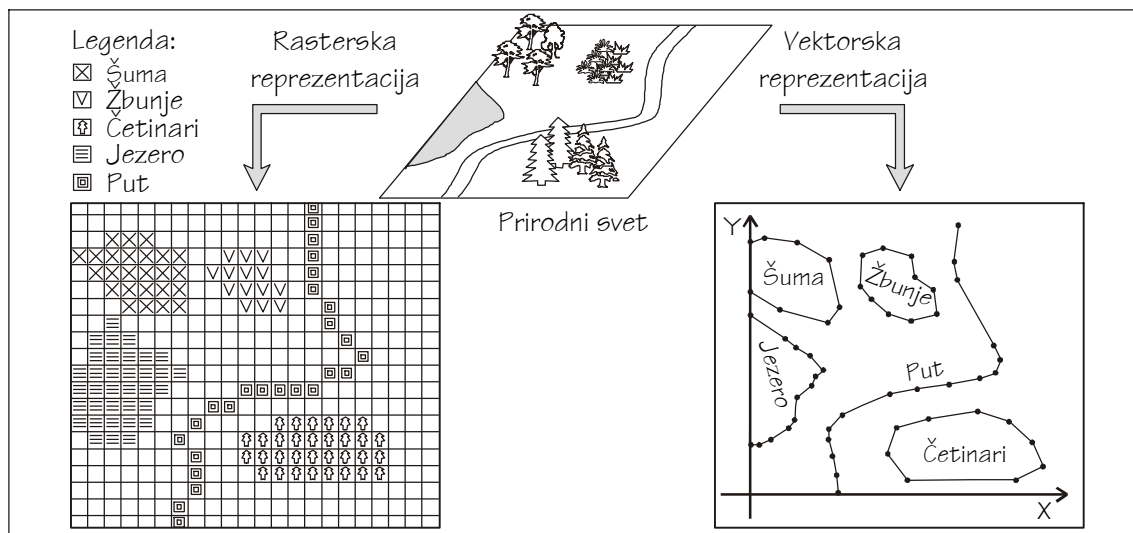
Dvodimenzionalna površina je predstavljena zatvorenim poligonom (slika 2.4 dole levo). Iako sve tačke imaju samo  $X, Y$  koordinate, ceo poligon se može nalaziti na određenoj  $Z$  koti, čime se definiše preklapanje (redosled) poligona (poligon sa većom  $Z$  kotom preklapa onog sa nižom). Poligoni poseduju topološke karakteristike kao što su površina, oblik, veza ka susedima ili hijerarhijski nivo, dok se atributi vezani uz poligon odnose na njegovu unutrašnju površinu (intenzitet kiše, tip površine, pointer<sup>3</sup> na prošireni set podataka u nekoj bazi). U informatičkom modelu OUP-a, poligoni se koriste počev od kreiranja digitalnog modela terena (preko mreže nepravilnih trouglova), unosa i čuvanja podataka o nameni površine terena, pa do kreiranih informacija o depresijama i podslivovima.

Na slici 2.4 dole desno, kao poseban tip podatka, data je i kontinualna trodimenzionalna površina. Striktno govoreći, ovaj tip podatka se može smatrati osnovnim elementom samo kod globalnih matematičkih metoda interpolacije prostora (tačka 3.2.1 *Metode interpolacije prostora*). Za sve druge načine interpolacije terena, koriste se linijski ili površinski entiteti. Zbog njihove široke zastupljenosti (koristi se za digitalni model terena, za prikaz nivoa podzemne vode, polja vazdušnog pritiska, ili bilo koje veličine kontinualno promenljive u prostoru), većina GIS paketa je opremljeni brojnim alatima za njihovo kreiranje, održavanje i manipulaciju, tako da se uglavnom tretiraju kao poseban geografski entitet.

Osnovni geografski entiteti u informatičkom modelu mogu biti u vektorskoj i rasterskoj prezentaciji. Vektorski sistem podrazumeva da se u bazi podataka čuvaju koordinate tačaka, odnosno čvorova kod linija i poligona. Rasterski sistemi se baziraju na podeli razmatranog prostora na mrežu kvadrata (grid) i dodeljivanjem jedinstvene vrednosti svakoj ćeliji<sup>4</sup> čime je određen sadržaj terena u prostoru.

<sup>3</sup>Pointer - prevod sa engleskog: pokazivač.

<sup>4</sup>Svaki kvadrat mreže se zove ćelija (na engleskom jeziku *cell*) ili piksel (*pixel, picture element*, osnovna jedinica kod digitalnog snimka, koristi se kod satelitskih snimaka) prema analogiji sa TV ekranima.



Slika 2.5: Rasterska i vektorska prezentacija istog sadržaja geografske karte

Na slici 2.5 je dat primer prezentacije dela prirodnog sveta korišćenjem rasterskog i vektorskog načina. Kod rasterskog prikaza, korisnik odlučuje o veličini mreže kojom predstavlja prostor. Obično se koristi kvadratni oblik ćelije, gde je  $\Delta X = \Delta Y$ . Kod urbanih sistema, gde su dimenzije slivova reda veličine nekoliko kilometara, uobičajena vrednost za veličinu grida je 1 do 5 m, dok kod ruralnih slivova veličina grida može biti i preko 100 m.

Izborom veličine grida, unapred se fiksira maksimalno moguća prostorna rezolucija. Dimenzija ćelije je najmanja jedinica mere, ispod koje se sadržaj prostora osrednjava. Smanjenjem veličine ćelije, raste prostorna rezolucija ali se sa kvadratom povećavaju potrebne datoteke uz produženje vremena rada sa njima. Prema literaturi [48] prihvatljiva veličina grida je definisana pravilom “hiljadu–milion”: prostor sliva treba da bude izdvojen na više od hiljadu vrsta (redova) i kolona, odnosno na više od milion ćelija. Prilikom izbora veličine grida, treba imati u vidu i istraživanja pojedinih autora, prema kojima veća ćelija grida unosi i veću grešku u potcenjivanju nagiba u digitalnom modelu terena [37].

Osnovna prednost rasterskog načina prezentacije je u jednostavnosti prostornih analiza. Sadržaj svakog dela prostora se dobija čitanjem vrednosti iz matrice, u određenoj vrsti i koloni. Takav način tretiranja prostora odgovara računarima a i načinu naše vizuelne percepcije. Sa druge strane, najveća mana rasterskog sistema je gubitak podataka na prostoru manjem od veličine izabrane ćelije. Postoji dosta radova kojima se rešava problem prostorne rezolucije<sup>5</sup> ili uvođenjem različitih dimenzija grida za različite sadržaje na terenu, piramidalni grid sistem [85], ili smanjenjem veličine ćelije u zoni naglih promena na terenu, quad-tree sistem [8]. Prostorna rezolucija se tako može povećati uz zadržavanje male redundanse<sup>6</sup> u podacima, ali uz

<sup>5</sup>Prostorna rezolucija (razlučivanje) je minimalan razmak između dve susedne ćelije.

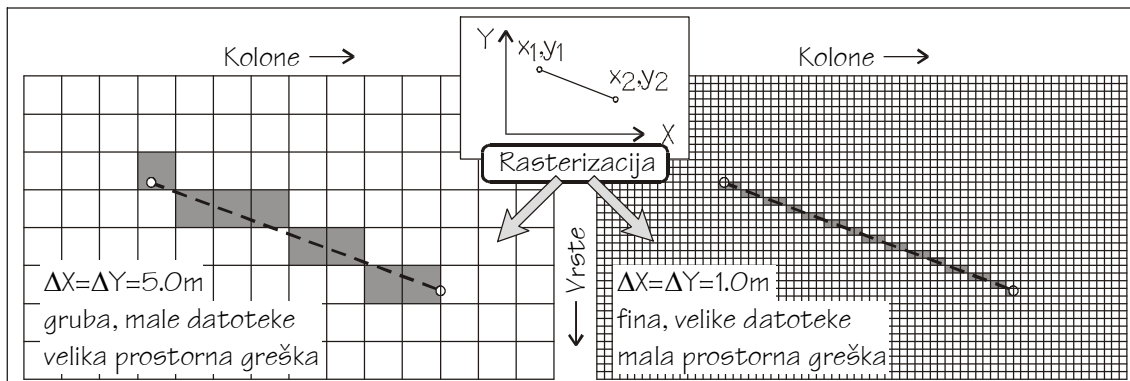
<sup>6</sup>Redundansa - jedan ili više podataka u sistemu ne donose nove informacije.



znatno usložnjavanje kasnijih procesa prostorne analize.

Vektorski sistem, za razliku od rasterskog, ne čuva podatke o prostoru, već podatke o granicama pojedinih oblasti, koristeći tačke kao osnovni element. Vektorski sistem je prikladan za formiranje baza podataka, jer ne narušava prostornu tačnost unetih podataka. Vektorski sistem po pravilu koriste CAD programi.

Nedostatak vektorskog pristupa je u znatno složenijim prostornim operacijama nego kod rasterskog sistema. Takođe, kada se unose podaci o površinama, mada se koordinate poligona koji opisuje površinu čuvaju u visokoj rezoluciji, unutrašnjost poligona dobija jedinstven sadržaj, čime se osrednjava prostor i odbacuje bilo kakva unutrašnja varijabilnost podataka. Na slici 2.5 desno, na primer, poligon koji označava žbunje osrednjava ceo prostor, dok kod rasterske reprezentacije (sa leve strane slike), unutar grupe žbunja je moguće uneti varijabilnost u podatke do nivoa jedne ćelije. Ukoliko je ova varijabilnost bitna u vektorskom sistemu, moguće je smanjiti površine poligona do najmanje grupe sa istim karakteristikama, ali se time znatno povećava veličina baze podataka uz sve kompleksnije prostorne analize.



Slika 2.6: Konverzija vektorskih podataka o mreži u rasterski oblik, rasterizacija

Razvijeni informatički model ne favorizuje ni jedan od dva načina prezentacije prostora. Prilikom unosa većeg broja podataka, koristi se vektorski sistem (između ostalog zato što su korisničke baze podataka u postojećim standardnim paketima za OUP vektorski orijentisane). Svi vektorski podaci se, zatim, konvertuju u rasterske, postupkom rasterizacije, vodeći računa o redosledu podataka (posebno važno kod poligona koji se preklapaju). Na osnovu vektorskih podataka, kreira se i vektorski orijentisan digitalni model terena, a zatim se prostornom interpolacijom rasterizuje.

Na slici 2.6 je, kao primer, prikazana rasterizacija jedne cevi: koordinate čvorova mreže su preuzete iz vektorske baze, a zatim su u rasterskom sistemu promenjene vrednosti svim ćelijama koje se nalaze na pravcu cevi, u broj jednak rednom broju cevi. Na slici je prikazan rezultat rasterizacije iste cevi za dve izabrane veličine grida.<sup>7</sup> Mada se rasterizacijom, u principu, gubi deo prostornih podataka, rasterski

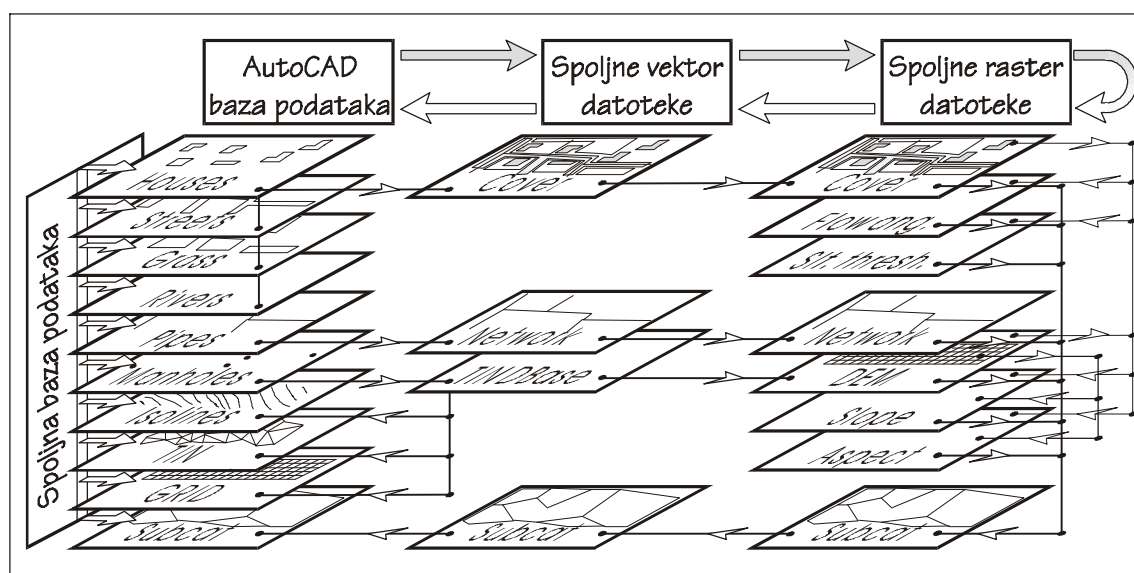
<sup>7</sup>Treba uočiti da se rasterski sistem po tačnosti prostorne reprezentacije izjednačava sa vektorskim kada je veličina ćelije u gridu jednaka polovini prostorne nepouzdanosti položaja čvorova! Mnogi korisnici izjednačavaju tačnost podataka u vektorskom sistemu sa preciznošću čuvanja ko-

sistem se izjednačava sa vektorskim kada je veličina grida jednaka polovini prostorne nepouzdanosti položaja unetih tačaka.

Svi razvijeni analitički moduli u informatičkom modelu ravnopravno koriste obe vrste podataka, i vektorske i rasterske. Rezultati proračuna koji su u rasterskom obliku, kao na primer površinska mreža kanala ili granice podslivova, postupkom vektorizacije se prevode u vektorski format. Na taj način, omogućeno je modelima za OUP da preuzmu dobijene rezultate, radi održanja integriteta i sinhronizovanja sadržaja.

### 2.2.3 Slojevi u informatičkom modelu

Podaci u informatičkom modelu OUP-a, bez obzira da li su u vektorskom ili grid sistemu, su složeni u slojeve.<sup>8</sup> U konkretnom slučaju, ulazni slojevi u sistem su: sloj sa kanalizacionom mrežom i sloj sa računskim čvorovima (šahtovi sa funkcijom slivnika), sloj sa kotama pojedinih tačaka na terenu (preuzete kote terena na mestu šahtova i posebno unete tačke sa poznatom kotom), sloj sa izohipsama i slojevi sa poligonima koji razgraničavaju površine određene namene.



Slika 2.7: Slojevi informatičkog sistema u AutoCAD-u, integracija sa Hystem-Extran modelom [70, 72] (na slici nisu prikazani slojevi vezani uz analizu tečenja vode po površini terena)

Na osnovu ulaznih slojeva, kreiraju se potrebni međuslojevi i izlazni slojevi. Na slici 2.7 je prikazan način integracije razvijenog informatičkog modela OUP-a sa

ordinata. Na primer, prilikom digitalizacije karte razmere 1:5000, ako se postigne tačnost digitalizacije tačke od 0.5 mm, na terenu je ta tačka određena koordinatama  $X, Y \pm 2.5$  m, ne uzimajući u obzir još i greške distorzije karte, sadržaja karte itd.

<sup>8</sup>Na engleskom jeziku *layers*.

modelom Hystem-Extran, koji kao bazni sistem za unos podataka i njihov prikaz koristi AutoCAD, dok su svi negrafički podaci smešteni u spoljnu bazu podataka. Korisnik unosi sve potrebne podatke strukturirano, u slojeve, odakle ih informatički model preuzima, kontroliše i prebacuje u spoljne datoteke. Uz svaku spoljnu datoteku, informatički model kreira i metapodatke: odakle dolaze originalni podaci, tip sloja, koordinatni sistem, rezoluciju podataka i pozicionu grešku, raspon vrednosti u podacima, itd. Nakon obavljenih analiza u informatičkom modelu, kreirane informacije se vraćaju u AutoCAD. U toku komunikacije između AutoCAD-a i informatičkog modela OUP-a, vodi se računa i o konstantnom sinhronizovanju spoljne baze podataka sa internom AutoCAD-ovom bazom.

Broj i kvalitet mogućih analiza u informatičkom modelu zavisi od broja unetih ulaznih slojeva. Da bi se informatički model uopšte mogao koristiti, neophodno je imati podatke o kanalizacionoj mreži i granicu slivnog područja. Na osnovu tih podataka, moguće je odrediti geometrijskim putem granice podslivova, njihov oblik, površinu i grubo količine upotrebljenih voda.

Ukoliko je korisnik pored položaja šahtova uneo i kote terena na mestu šahta, moguće je na osnovu tih podataka kreirati digitalni model terena. Koristeći model terena, određuju se računске izohipse, podslivovi prema terenu, nagib terena i nagibi podslivova. Takođe, moguće je obaviti analizu tečenja vode po površini terena. Ako se pored kota terena na mestu šahta, unesu i kote tačaka na karakterističnim mestima terena i postojeće izohipse, kreirani digitalni model terena će biti znatno kvalitetniji.

Najkvalitetniji rad sa informatičkim modelom je kada korisnik unese i podatke o objektima na terenu. U različite slojeve se unose zatvoreni poligoni koji ograničavaju ulice, kuće, travnjak, itd. Uz svaki sloj, potrebno je u spoljnu bazu podataka uneti i hidrološke karakteristike sloja (nepropusna površina, delimično propusna, travnata površina i slično), količine upotrebljenih voda, podatke o uticaju tog sloja na površinsko tečenje kao i hijerarhijski nivo sloja. Kombinacijom tih slojeva kreira se sloj namene površine terena, kojim je moguće uticati na analizu tečenja vode po površini i na određivanje granica podslivova. Takođe, za uspostavljene granice podslivova, računaju se zastupljenosti pojedinih tipova površina, preciznije se određuje parametar oblika podsliva i količina upotrebljene vode.

U toku razvoja informatičkog modela, težilo se maksimalnoj otvorenosti i što lakšoj integraciji sa ostalim savremenim informatičkim modelima. Kao format spoljnih datoteka, rasterskih i vektorskih, izabran je IDRISI<sup>9</sup> [24] format, dok su metapodaci u standardnoj ASCII datoteci. Takođe, i sam informatički model koristi kontrolnu metadatoteku (nazvanu "projekat" datoteka) u kojoj su zapisani svi relevantni podaci o postojećim slojevima, vezi korišćenih koordinatnih sistema, parametrima slojeva i imenima kreiranih datoteka.

---

<sup>9</sup>IDRISI je GIS analitički paket, Clark University, USA. Nazvan je po arapskom kartografu Al-Idrisiju, rođenom 1099. godine u španskoj koloniji Ceuta na severu Afrike (današnji Maroko). Idrisi je bio školovan na Univerzitetu Kordoba. Proputovao je po celoj Evropi, severnoj Africi, srednjem istoku i centralnoj Aziji. Po nalogu kralja Sicilije, napravio je prve detaljne mape, koje su korišćene kao referenca narednih 500 godina.

### 2.2.4 Razvijeni alati u informatičkom modelu

U prethodnim tačkama ovog poglavlja, na nekoliko mesta su spomenuti Geografski Informacioni Sistemi (GIS). GIS, kao savremeni informatički pristup podacima, je predstavljao startnu osnovu za razvoj informatičkog modela za projekte OUP-a. Prema jednoj od definicija, GIS čini skup programa i procedura za prikupljanje, čuvanje i analizu geografskih, prostornih podataka [32]. Osnovna razlika između GIS i drugih automatskih kartografskih sistema<sup>10</sup> je u mogućnosti integrisanja georeferenciranih podataka iz različitih izvora, kao i kreiranje novih informacija na bazi postojećih podataka. GIS predstavlja veoma složen i moćan sistem, čija primena najviše zavisi od raspoloživih podataka, organizacije podataka i kriterijuma za njihovu upotrebu.

Razvijeni informatički model OUP-a poštuje pravila GIS sistema. Primenom standardnog formata datoteka, korisniku je ostavljena mogućnost potpune kontrole nad informacijama. Svi alati koji su razvijeni za potrebe informatičkog modela OUP-a su kompatibilni sa IDRISI GIS sistemom, tako da korisnik, ukoliko poseduje IDRISI, može kontrolisati međurezultate i dodatnim GIS operacijama na njih uticati. GIS kompatibilne funkcije koje su razvijene i ugrađene u informatički model su:

- Rotacija i translacija slivnog područja, tako da se dobije minimalna površina opisanog pravougaonika oko sliva, sa koordinatnim početkom  $[0, 0]$  i sa većom dužinom nego širinom pravougaonika. Ovom operacijom se svi objekti iz korisničke baze, koji su u nacionalnom (ili nekom drugom) koordinatnom sistemu, svode na lokalne koordinate, uz minimiziranje površine grida, odnosno veličine pratećih datoteka.
- Rasterizacija tačaka, linija i površina. Mada je ova funkcija sastavni deo svakog rasterskog GIS programa, posebno je razvijena i ugrađena u sistem zbog jednostavnijeg rada. Prilikom rasterizacije kanalizacione mreže, kao i podslivova<sup>11</sup>, rasterizuje se i ukupna granica sliva. Prilikom rasterizacije slojeva sa objektima na terenu, koriste se metapodaci o redosledu: prvo se rasterizuju slojevi sa najnižim nivoom, pa sa višim.
- Kreiranje digitalnog modela terena, primenom triangulacije prostora u vektorskom sloju a zatim interpolacije na pravilni grid. Na osnovu kreiranog digitalnog modela terena, određuju se i računске izohipse.
- Analiza lokalnih depresija na terenu. Za svaku depresiju se računa njena najniža tačka, tačka preliva, preklapanje depresija, kriva zapremine i kriva površine.

---

<sup>10</sup>Često se koristi skraćena AM/FM sistemi (*Automated Mapping/Facility Management*).

<sup>11</sup>Podslivovi se normalno kreiraju u rasterskom obliku, pa se vektorizuju i prosleđuju korisniku u vektorskoj formi. Korisnik ima mogućnost da menja dobijene granice podslivova, pa ako dođe do nekih promena, potrebno ih je preuzeti i rasterizovati, zbog održavanja konsistencije vektorskog i rasterskog sloja.

- Određivanje nagiba i pravca maksimalnog nagiba terena za digitalni model terena, za teren nakon visinske korekcije kao i za teren nakon uklanjanja malih ili svih depresija.
- Analiza površinskog toka vode, povezanost depresija, određivanje površinske mreže kanala. Vektorizacija i topološko uređivanje mreže kanala.
- Delineacija<sup>12</sup> sliva na podslivove, geometrijski ili prema digitalnom modelu terena. Unošenje raznih korekcija u proces delineacije.
- Vektorizacija granica podslivova i njihovo topološko uređivanje (podsliv unutar podsliva, nedrenirani deo unutar podsliva). U toku postupka vektorizacije, obavlja se i postupak generalizacije granice podsliva (uklanjanje redundantnih tačaka).
- Reklasifikacija sloja podslivova primenom kriterijuma minimalnog broja boja. Ova operacija je praktično priprema za vizualizaciju podslivova.
- Proračun parametara za odabrani simulacioni program. Na osnovu sloja podslivova, mreže, sloja namene površina kao i njihovih metapodataka, određuju se površine podslivova, njihov oblik, nagib, zastupljenost različitih tipova površina i količina upotrebljenih voda. Svi ti podaci se ili direktno koriste od strane simulacionog programa, ili se vraćaju u korisničku bazu podataka.

S obzirom da se razvijeni informatički model oslanja na GIS standarde, kao i da direktno komunicira sa korisničkim grafičkim sistemom, nisu razvijane posebne funkcije za unos i prikaz podataka (osim modula koji kreira standardnu grafičku TIFF 5.0 nekomprimovanu datoteku za sve rasterske slike). Takođe, informatičkim modelom nisu obuhvaćene velike mogućnosti GIS-a na polju analize dobijenih rezultata simulacije, prostorne i vremenske vizualizacije nivoa voda u kolektorima i depresijama, preklapanja sloja namene površina sa digitalnim modelom terena, određivanje zona plavljenja i proračun šteta.

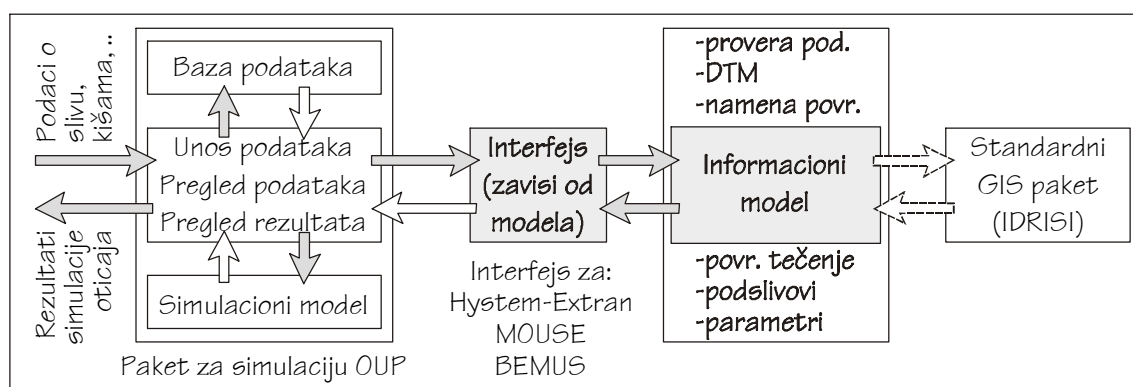
Sve nabrojane analize, kao i mnoge druge (kao što je analiza verovatnoće plavljenja, uticaj netačnosti ulaznih podataka na dobijene rezultate itd.) su već ugrađene u standardne GIS pakete. Takođe, standardni GIS paketi poseduju veoma moćne alate za prikupljanje podataka (sa digitajzera, iz fotografija aero i satelitskih snimaka njihovom analizom i reklasifikacijom, iz zemaljskih GPS uređaja) i analizu njihove tačnosti. Zahvaljujući standardnim datotekama, razvijeni informatički model sa svojim specifičnim funkcijama iz oblasti urbanog odvodnjavanja se lako integriše sa GIS paketima, čime se omogućava korisnicima napredna primena hidroinformatike u analizi oticaja.

---

<sup>12</sup>Delineacija je postupak određivanja granica podslivova, odnosno podela sliva na podslivove, na osnovu nekog od usvojenih kriterijuma

## 2.3 Povezivanje matematičkog i informatičkog modela OUP-a

U toku razvoja (hidro)informatičkog modela, naglasak je stavljen na njegovu jednostavnu integraciju sa postojećim standardnim paketima za simulaciju odvodnjavanja urbanih površina. Zbog toga je sam model izveden kao nezavisna aplikacija, u standardnom ANSI C [42] jeziku, dok su za svaki od tri razmatrana, u Evropi najčešće korišćena simulaciona paketa, razvijeni odvojeni interfejs<sup>13</sup> programi.



Slika 2.8: Povezivanje matematičkog i informatičkog modela OUP-a

Na slici 2.8 je data šema povezivanja dva modela, matematičkog i informatičkog. U slučaju računskog modela Hystem-Extran, kompletan informatički model, zajedno sa interfejs rutinama, je ugrađen u AutoCAD okruženje (slika 2.7 na strani 17). Programski paket koji objedinjuje funkcije unosa podataka, formiranja potrebnih slojeva, rad sa spoljnom relacionom bazom podataka, pripremu parametara za matematički model (model nije deo sistema) i preuzimanje rezultata simulacije se zove GIPS (Geografisches Informations- und Planungssystem für die Stadtentwässerung) i razvijen je u saradnji sa institutom ITWH (Institut für Technisch-Wissenschaftliche Hydrologie) iz Hanovera [101].

Integracija informatičkog modela sa programom MOUSE je izvedena kroz VAKbase, grafičku bazu podataka razvijenu od strane firme Hydroinform a.s., Prag [82]. VAKbase je samostalno okruženje koje omogućava grafički unos podataka i pregled rezultata simulacije, a kao bazu podataka koristi Microsoft ACCESS. Interfejs program preuzima sve potrebne podatke iz VAKbase-a, kreira projekat metadatoteke u specifičnom MOUSE formatu i prepušta dalju kontrolu informatičkom modelu. Po obavljenim proračunima, podaci sa vektorskih slojeva kao i izračunati parametri za MOUSE model se vraćaju u VAKbase.

Za rad sa modelom BEMUS, zbog nepostojanja celovitog grafičkog okruženja, koristi se deo GIPS programa za pripremu podataka i kreiranje digitalnog mo-

<sup>13</sup>Engleska reč *interface* se na našem jeziku prevodi kao veznik, pa bi *interface program* bio vezni program. U ovom radu se ne koristi ovaj (ne)adekvatni prevod, već originalna reč napisana onako kako se izgovara: interfejs.

dela terena. Nakon toga, posebnom rutinom se podaci preuzimaju iz AutoCAD-a, formira se BEMUS kompatibilna projekat datoteka i dalje analize se obavljaju u samostalnom programu, koji objedinjuje sve funkcije informatičkog modela. Rezultati proračuna se mogu pregledati korišćenjem IDRISI GIS programa, a informatički model kreira datoteteke računskih čvorova, cevi i podslivova potrebnih programu BEMUS.

## Glava 3

# Priprema podataka za numeričke modele OUP-a

Nakon kreiranja strukture podataka u informatičkom modelu, neophodno je pristupiti prikupljanju i unosu potrebnih podataka. Kako se radi o velikoj količini podataka, za svaki od ulaznih slojeva treba primeniti najefikasniji način rada. U nastavku ovog poglavlja, prikazaće se razvijena metodologija unosa podataka o kanalizacionoj mreži, visinama terena, objektima na terenu kao i karakteristikama tla. Za svaki od slojeva daju se mogući izvori podataka kao i realni izvori sa stanovišta projekta OUP-a. Takođe, biće reči o tačnosti podataka kao i njihovoj kontroli.

U toku razvoja informatičkog modela OUP-a, težilo se ka što većoj integraciji sa već postojećim programima za numeričku simulaciju. Za najveći deo grafičkog unosa podataka, koriste se postojeći programi, na koje su korisnici već navikli. Težište u razvoju informatičkog modela je prebačeno na interfejs programe koji razmenjuju podatke između korisničkih baza i razvijenih programa, pri čemu se u svakom trenutku održava puni integritet oba sistema. Sve informacije kreirane razvijenim sistemom, vraćaju se u korisnikovu bazu gde su dostupne za dalju upotrebu.

### 3.1 Površinska i podzemna mreža za odvodnjavanje urbanih voda

Projekat odvodnjavanja urbanih površina (OUP), po pravilu, počinje sa unošenjem podataka o mreži. Praktično svi standardni paketi za simulaciju OUP-a sadrže neku vrstu CAD interfejsa, koja omogućava jednostavno grafičko unošenje podataka i formiranje alfanumeričke baze. Grafičkim putem, pozicioniranjem kursora na ekranu ili digitajzeru, unosi se položaj šahtova, odnosno računskih čvorova mreže, i postavljaju cevi između šahtova. Interaktivnim putem se unose potrebne informacije sa tastature: prečnik cevi, kote početka i kraja cevi, hrapavost, materijal, starost (ili godina izgradnje) itd. Ovako uneti podaci obično čine dobro organizovanu strukturu u okviru neke od postojećih baza podataka, i primenom standardnih formata



datoteka, moguća je njihova razmena sa razvijenim informatičkim modelom za OUP.

Zbog postojanja uređenih podataka o mreži kod većine simulacionih paketa OUP-a, težište u ovoj disertaciji je prebačeno na integraciju sa postojećim sistemima, korišćenjem standardnih ASCII datoteka. U nastavku ovog poglavlja će se dati samo opšte napomene o mogućim vrstama mreža i kako se one tretiraju u razvijenom informatičkom modelu. Posebna pažnja se poklanja kontroli podataka, koju neki simulacioni sistemi ne obavljaju dovoljno kvalitetno. Na kraju, nakon preuzimanja potrebnih podataka iz korisničke baze podataka i kreiranja vektorskog sloja u razvijenom informatičkom modelu, potrebno je vektorski oblik cevi i računskih čvorova pretvoriti i u rasterski, jer se oba u informatičkom modelu ravnopravno koriste.

### 3.1.1 Vrste mreža za odvodnjavanje urbanih površina

Urbane vode se mogu podeliti na dve osnovne grupe: kišne vode, nastale transformacijom pale kiše u čist oticaj i upotrebljene vode, fekalne i industrijske. Sa stanovišta razvijenog informatičkog modela, podela je važna, jer se ove dve grupe različito tretiraju. Za sistem kišnih voda, informatički model treba da odredi pripadajuće slivne površine u okviru kojih se transformišu neto kiša u oticaj, da odredi potrebne parametre za numerički model i da ih vrati u već postojeću bazu podataka. Što se tiče dela za upotrebljene vode, informatički model može da odredi pripadajuće zone za svaku cev i da iz tih zona preuzme podatke o količinama upotrebljenih voda. Naravno, kanalizacioni sistem često ima i mešovite cevi, koje će biti tretirane u informatičkom modelu na oba načina.

Prilikom preuzimanja podataka iz postojećih baza, treba voditi računa o tome da oba sistema mogu imati "normalne" cevi, cevi koje primaju vodu sa površine terena ili iz objekata, i "tranzitne", cevi koje služe samo da sprovedu vodu i nemaju pripadajuće slivne površine. Za numerički model, obe vrste cevi su ravnopravne, samo što je kod tranzitnih cevi slivna površina  $A_{SLIV} = 0.0$  ha, odnosno dotok upotrebljene vode  $Q_{DOT} = 0.0$  l/s. U razvijenom informatičkom modelu, tranzitne cevi moraju biti isključene iz nekih razmatranja. S obzirom da nema načina da informatički model sam prepozna takve cevi, neophodno je da postoji neka posebna oznaka u osnovnoj bazi. Na primer, u toku unošenja podataka, korisnik u polju gde se unosi slivna površina, normalno ostavlja broj 0.0, jer će to polje kasnije popuniti razvijeni informatički model, a ako stavi -1.0, to će biti signal informatičkom modelu da je u pitanju tranzitna cev.

Pored tranzitnih cevi, informatički model mora voditi računa i o preuzimanju specijalnih objekata. U nekim modelima se pumpe, izlivi, prelive, itd. zadaju kao fiktivne cevi, dužine 0.0 m, u drugim modelima u okviru realne cevi sa određenom dužinom i pripadajućom slivnom površinom, a moguće ih je zadati i kao čvorove a ne cevi.

Dva su osnovna pristupa u šematizaciji površinskog toka, koja se koriste kod savremenih matematičkih modela OUP-a. Po jednom, duž kolektora postoji dovo-

ljan broj slivnika da se može smatrati da kolektor celom svojom dužinom drenira vodu sa površine terena a računski čvor (šaht) nije u kontaktu sa površinom terena, dok po drugom, kolektor je samo spoj između dva računski čvora a sva površinska voda ulazi u mrežu na mestu čvora (šahta sa slivnikom). Oba pristupa su ravnopravno zastupljena u razvijenom informatičkom modelu, pri čemu se u prvom preuzimaju iz baze podataka informacije o kolektorima dok u drugom, informacije o čvorovima. Ako je mreža mešovita, sastavljena i od površinskih kanala, oni će se tretirati kao i kolektori, to jest, moći će da primaju vodu celom svojom dužinom, bez obzira da li je osnova za rad informatičkog modela kolektor ili čvor. Jedina razlika će biti u kriterijumima za kontrolu podataka koji se preuzimaju iz baze, jer kolektori i čvorovi (odnosno šahtovi) moraju imati neku minimalnu dubinu ukopavanja, dok je kanal lociran na površini terena.

### 3.1.2 Unos i kontrola podataka

Kao što je već rečeno u uvodu ovog poglavlja, u okviru informatičkog modela nije razvijan poseban modul za unos podataka. Koriste se već postojeći standardni sistemi, sa internim bazama podataka,<sup>1</sup> a razvojem odgovarajućih interfejs rutina vrši se njihova integracija sa informatičkim modelom.

Na slici 3.1 je prikazan primer integracije sa GIPS sistemom, pod AutoCAD-om, kao osnovom za unos podataka za Hystem-Extran model. Korisnik unosi odabrane šahtove, buduće čvorove računski mreže, njihovim pozicioniranjem na ekranu ili digitajzeru, a zatim popunjava u ponuđenom prozoru osnovne podatke: oznaku šahta, prečnik, materijal, kotu dna itd. Ako je veza sa informatičkim modelom aktivna i ako postoji već napravljen digitalni model terena, korisnik može preuzeti  $Z$  kotu terena (pri postavljanju nove kanalizacione mreže) ili može uneti vrednost koju će preuzeti informatički model i iskoristiti za pravljenje DMT-a.

Cevi i specijalni objekti se unose kao veza između dva postojeća čvora (šahta),<sup>2</sup> uz unošenje podataka o tipu cevi, hrapavosti, prečniku itd.<sup>3</sup> Podaci o slivnim površinama su vezani uz cev i ne moraju se uneti (osim ako je cev tranzitna, pa treba staviti da je  $A_{SLIV} = -1.0 \text{ m}^2$ ) već će ih automatski popuniti informatički model OUP-a (slika 3.1 srednji deo, desno). Imena čvorova i cevi korisnik unosi u alfanumeričkom formatu, prema slobodnom izboru.

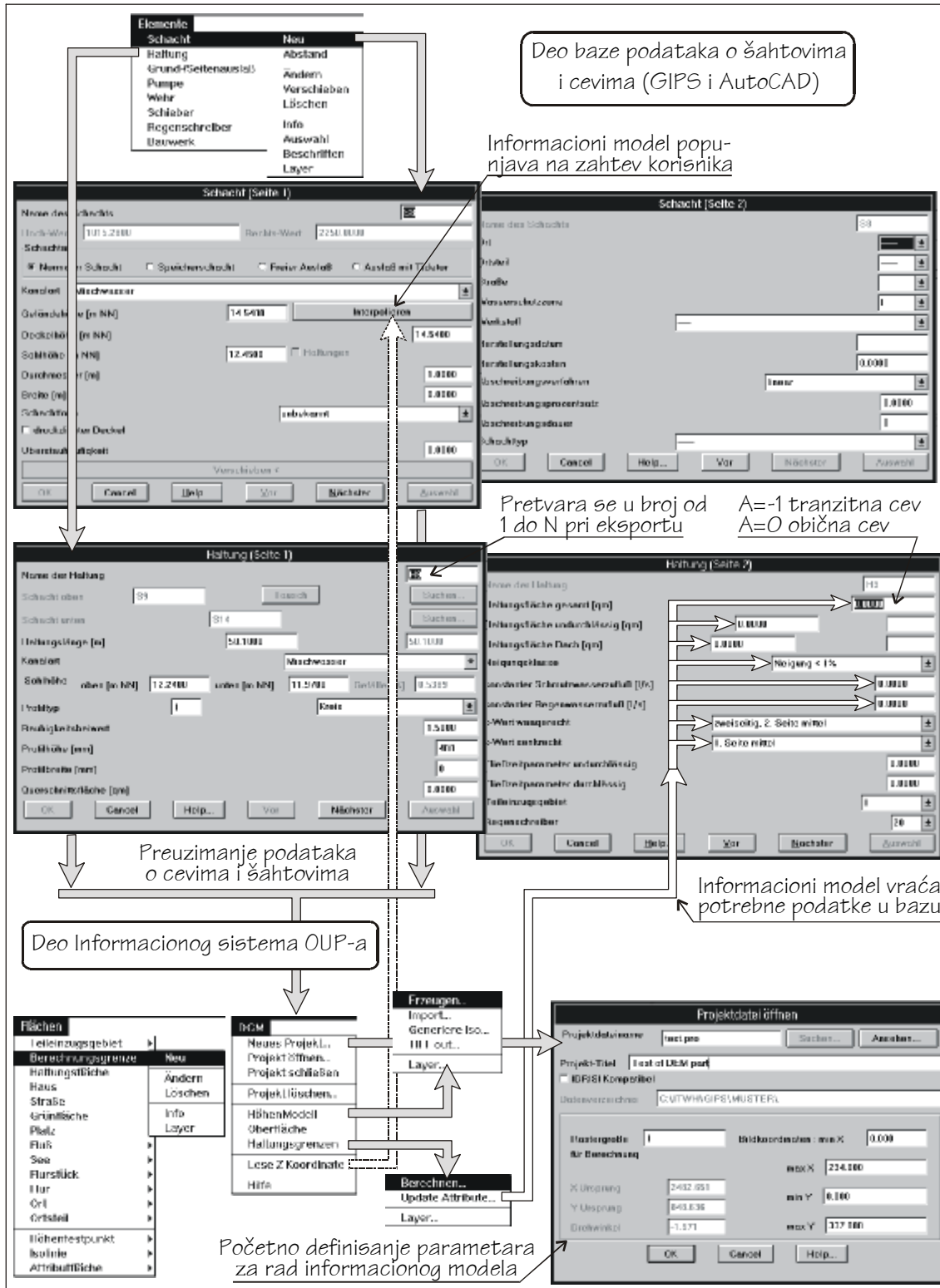
Po unosu mreže čvorova i kolektora, korisnik u GIPS sistemu uspostavlja vezu sa informatičkim modelom, slika 3.1 dole. Svi potrebni podaci iz interne baze se preuzimaju, kontrolišu i konvertuju u format koji koristi informatički model OUP-a. Nakon prolaska kroz pojedine module informatičkog modela, GIPS učitava kreirane

---

<sup>1</sup>Hystem-Extran i GIPS sa AutoCAD bazom, MOUSE i VAKbase, BEMUS i modifikovana verzija GIPS.

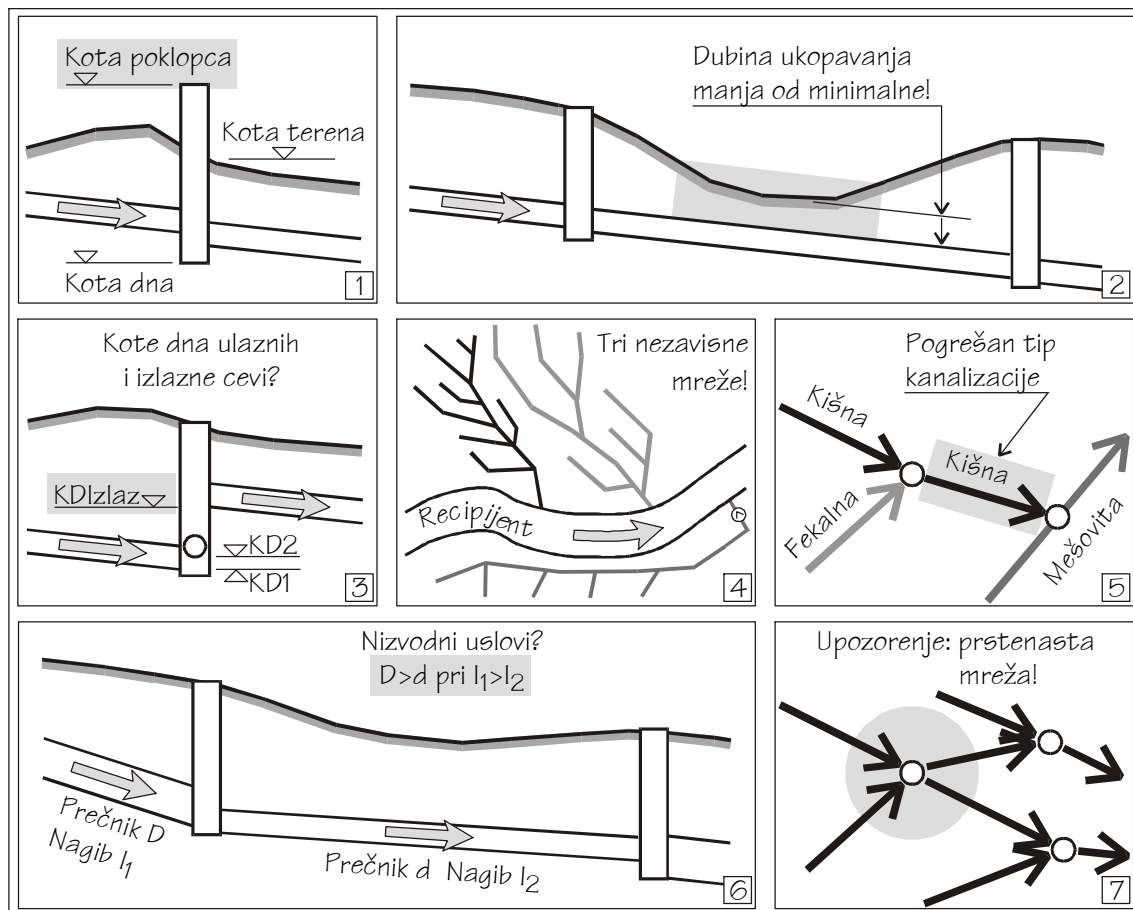
<sup>2</sup>GIPS ne podržava unošenje cevi sa prelomom, ona mora biti prava. Informatički model OUP-a će, međutim, raditi i sa izlomljenim cevima, ako se tako unese.

<sup>3</sup>Postoje podaci koji se moraju uneti (kao što je prečnik cevi, kota početka i kraja i hrapavost), kao i opcioni podaci.



Slika 3.1: Razmena podataka o mreži između GIPS baze podataka (gornji deo slike) i integrisanog informatičkog modela (donji deo)

rezultate i popunjava prazna mesta u bazi podataka uz istovremeni grafički prikaz.



Slika 3.2: Kontrole podataka o mreži implementirane u informatički model OUP-a

Kontrola podataka prilikom preuzimanja iz postojeće baze se izvodi u nekoliko koraka. Pri tome, neki koraci možda izgledaju banalno, ali u realnom radnom okruženju sa više od 1000 cevi i nekoliko inženjera koji istovremeno rade na projektu, ove kontrole su neophodne (slika 3.2):

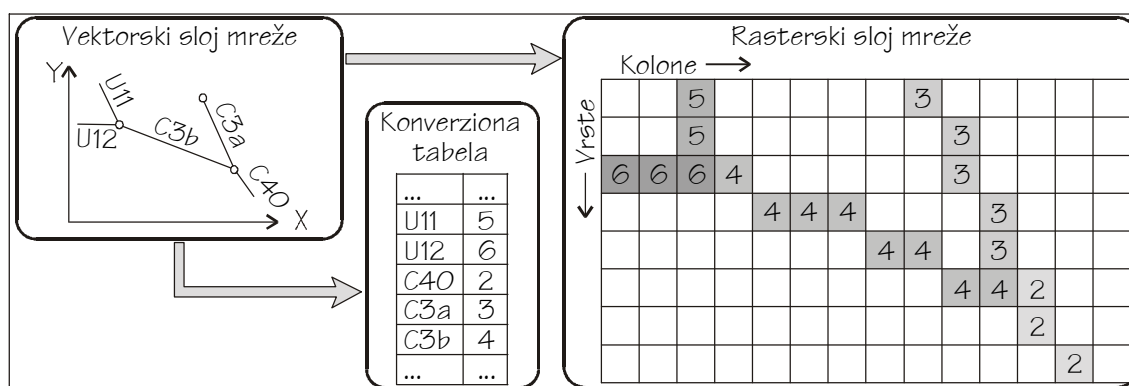
1. Kote računskih čvorova, odnosno šahtova, se mogu zadati nezavisno od terena. Potrebno je proveriti odnose kote dna šahta, kote terena i kote poklopca šahta.
2. Prodor cevi na teren duž cevi, sa minimalnom dubinom ukopavanja. Neki standardni sistemi za unos podataka o mreži provere kote početka i kraja cevi u odnosu na kotu poklopca šahta, ali ni jedan ne proverava kote terena duž cevi kao i minimalnu dubinu ukopavanja. Kod otvorenih kanala, kriterijum je da dno kanala mora biti u granicama minimalne i maksimalne dubine ispod kote terena.
3. Kote dna cevi u računskom čvoru: uzvodne cevi treba da budu na istoj ili višoj koti od nizvodnih cevi.

4. Povezanost cele mreže, prebroji povezane delove mreže i označi ih različitim bojama za grafički prikaz.
5. Vrste cevi (fekalne, kišne, mešovite) od uzvodnog prema nizvodnom kraju moraju biti složene logično: ne može fekalna cev da se uliva u kišnu.
6. Provera prema osnovnim hidrauličkim parametrima, po prečniku i nagibu: sumnjiva su mesta gde se veći prečnik uliva u manji uz isti ili manji nagib cevi.
7. Provera da li je mreža prstenasta,<sup>4</sup> odnosno, da li postoji čvor sa dva izlaza.

Po završenoj kontroli podataka, kreira se izveštaj sa greškama i upozorenjima. Projektant prema tom izveštaju otklanja greške u izvornoj bazi podataka, ponovo sprovodi kontrolu i, na kraju, kreira datoteke potrebne za rad informatičkog modela.

### 3.1.3 Konverzija vektorskog zapisa u rasterski

Podaci o kolektorima i čvorovima, preuzeti iz korisničke baze, su po pravilu u vektorskom formatu. Razvijeni informatički model koristi potpuno ravnopravno vektorske i rasterske slojeve, tako da je neophodno konvertovati vektorske podatke o mreži u rasterske (rasterizacija, tačka 2.2.2 *Prostorni model podataka*). U toj konverziji, smanjuje se tačnost prostornog položaja čvorova, koja je u vektorskom obliku zavisila samo od tačnosti izvora podataka (i koordinate bilo koje tačke duž cevi se mogu odredi numerički, sa istom tačnošću i rezolucijom kao i čvorovi), na unapred izabranu veličinu grida  $\Delta X$ , čime se nepovratno gubi deo informacija. Vrednost ćelije u gridu je, nakon rasterizacije, ili 0 (nula, kolektor ne prolazi kroz tu ćeliju) ili neki broj  $m$  ( $m$ -ti kolektor prolazi kroz tu ćeliju).



Slika 3.3: Pri preuzimanju podataka iz baze kreiraju se rasterski sloj i konverzionna tabela, kao veza ka originalnim podacima

<sup>4</sup>Neki simulacioni modeli OUP-a ne dozvoljavaju rad sa prstenastim mrežama. Sa stanovišta razvijenog informatičkog modela, granate i prstenaste mreže se ravnopravno tretiraju.

U toku rasterizacije vektorskog sloja, potrebno je obaviti još jednu konverziju: oznake za cevi, koje su u bazi podataka u alfanumeričkom formatu (korisnik proizvoljno zadaje ime cevi) i koje su jedinstvene, potrebno je prevesti u brojeve, od 1 do  $N$ , slika 3.3. Da bi se zadržala veza između baze podataka i rasterskog sloja, kreira se i tabela konverzionih kodova<sup>5</sup>.

Po završenoj operaciji konverzije vektorskog sloja u rasterski, na raspolaganju informatičkom modelu stoje oba sloja, zajedno sa konverzionom tabelom. Rasterski sloj će se koristiti u prostornim analizama tečenja vode po terenu, dok će se vektorski koristiti za numerička izračunavanja, kao na primer dužine cevi, rastojanja od cevi kao i pri određivanju oblika podslivova u odnosu na cev. Na taj način se kombinuju tačnost vektorskih sistema sa efikasnošću rasterskih.

## 3.2 Kreiranje digitalnog modela terena

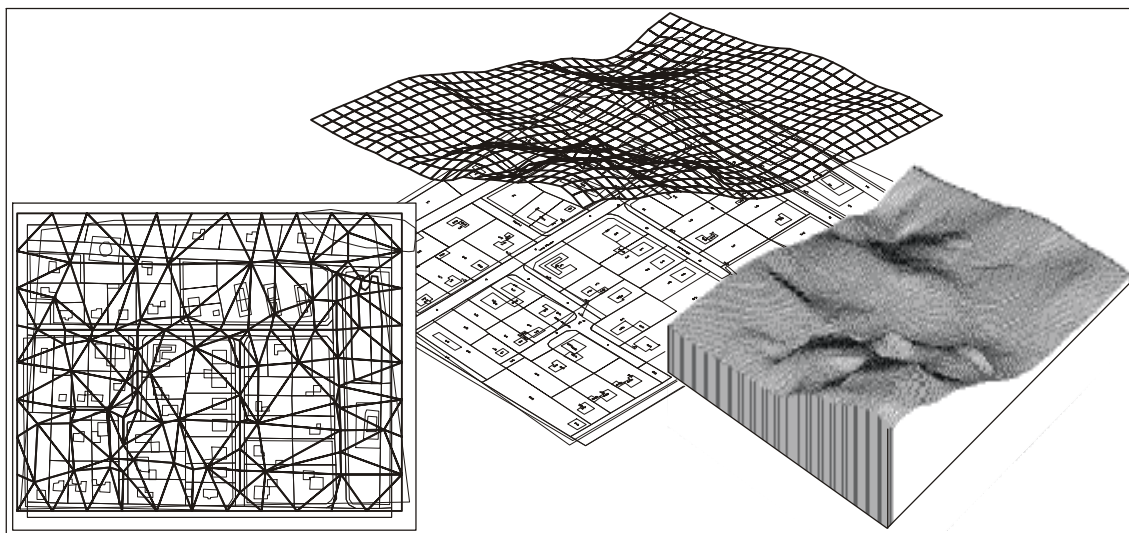
Digitalni Model Terena (DMT) je numeričko predstavljanje kontinualno promenljive visine terena, izražene u relativnim ili apsolutnim kotama. DMT se kreira kroz postupak prostorne interpolacije, kojom se visina bilo koje tačke u prostoru računa na osnovu poznatih visina okolnih tačaka. Postupak interpolacije nije isključivo vezan za visine terena, moguće ga je sprovesti i za bilo koju drugu veličinu promenljivu u prostoru: nivo podzemne vode, koncentraciju ugljen-monoksida u vazduhu ili procenat neobrazovanih stanovnika na zemlji.<sup>6</sup>

Prva i osnovna primena DMT-a je čuvanje visinskih podataka u digitalnim topografskim bazama podataka. Korišćenjem DMT-a problemi usecanja i nasipanja terena pri projektovanju puteva se lako rešavaju, vojni stručnjaci koriste DMT u automatskim sistemima za navođenje raketa, u radio i TV difuziji DMT se koristi za određivanje lokacija predajnika, arhitekta analiziraju vidljivost određenih područja a, verovatno najčešće, DMT se koristi kao podloga za prikaz drugih prostornih podataka. Na osnovu DMT-a dobijaju se neophodni ulazni podaci za razne simulacione modele, bilo kao visine terena ili kao osnova za dobijanje drugih veličina (kao što su nagibi terena, pravci nagiba, moguća erozija, itd): analiza bilansa vode u hidrologiji, kretanje vazdušnih masa za potrebe meteorološke prognoze, za modele vodovodnih i kanalizacionih sistema, itd. U ovom radu, DMT je jedan od osnovnih ulaznih slojeva za model OUP. Na osnovu DMT-a, kreiraju se izvedeni slojevi neophodni modelu OUP-a, vrši se provera podataka o kanalizacionoj mreži (slika 3.5), analiziraju se uslovi tečenja po površini i određuju zone plavljenja. Po završenoj analizi kanalizacione mreže, koristeći DMT obračunavaju se potrebne kubature za iskop kao i za nasipanje šljunka.

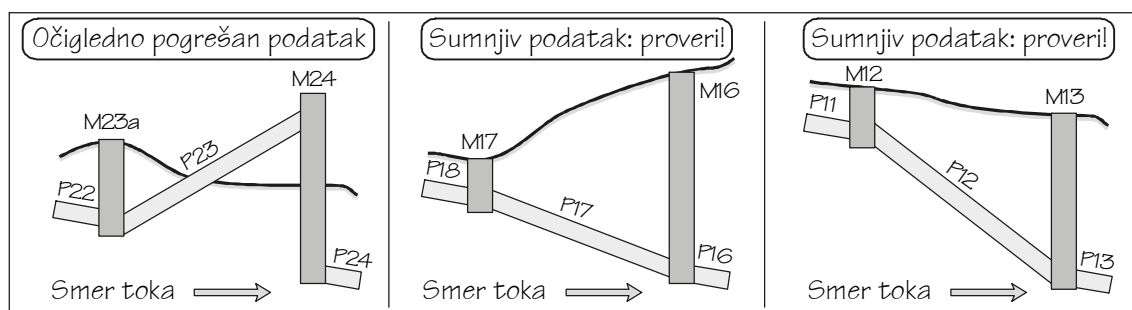
---

<sup>5</sup>Na engleskom jeziku *lookup table* ili *network translation table NTT* [68].

<sup>6</sup>U engleskoj literaturi se za DMT koristi skraćunica DEM - Digital Elevation Model (digitalni model visina) jer, uopšteno gledajući, DMT može predstavljati model bilo koje veličine koja se vezuje uz teren: površinska poroznost, intenzitet evaporacije i slično. U ovom radu se DMT koristi isključivo za digitalni model visina terena.



Slika 3.4: DMT prikazan (sa leva na desno) mrežom nepravilnih trouglova (TIN), grubom mrežom pravilnih kvadrata (grid) u okviru standardnog CAD okruženja i finom mrežom pravilnih kvadrata u GIS okruženju



Slika 3.5: Podužni presek kroz kanalizacionu cev – slučajevi kada DMT može pomoći u proveri ulaznih podataka: pogrešan podatak o visini u čvoru (šahtu) M24 (levo); nagib cevi na suprotnu stranu od nagiba terena (sredina); nagib cevi znatno veći od nagiba terena (desno)

U nastavku će se dati prikaz metoda interpolacije prostora, uz objašnjenje dve najpopularnije metode: mreže pravilnih kvadrata - grid<sup>7</sup> i mreže nepravilnih trouglova - TIN<sup>8</sup>, kao i njihovu upotrebljivost u oblasti OUP-a, koji su izvori podataka dostupni projektima OUP-a, njihov kvalitet i potrebna kontrola kao i uobičajeni načini prikaza DMT. Takođe, pokazaće se, koji se sve slojevi potrebni modelima OUP-a mogu direktno izvesti na osnovu kreiranog DMT.

<sup>7</sup> Grid - prevod sa engleskog: mreža horizontalnih i vertikalnih linija sa istim rastojanjem, koja se koristi na papirnim kartama.

<sup>8</sup> TIN - *Triangular Irregular Network* - prevod sa engleskog: mreža nepravilnih trouglova.

### 3.2.1 Metode interpolacije prostora

Sve metode modelovanja promene visine terena u prostoru se mogu podeliti u dve najšire grupe: metode koje koriste matematičke (analitičke) funkcije i metode zasnovane na slici, odnosno metode koje koriste linije ili tačke za opis terena.

**Matematičke metode** za modelovanje pokušavaju da površinu terena predstavie određenom formulom. Ukoliko se koristi samo jedna formula za celokupnu površinu, radi se o globalnim metodama koje se zasnivaju na Fourier-ovim serijama ili na multidimenzionalnim polinomima (prostorni spline-ovi itd.).

Nasuprot globalnim metodama, razvijene su lokalne metode, koje prvo podele površinu terena na pravilne ili nepravilne manje površine, a zatim modeluju svaku od tih manjih površina odvojenim formulama, uz obezbeđenje uslova međusobnog "glatkog" spajanja.

U fazi ubrzanog razvoja su i metode bazirane na teoriji fraktala. Osnovna ideja je da geografski objekti imaju slične osobine bez obzira na razmeru. Promene oblika reljefa na dužini od nekoliko metara, na primer, imaju iste statističke pokazatelje kao reljef na dužini od nekoliko kilometara, kada se transformiše parametrima za skaliranje.

Matematičke metode se često koriste u analizi statističkih površi. Njihova upotreba u modelovanju terena je ograničena na usko specijalizovane oblasti i praktično nisu upotrebljive u projektima odvodnjavanja urbanih površina.

**Linijske metode** spadaju u metode koje slikom (a ne matematičkom jednačinom) modeluju površinu terena. Linijom se predstavljaju visine terena, pri čemu je najčešće u upotrebi model sa izohipsama (konturnim linijama), kod koga jedna linija predstavlja konstantnu  $Z$  koordinatu (kotu). Ukoliko su linije sa konstantnim  $X$  ili  $Y$  koordinatama, tada se prikazuju vertikalni preseki terena, profili. Takođe, linijama se prikazuju i nagli prelomi u visini terena (linije prekida).

Izohipse se gotovo isključivo koriste za prikaz visine terena na papirnim kartama. Većina projekata OUP-a počinje sa digitalizacijom izohipsi. Izohipse su, međutim, loš izvor podataka o visini terena, pa je ovako kreiran DMT najčešće neupotrebljiv za dalje analize, već se može koristiti samo za vizualizaciju.

**Metode tačaka** takođe spadaju u metode koje slikom modeluju površinu terena. Svakoj unetoj tački u  $[X,Y]$  ravni se pridružuje odgovarajuća  $Z$  koordinata (kota, odnosno visina terena). U zavisnosti od načina unosa podataka, tačke sa  $Z$  koordinatom mogu biti pravilno ili nepravilno raspoređene, sa uniformnom ili neuniformnom gustinom. Duž preloma terena, kao i duž značajnijih objekata na terenu, mreža tačaka se često dodatno proglašćava.

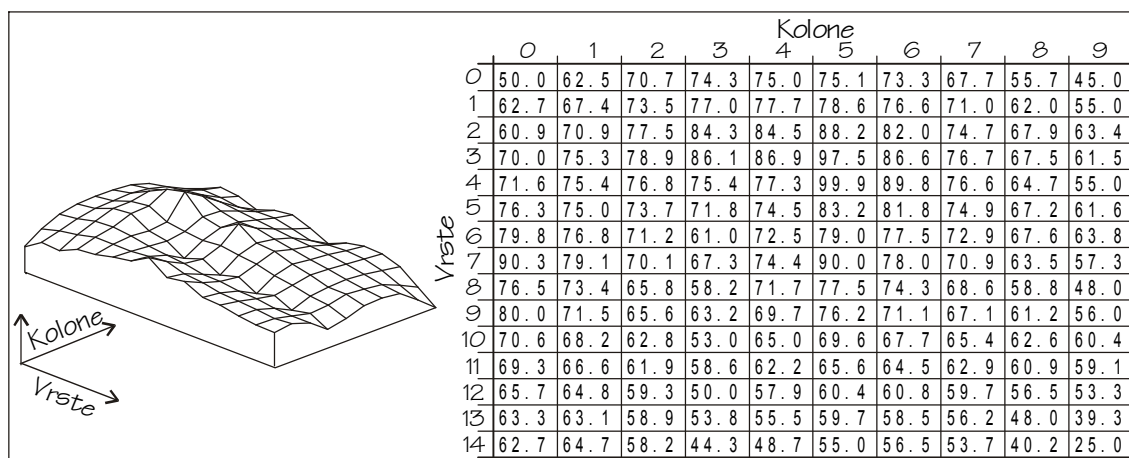


Dva najčešća modela bazirana na tačkama su model sa mrežom pravilnih kvadrata (grid model) i model sa mrežom nepravilnih trouglova (Triangular Irregular Network - TIN model).

Informatički model za projekte OUP, za interpolaciju prostora, koristi isključivo metodu tačaka. Pri kreiranju DMT-a koristi se TIN model, iz koga se interpolacijom formira grid model. Sve dalje analize se obavljaju u grid modelu. U nastavku se daju detaljniji prikazi interpolacije DMT-a u grid i TIN modelima.

### 3.2.1.1 DMT baziran na mreži pravilnih kvadrata - grid model

Najčešći oblik DMT-a je mreža pravilnih kvadrata (grid) u formi matrice visina. Površina terena se podeli u potreban broj kvadrata (ćelija ili piksela) i svakom kvadratu se pridruži odgovarajuća visina. Na slici 3.6 je dat primer DMT-a u tabelarnoj formi, koja se koristi u računarima.



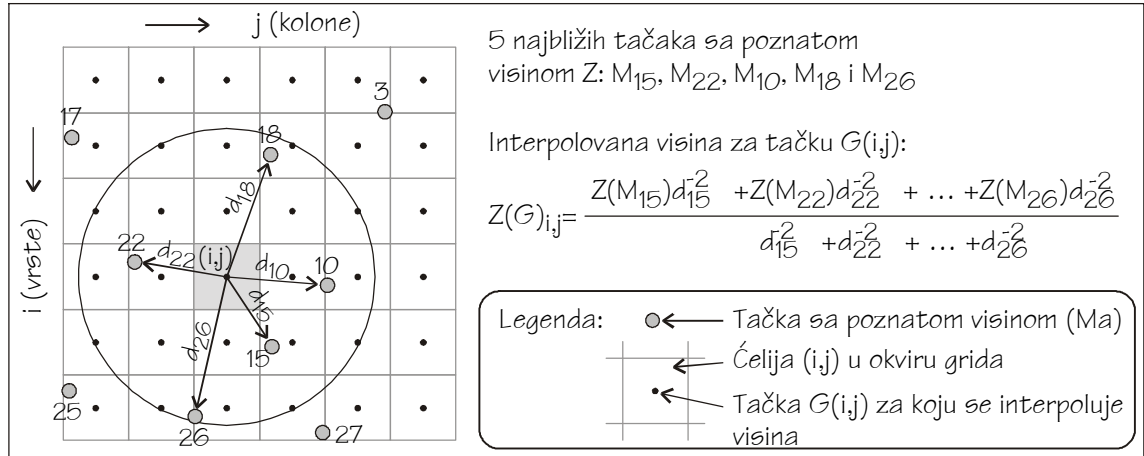
Slika 3.6: DMT baziran na mreži pravilnih kvadrata - grid model

S obzirom da računari lako rade sa matricama, često se koristi DMT baziran na grid modelu. Visine se smestaju kao kolone brojeva, zajedno sa zaglavljem koje definiše veličinu ćelije, orijentaciju glavnih  $X$  i  $Y$  osa i neophodne prateće podatke. Sve analize DMT-a koje su paralelne sa glavnim osama se svode na jednostavno preračunavanje vrste i kolona.

Najveća prednost grid modela je u njegovoj jednostavnosti i velikoj brzini rada sa podacima. Ali, pored prednosti postoje i brojni nedostaci, o kojima treba voditi računa u primeni grid DMT-a, posebno u projektima OUP-a. Zbog orijentisanosti podataka duž  $X$  i  $Y$  osa, u slojevima izvedenim na osnovu DMT-a su, često preterano, naglašeni ti pravci. Takođe, veličina ćelije se određuje unapred, prema delu terena sa najvećim promenama visine ili prema nekim drugim kriterijumima.<sup>9</sup> Tako

<sup>9</sup>Prema preporukama iz literature, veličina grida zavisi od gustine tačaka sa poznatim kotama. Po pravilu, veličina ćelije grida treba da bude od 1/2 do 1/3 srednje vrednosti rastojanja poznatih tačaka [58].

određena veličina ćelije, međutim, daje veliku redundansu u ravnim delovima terena, gde veliki broj ćelija ima skoro istu vrednost visine. Primena algoritama za kompresiju podataka kod grid DMT-a ne daju dobre rezultate, jer postoji mnogo ćelija sa skoro istom vrednošću, ali verovatno nijedan par ćelija sa potpuno istom.



Slika 3.7: Interpolacija visine u grid modelu na osnovu rasutih tačaka

Grid DMT zahteva poznavanje visine terena u tačkama sa konstantnim  $[\Delta X, \Delta Y]$ . Kako su korisniku obično na raspolaganju tačke rasute po prostoru, sa neuniformnom gustinom, neophodno je prostornom interpolacijom odrediti visine terena u tačkama grida. Sve metode prostorne interpolacije se mogu podeliti u tri osnovne grupe:

1. globalne metode, sa analizom trenda posmatrane površi,
2. lokalni interpolatori, kao što su metode zasnovane na teoriji splajnova ili na srednjoj vrednosti sa težinskim koeficijentima,
3. optimalni interpolatori koji koriste prostorne geostatističke podatke (kao na primer Kriging metoda).

Na slici 3.7 je prikazan primer interpolacije DMT-a, određivanje visine tačke  $G_{i,j}$  korišćenjem tačaka sa poznatom visinom. Jedna od najčešće korišćenih metoda interpolacije je srednja vrednost sa težinskim koeficijentom i ograničenim brojem tačaka:

$$Z(G)_{i,j} = \sum_{a=1}^N \lambda_a Z(M_a) \quad \sum_{a=1}^N \lambda_a = 1 \quad (3.1)$$

gde su težinski koeficijenti dati nekom funkcijom  $\Phi(d(G_{i,j}, M_a))$  i gde je  $d(G_{i,j}, M_a)$  rastojanje između tačaka  $G$  i  $M$ , a  $N$  je broj tačaka sa merenim (poznatim) koordinatama  $M$  koje se uzimaju u obzir prilikom interpolacije.

Uslov koji treba da ispuni izabrana težinska funkcija je  $\Phi(d) \rightarrow \infty$  za  $d \rightarrow 0$ , a to zadovoljavaju recipročne funkcije ili negativne eksponencijalne funkcije  $d^{-r}$ ,  $e^{-(\alpha d)}$

ili  $e^{-(\alpha d^2)}$ . Verovatno je najviše u upotrebi inverzna kvadratna težinska funkcija  $\Phi = d^{-2}$ , pomoću koje se može odrediti kota bilo koje tačke u gridu  $G_{i,j}$  kao:

$$Z(G)_{i,j} = \frac{\sum_{a=1}^N Z(M_a) d(G_{i,j}, M_a)^{-2}}{\sum_{a=1}^N d(G_{i,j}, M_a)^{-2}} \quad (3.2)$$

Broj tačaka  $N$ , koje se uzimaju u obzir prilikom interpolacije visine, je parametar koji korisnik sam određuje. Uobičajeno je da se ne uzima manje od 5 ni više od 10. Takođe, bolji algoritmi za interpolaciju vode računa i o tome da izabrane tačke budu što ravnomernije raspoređene po prostoru.

Da li će se za interpolaciju koristiti metoda srednjih vrednosti sa inverznim kvadratima rastojanja, neka druga težinska funkcija u metodi srednjih vrednosti, ili druga metoda, zavisi od vrste podataka koji su na raspolaganju kao i od planiranih analiza koje će se sprovesti sa DMT-om. Sa istim ulaznim podacima, dobijaju se različiti rezultati interpolacije. Na slici 3.8 je to prikazano, korišćenjem istih ulaznih podataka i četiri različita načina interpolacije.

U pravljenju test primera sa slike 3.8, korišćeno je 25 tačaka sa poznatom visinom, dijagonalno raspoređenih simetrično u odnosu na centar. Tačke predstavljaju površinu modifikovanog “kosinusnog zvona”. Interpolacija je rađena na gridu sa 65 kolona i 65 vrsta. Rezultati interpolacije su prikazani u formi izohipsi (od 0 do 2 m, sa  $\Delta Z = 0.1$  m) i u formi blokdijagrama (sa pogledom  $30^\circ$  iznad horizontalne ravni i  $Z$  koordinatom uvećanom 8 puta). Primer je tako konstruisan da jasno ukaže na razlike u metodama interpolacije (u realnim uslovima, razlike, iako postoje, su znatno manje uočljive). Korišćene metode za interpolaciju su (odozgo na dole):

1. Metoda srednjih vrednosti sa inverznim kvadratom rastojanja: uticaj pojedinih tačaka u računu srednje vrednosti visine za traženu tačku na gridu opada sa kvadratom rastojanja. To znači da je najveći uticaj bliskih tačaka, dok daleke tačke uopšte ne utiču na visinu.

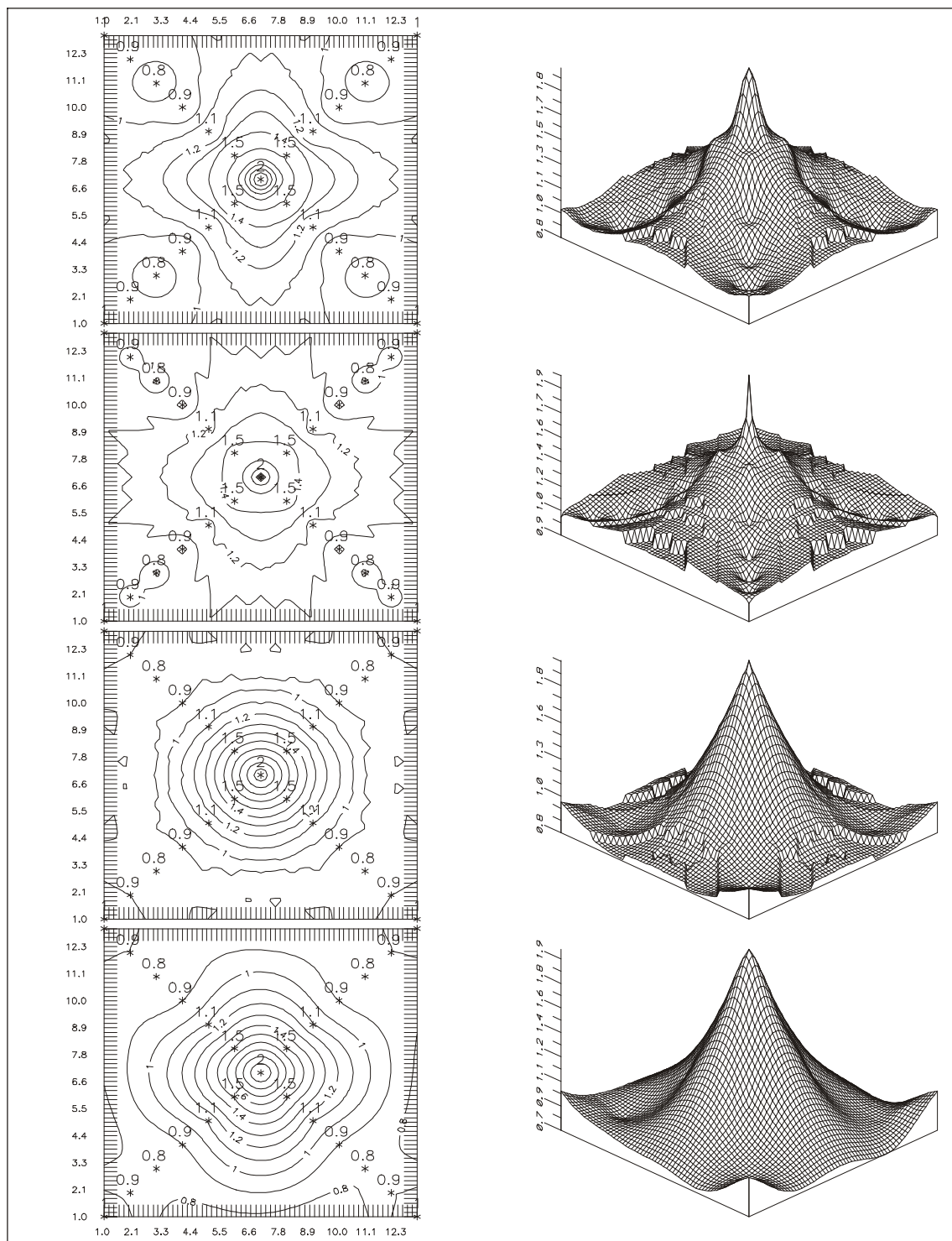
Ako se pogleda dobijeni rezultat interpolacije, može se zaključiti da je uticaj dalekih tačaka na interpolaciju još uvek prilično veliki, pa se pojavljuju nerealna udubljenja na terenu.

2. Metoda srednjih vrednosti sa inverznim linearnim rastojanjem: uticaj okolnih tačaka je srazmeran njihovom odstojanju od tražene tačke, odnosno, pretpostavlja se jača korelacija među tačkama.

Rezultat interpolacije je loš DMT sa puno preloma i nerealnih vrhova.

3. Kriging: geostatistička metoda [12, 87] koja analizira autokorelaciju između poznatih tačaka i kreira DMT sa minimalnim nepristrasnim očekivanim vrednostima<sup>10</sup>. Prema teorijskim razmatranjima, ni jedan drugi metod interpolacije ne može kreirati tačniji DMT. U praksi, kvalitet Kriginga zavisi od dobrog izbora različitih parametara, od homogenosti terena koji se interpoluje, kao i od iskustva korisnika.

<sup>10</sup>Na engleskom jeziku *minimum variance unbiased estimate*.



Slika 3.8: Rezultat prostorne interpolacija visine u grid modelu za iste ulazne podatke – 25 tačaka sa kosinusnog zvona (odozgo na dole): Metoda srednjih vrednosti sa inverznim kvadratom rastojanja; Metoda srednjih vrednosti sa inverznim linearnim rastojanjem; Kriging; Metoda minimalne zakrivljenosti. Primeri su rađeni pomoću programskog paketa Surfer [41]

Rezultat interpolacije pokazuje da je središnji vrh odveć izražen (prevelika gustina tačaka) a deo po obodu loše definisan (premala gustina tačaka). Za korektnu interpolaciju, gustina tačaka sa poznatim kotama mora biti uniformna.

4. Metoda minimalne zakrivljenosti: prvo se interpoluju tačke na gridu u blizini ulaznih podataka, a zatim se ostale tačke grida interpoluju iz uslova o minimumu zakrivljenosti dobijenog DMT-a.

Rezultat interpolacije je vizuelno najlepší, jer nema oštih preloma na terenu.

Posmatrajući rezultate test primera sa slike 3.8, mogao bi se izvući pogrešan zaključak da je četvrta metoda interpolacije najbolja. S obzirom da su zadate tačke upravo tačke sa glatke površine, ovakav rezultat je logičan. Kad bi zadate tačke, međutim, predstavljale realnu površinu terena i kad bi bile uniformno raspoređene po prostoru, dobili bi se drugačiji rezultati. Nameće se zaključak da ne postoji najbolja metoda interpolacije, već da rezultat najviše zavisi od količine i kvaliteta (prostorne raspodele i tačnosti) ulaznih podataka.

U projektima odvodnjavanja urbanih površina (OUP), DMT je potreban zbog proučavanja tečenja vode po površini terena. Veštački objekti, ulice, zgrade, zidovi, prolazi, dominiraju terenom i uglavnom određuju pravce tečenja vode. Zbog naglih visinskih promena, interpolacija zasnovana na metodi minimalne zakrivljenosti nije primenjiva. Kriging, koji treba da da najbolji DMT u prirodnim uslovima, u urbanizovanoj sredini je slabo upotrebljiv, uglavnom zbog izražene prostorne nehomogenosti urbanih terena. Sa druge strane, najčešće korišćena metoda srednjih vrednosti sa inverznim kvadratom rastojanja je sklona ka generisanju malih uzvišenja i depresija, čime može uticati na rezultate analiza tečenja po terenu.

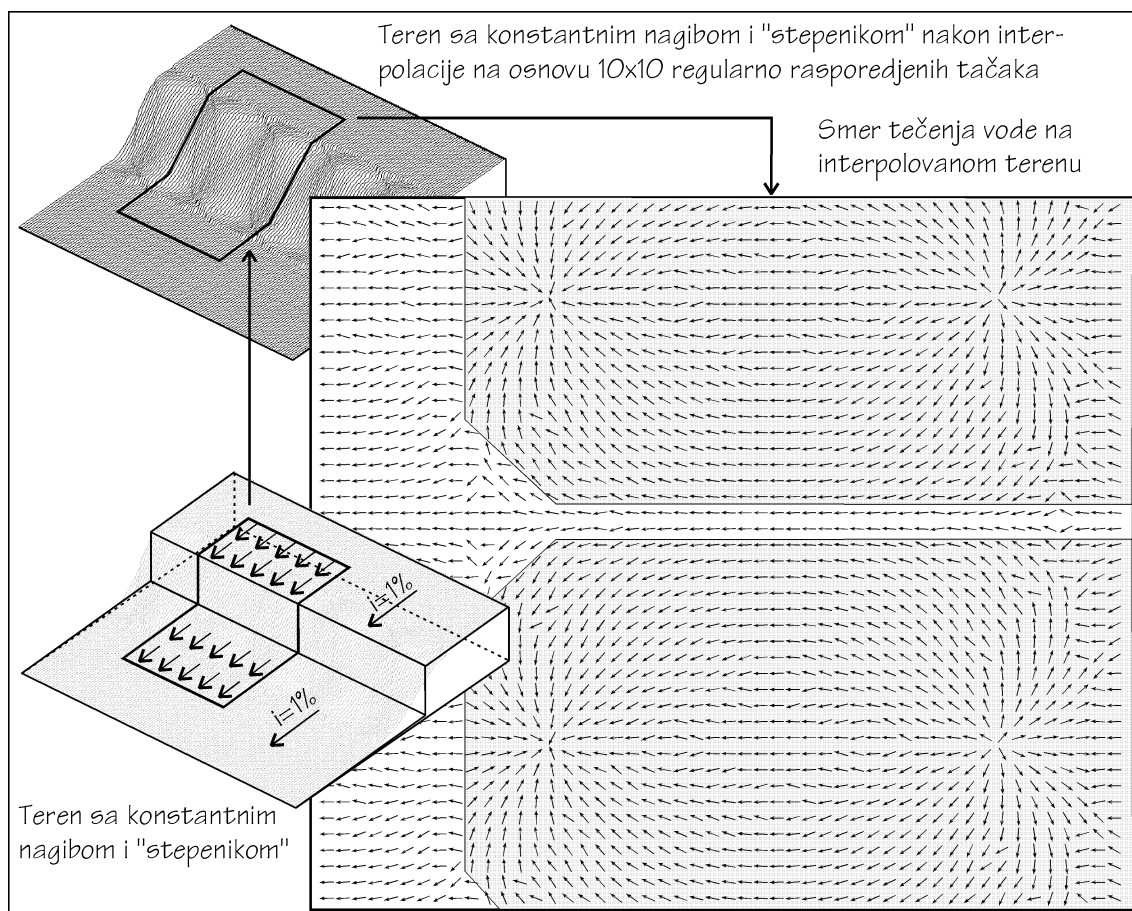
Da bi se pokazao nepovoljan uticaj koji veštački generisana mala uzvišenja i depresije mogu imati na analizu tečenja vode po površini, generisan je DMT koji se sastoji od površine sa konstantnim nagibom 1% (pravac istok-zapad), a na sredini te površine je postavljen stepenik visine 1 m. Na slici 3.9, u donjem levom uglu je prikazan takav teren, koji je iskorišćen za generisanje matrice  $10 \times 10$  tačaka. Na osnovu tih tačaka, interpolovan je DMT (gore, levo) sa 250 kolona i 250 vrsta.

Sa slike 3.9 se vidi da je interpolacijom oštar stepenik zamenjen kontinualnom glatkom površinom. Detaljnijim pregledom, može se videti da je u prelaznoj zoni generisan veći broj uzvišenja i depresija, koje potpuno menjaju sliku tečenja vode po površini (desni deo slike). Ako bi se primenio postupak automatskog određivanja slivnih površina, veštački formirane depresije bi se ponašale kao tačke koje skupljaju vodu sa celokupne uzvodne površine, smanjujući za određene ulazne kiše ukupnu efektivnu površinu sliva.

Primer sa slike 3.9 ukazuje na potrebu da se u kreiranju DMT-a uvede u upotrebu i strukturne linije<sup>11</sup>. Određivanjem granice duž koje se dozvoljava nagla promena nagiba terena, DMT može tačnije da obuhvati i veštačke objekte u urbanom slivu,

---

<sup>11</sup>Strukturna linija je linija na površini terena na mestu nagle promene nagiba.



Slika 3.9: Provera upotrebljivosti metode srednjih vrednosti sa inverznim kvadratom rastojanja u analizi tečenja vode po površini terena

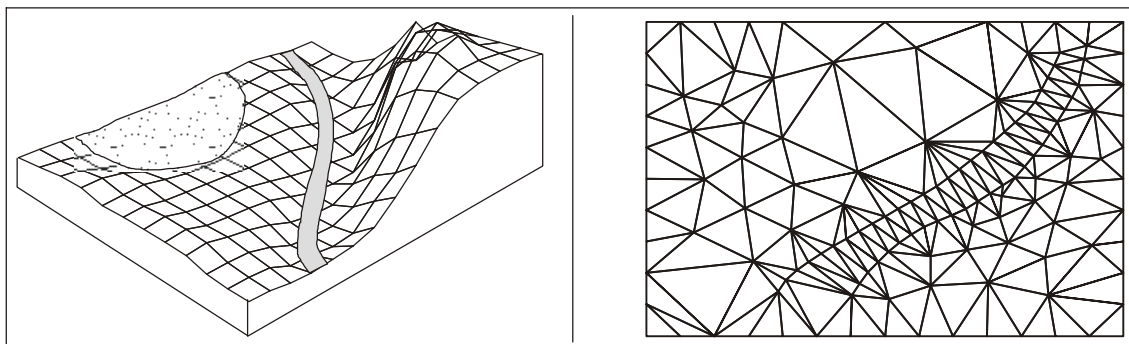
izbegavajući formiranje "lažnih" depresija i uzvišenja. Strukturne linije se najčešće koriste kod TIN modela, mada se mogu implementirati i u grid interpolaciji.

### 3.2.1.2 DMT baziran na mreži nepravilnih trouglova - TIN model

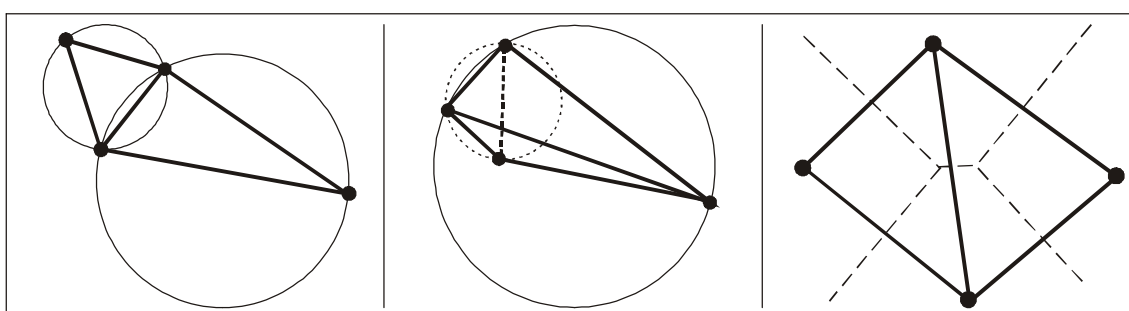
Osnova za kreiranje DMT-a su tačke sa poznatim kotama, pravilno ili nepravilno rasute po terenu. Ukoliko se polazne tačke povežu u mrežu nepravilnih trouglova (Triangular Irregular Network - TIN), dobija se kompaktna struktura za prikaz DMT-a.

Na slici 3.10 je prikazan primer terena modelovan gridom (levo) i TIN-om (desno). S obzirom da se prilikom kreiranja TIN-a koriste samo tačke sa poznatim kotama, redundansa DMT-a je znatno manja nego kod grid načina interpolacije. Da bi se verno prikazale nepravilnosti u reljefu terena, korisnik unosi gušće tačke na prelomima (put na slici 3.10), dok na mestima gde nema promena visine (jezero) reljef se opisuje sa malim brojem tačaka.

Proces kreiranja trouglova koji povezuju rasute tačke sa poznatim kotama, tako



Slika 3.10: Primer grid DMT-a (levo) i isti teren predstavljen pomoću TIN-a



Slika 3.11: Primeri triangulacije: korektna Delunay-eva triangulacija, svaki krug sadrži samo tri stranice trougla (levo); loša triangulacija, isprekidanom linijom je predstavljena korektna (sredina); Thiessen-ovi poligoni potiču od Delunay-ove triangulacije (desno)

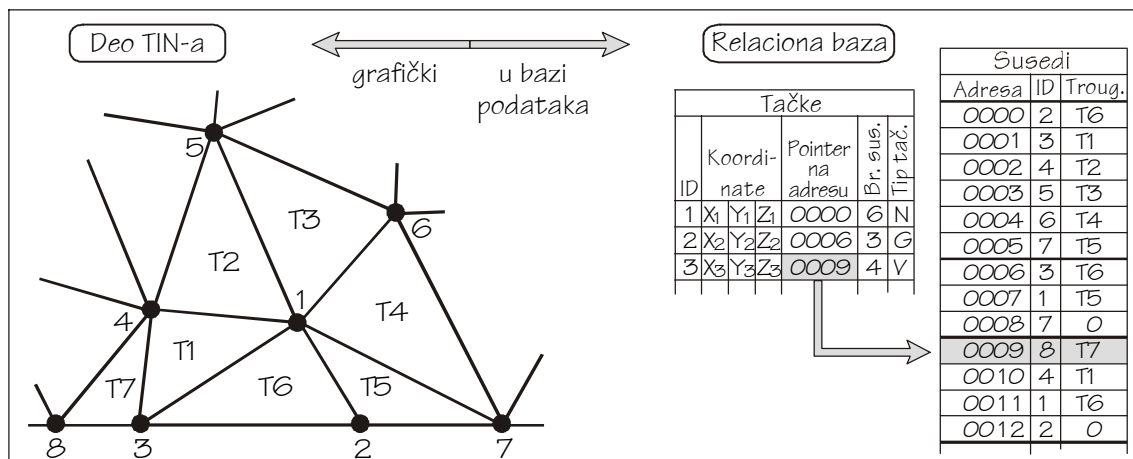
da svi trouglovi treba da zadovolje uslov da opisani krug ne sadrži druge stranice trougla, naziva se Delunay-eva<sup>12</sup> triangulacija. Na slici 3.11 levo je prikazana korektna triangulacija, dok na srednjoj slici je punom linijom prikazana loša triangulacija. Na istoj slici, desno, prikazani su isprekidanom linijom Thiessen-ovi poligoni za četiri tačke, koji se lako dobijaju nakon obavljene triangulacije.

TIN model je vektorski model sa topološki definisanim trouglovima. Topološke relacije su ugrađene u bazu podataka korišćenjem pointera (pokazivača) od svake tačke do prvog suseda. Na slici 3.12 je prikazan detalj nekoliko trouglova, duž granice DMT-a, zajedno sa odgovarajućom bazom podataka.<sup>13</sup> Prva tabela, “Tačke” sadrži identifikacioni broj svake tačke, njene koordinate, adresu te tačke u tabeli “Susedi”, ukupan broj susednih tačaka kao i tip tačke (normalna tačka, tačka na granici ili virtuelna tačka<sup>14</sup>). Druga tabela “Susedi” daje spisak susednih tačaka, orijentisanih u pozitivnom smeru, kao i spisak susednih trouglova.

<sup>12</sup>Борис Делунай, 1932, Ruska akademija nauka

<sup>13</sup>Ovde je dat samo primer na osnovu relacione baze podataka, svaki pojedini program za TIN ima svoj način čuvanja topologije trouglova.

<sup>14</sup>Virtuelna tačka je ona tačka za koju korisnik nije uneo tačnu koordinatu, već ju je sistem za generisanje TIN-a sam dodao i sam odredio visinu.



Slika 3.12: TIN struktura podataka

Pored tačaka, TIN modeli često koriste i linijske objekte (linije prekida) za definisanje mesta gde dolazi do nagle promene visine. Pomoću tačaka i linija prekida, moguće je verno predstaviti i najsloženije forme terena u urbanim uslovima.

Da bi se pokazale razlike između grid DMT-a i TIN modela, iskorišćen je isti set ulaznih podataka kao na slici 3.10 (25 tačaka sa modifikovanog kosinusnog zvana, dijagonalno raspoređenih), da se kreira TIN model. Posle kreiranja mreže trouglova, izvršena je prostorna interpolacija unutar svakog trougla, na grid veličine  $65 \times 65$ . Na taj način je formiran DMT (slika 3.13) koji se može uporediti sa modelima prikazanim na slici 3.8. Za isti TIN model, korišćene metode prostorne interpolacije unutar svakog od trouglova su (odozgo na dole):

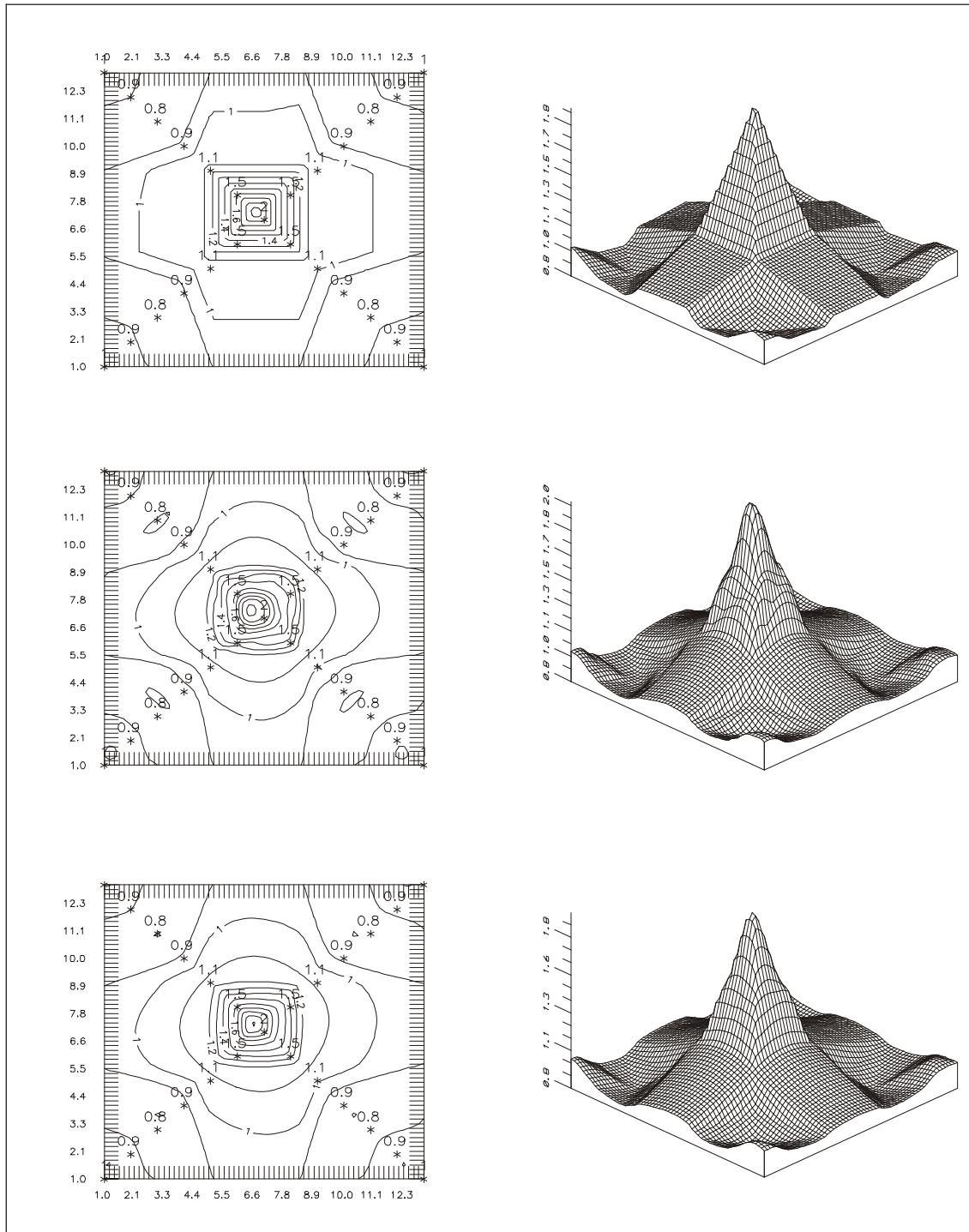
1. Linearna interpolacija: visina svake tačke unutar trougla se računa kao projekcija na ravan definisanu tačkama trougla. Rezultat interpolacije je DMT sa ostrim pregibima na granicama trouglova i sa jasno izraženom trougaonom strukturom.

Mada je vizuelno ovaj način interpolacije najlošiji, kreirani DMT sigurno neće imati veštački generisana uzvišenja i depresije. Kvalitet DMT-a zavisi isključivo od kvaliteta polaznih tačaka.

2. Splajn interpolacija: kroz tri tačke svakog trougla postavlja se površina definisana polinomom 5-og stepena sa dvadeset jednim koeficijentom, uz uslov da prelaz na susedne trouglove bude gladak. Nakon proračuna koeficijenata površine za sve trouglove, visina u bilo kojoj tački unutar trougla se dobija kao projekcija te tačke na površnu.

Zbog visokog stepena polinoma koji se koristi za opis površine trougla, postoji velika šansa da se generišu lokalni minimumi ili maksimumi unutar trougla. Da bi se dobio kvalitetan DMT, potrebno je obratiti pažnju na te ekstremume i korigovati ih drugačijom prostornom raspodelom ulaznih podataka.





Slika 3.13: Rezultat prostorne interpolacija visine u TIN modelu za iste ulazne podatke – 25 tačaka sa kosinusnog zvana (odozgo na dole): TIN sa linearnom interpolacijom unutar svakog trougla; TIN sa splajn interpolacijom; TIN sa interpolacijom površine trougla pomoću kubne površine. Primeri su rađeni pomoću programskog paketa Surfer [41]

3. Kubna interpolacija: metodologija je ista kao kod splajn interpolacije, samo što se koristi kubna površina. Metoda obezbeđuje gladak prelaz između trouglova, uz nešto manju verovatnoću generisanja lokalnih minimuma i maksimuma unutar trouglova.

Ovaj metod predstavlja kompromis između linearne interpolacije, koja isključivo zavisi od ulaznih podataka i splajn interpolacije koja pokušava da modeluje teren glatkim površinama.

### 3.2.1.3 Usvojena metodologija interpolacije DMT-a

U mnogim GIS sistemima, korisnik je ili limitiran na grid ili TIN model terena, ili mora da odluči u kom sistemu će raditi određeni posao. U informatičkom modelu koji je razvijen, pošlo se sa stanovišta da treba iskoristiti prednosti oba sistema i kombinovati ih tako da se dobije optimalno rešenje u pogledu iskorišćenja raspoloživih resursa (podataka, programskih paketa i vremena).<sup>15</sup>

Zbog male redundanse u podacima, TIN model se koristi za osnovno čuvanje DMT-a u bazi podataka. Takođe, TIN model dozvoljava jednostavno dodavanje novih tačaka i izmenu postojećih. Sa druge strane, TIN ne obezbeđuje dobru vizualizaciju površine, a prostorne analize su veoma komplikovane. Za te operacije jednostavnije je koristiti grid DMT, koji se može interpolovati direktno iz ulaznih podataka ili preko TIN-a.

Upoređujući rezultate interpolacije terena, slike 3.10 (direktna interpolacija u grid) i 3.13 (interpolacija preko TIN-a), vidi se da DMT kreiran korišćenjem TIN-a ima manje veštački generisanih uzvišenja i depresija nego grid DMT. U projektima OUP-a, DMT se koristi kao ulazni sloj za analize tečenja po površini, pa je u razvijenom informatičkom modelu, u ovoj disertaciji, usvojeno kreiranje grid DMT-a linearnom interpolacijom iz TIN-a. Na taj način se izbegavaju problemi u radu sa DMT-om, a tačnost modela zavisi isključivo od tačnosti i gustine ulaznih podataka.

Standardni algoritmi za kreiranje TIN-a ne dozvoljavaju proračun visine za tačke koje su izvan prostora definisanog kompletnim skupom poznatih tačaka [7]. Da bi se omogućila ekstrapolacija visina, u razvijenom informatičkom modelu je izmenjen standardni algoritam interpolacije dodavanjem virtuelnih tačaka po granici koja opisuje pravougaonik oko svih poznatih tačaka. Visine virtuelnih tačaka na granici se određuju metodom srednjih vrednosti sa inverznim kvadratom rastojanja.

## 3.2.2 Načini za prikaz DMT-a

Interpolovani DMT, u većini projekata OUP-a, koristi se kao ulazni sloj za proračun parametara slivnih površina kao i analizu tečenja vode po površini terena. Istovremeno, DMT ima veliki značaj u vizualizaciji terena na kome se izvodi projekat. Trodimenzionalni pogled na teren, sa mogućnošću kretanja oko terena,

---

<sup>15</sup>U prikazanim primerima u okviru ovog rada, kao programski modul za kreiranje TIN-a i za interpolaciju iz TIN-a u grid DMT, korišćen je program mr. Željka Cvijetinića [11].

omogućava projektantima bolje sagledavanje prirodnih uslova i bolje uklapanje novih sistema (delova kanalizacionog sistema, retenzionih bazena itd.).

### 3.2.2.1 Blokdijagram

Blokdijagram je najpopularniji način za prikaz prostorne promene neke veličine (ne mora da bude samo visina terena u pitanju), zbog dobre vizualizacije kao i jednostavnosti za rad na računaru. Ukoliko se kao osnova za rad koristi CAD sistem, obično se koristi žičana forma<sup>16</sup> prikaza (slika 3.4, sredina; slika 3.6, slika 3.8 i 3.13 desno), dok se kod GIS sistema obično kombinuje sa bojenjem mreže u nekoj od skala boja, od minimuma do maksimuma visine.

Za proračun blokdijagrama, potrebno je uneti tačku sa koje posmatrač gleda DMT. Takođe, u većini slučajeva treba uneti i neki faktor veštačkog razvlačenja  $Z$  kota. Algoritam za prikaz blokdijagrama automatski određuje vidljivost linija. Savremeni računari su dovoljno moćni da mogu u realnom vremenu obavljati sve ove operacije, tako da je moguće jednostavno rotiranje i uvećavanje DMT. Postoji i mogućnost kombinovanja blokdijagrama i aerosnimaka odnosno satelitskih snimaka, čime se postiže fotorealistički prikaz terena.

### 3.2.2.2 Izohipse

Izohipse (ili konturne linije) se koriste za dvodimenzionalni prikaz DMT-a (slike 3.8 i 3.13 levo). Zbog dosadašnjeg načina prikaza terena izohipsama, na papirnim kartama, projektanti su se na njih navikli i na osnovu njih lako procenjuju relativne i apsolutne visine kao i nagibe terena. Za razliku od blokdijagrama, crtanje kvalitetnih izohipsi predstavlja veće opterećenje za računar.

Izohipse su adekvatniji način prikaza terena u ruralnim uslovima. U urbanim uslovima, gde terenom dominiraju objekti, ulice, zgrade i slično, izohipse se uglavnom crtaju u zelenim površinama, dok se duž objekata ispisuju samo kote karakterističnih tačaka.

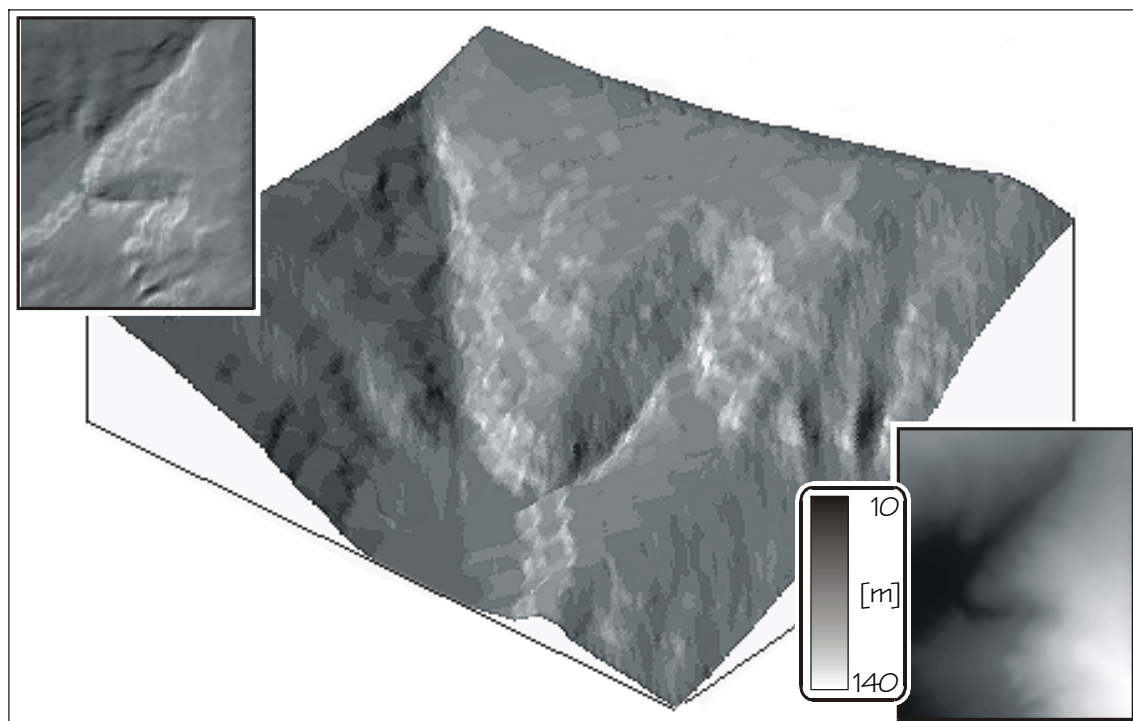
### 3.2.2.3 Karta nagiba terena

U klasičnoj kartografiji se već dugi niz godina koristi princip crtanja reljefa terena bojenjem u odnosu na visinu i na pravac nagiba terena. Takav prikaz terena daje dobar osećaj prostornosti i relativnih visina.

Ako se primeni isti princip na kompjutersko predstavljanje DMT, potrebno je prvo odrediti mogući izgled terena kad bi bio napravljen od homogenog materijala i obasjan sa izabrane lokacije suncem. Za svaki element grida, treba odrediti njegov nagib u odnosu na sunce kao i refleksiju u pravcu posmatrača. Ako postoje informacije o površinskom sloju terena (šume, reke, jezera, itd.), stepen refleksije se može

---

<sup>16</sup>Naziva se još i "ribarska mreža".



Slika 3.14: Različiti načini prikaza terena: refleksija terena za severozapadni položaj sunca i azimut od  $30^{\circ}$  (gore levo); blokdiagram sa dodatim senkama prema nagibu terena (sredina); DMT sa skalom visine u sivoj boji (dole desno)

menjati i tako dobiti još realniji prikaz terena. Tako određen stepen refleksije se koristi za promenu intenziteta svake od boja u skali koja predstavlja visinu.

Karte nagiba terena se često daju i izolinijama ili padnicama - strelicama koje označavaju smer nagiba, a svojom dužinom pokazuju iznos padnog ugla. Za digitalizovane podatke grafičku manipulaciju obavlja računar (slika 3.9).

#### 3.2.2.4 Karta moguće vidljivosti

Mogućnost određivanja međusobne vidljivosti dve tačke na terenu je važna za vojnu primenu, u komunikacijama, u projektovanju većih objekata kao i u ekološkim studijama. Određivanje međusobne vidljivosti se bazira na algoritmima praćenja linije vida. Od jedne tačke DMT-a, sa koje treba odrediti vidljivi deo terena, povlače se prave linije do svakog elementa grida. Ukoliko prava linija ne preseca ni jedan drugi element, krajnji element se označava kao vidljiv, u suprotnom je nevidljiv (sakriven). Rezultat analize vidljivosti se obično predstavlja zajedno sa blokdiagramom.

#### 3.2.2.5 Interaktivni prikaz DMT-a

Zahvaljujući sve moćnijim računarima, vreme potrebno za analize osvetljenosti i vidljivosti je svedeno na delove sekunde, čime je otvoren put ka punom inter-

aktivnom prikazu DMT-a. Korisnik se postavlja u ulogu posmatrača koji hoda duž određene putanje, a računar za svaki korak izračunava i iscrtava novu scenu. Za maksimalno zahtevne korisnike (trenažeri za pilote ili hirurge koji pripremaju specifičnu operaciju), razvijeni su sistemi bazirani na naočarima sa dva odvojena ekrana i programom koji odvojeno računa vidljivost scene za levo i za desno oko.

### 3.2.3 Unos i kontrola podataka

Da bi konstruisali (interpolovali) DMT, potrebni su podaci o visini terena u određenom broju tačaka. DMT prolazi kroz te tačke, a visine u ostalim delovima se interpoluju. Za što bolji DMT, potrebno je maksimalno smanjiti potrebu za interpolacijom, pogotovu u delovima gde dolazi do nagle promene u visini terena, kao i raspolagati sa tačkama koje dovoljno tačno predstavljaju stvarnu visinu terena. U narednih nekoliko tačaka, daće se najčešći izvori podataka za potrebe izrade DMT-a.

#### 3.2.3.1 Mogući izvori podataka za DMT - Zemljišni premer

Zemljišni premer je najstarija metoda koja podrazumeva obilazak terena, geodetski premer i kartiranje u specificiranoj razmeri. Koristi se za dobijanje podataka u krupnoj razmeri, u projektima OUP-a najčešće se snimaju koordinate šahtova, kote dna cevi, kote retenzionih bazena i značajnijih objekata. Kvalitet podataka je dobar i podaci odgovaraju trenutnom postojećem stanju. Razvojem tehnologije, klasična geodetska oprema je dobila mogućnost direktnog digitalnog zapisa izmerenih vrednosti, kao i jednostavnije pozicioniranje u prostoru preko sistema GPS.<sup>17</sup>

#### 3.2.3.2 Mogući izvori podataka za DMT - Stereo aerofotografija

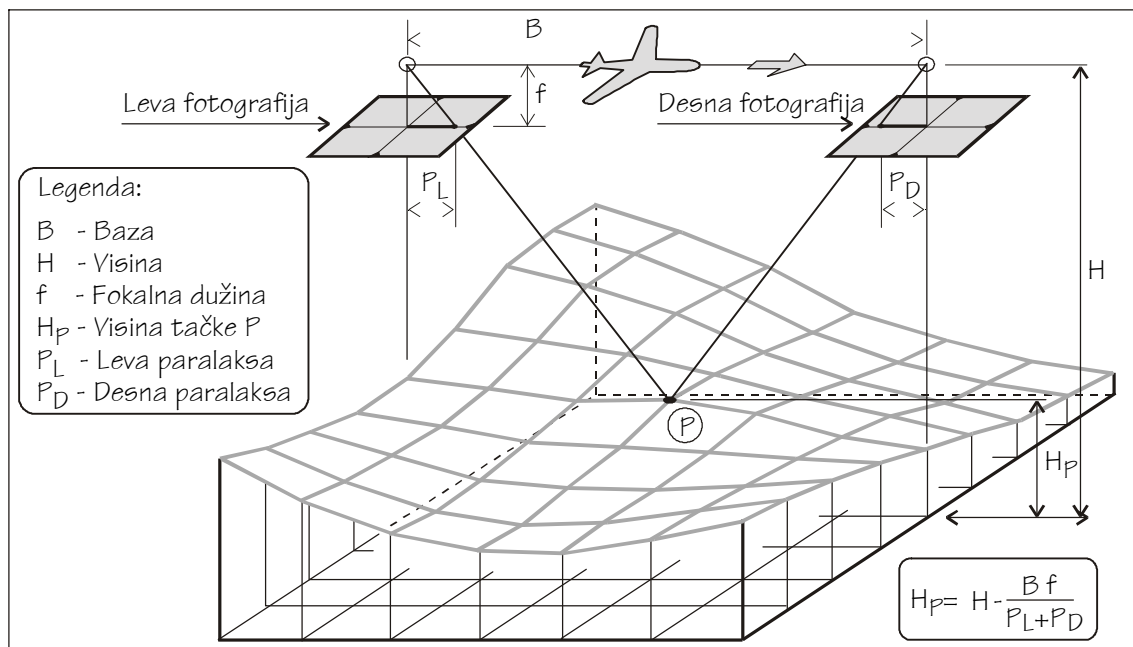
Stereo aerofotografija je metoda za brzo prikupljanje velikih količina kvalitetnih podataka. Zbog visoke cene organizacije merenja, ova metoda se obično koristi na državnom nivou.

Na slici 3.15 je prikazan osnovni princip merenja koordinata tački na terenu. Iz aviona, koji leti na fiksnoj i poznatoj visini, snima se veliki broj fotografija terena. Dve uzastopne fotografije snimaju minimum 60% iste površine (isti deo terena se snima iz dve različite pozicije). Koristeći specijalne fotogrametrijske instrumente (analogni ploter ili analitički stereo ploter), kreira se stereo slika terena. Operator, u procesu koji se zove fotorestitucija, na uređaju prikuplja podatke o terenu tako što "vodi" marker po površini slike terena i očitava  $X$ ,  $Y$  i  $Z$  koordinate.

Postoji nekoliko načina prikupljanja podataka sa stereo fotografije: *selektivno uzorkovanje* je način kada operater unapred markira tačke koje očitava; *adaptivno*

---

<sup>17</sup>GPS - Global Positioning System: sistem za određivanje sve tri koordinate u prostoru, korišćenjem mreže satelita. Jednostavni GPS uređaji omogućuju određivanje koordinata sa metarskom tačnošću, dok diferencijalni sistemi omogućavaju centimetarsku tačnost.

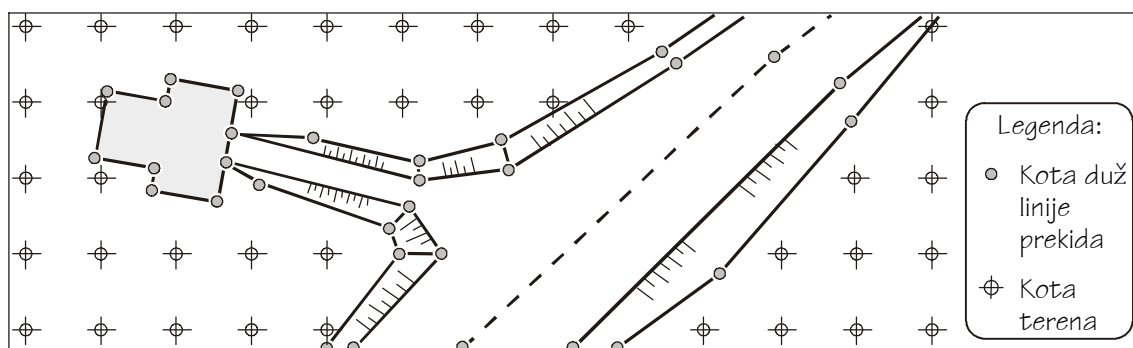


Slika 3.15: Osnovni princip stereo aerofotogrametrije: proračun visine tačke P na osnovu dve fotografije snimljene iz različitih uglova

*uzorkovanje* je kada operater sam izbacuje redundantne podatke; *progresivno uzorkovanje* je metod u kome se u toku skidanja podataka odmah vrši i obrada, na osnovu koje operater odlučuje koliko još tačaka treba da očita.

Samo uzorkovanje za DMT može biti ručno (operater sam vodi marker po slici terena i očitava koordinate), poluautomatsko (operater vodi markicu a uređaj određuje koordinate) i automatsko (najbrže, ali još uvek zahteva kontrolu operatera). Uzorkovanje može biti obavljeno na više načina: prateći izohipse, prateći morfološke linije, u pravilnom ili nepravilnom gridu (slika 3.16).

Tačnost podataka zavisi od visine na kojoj leti avion kao i fokalne dužine aparata. Po pravilu, podatak o visini je sa tačnošću 1/10000 od visine aviona, sa 60% preklapanja fotografije i fokalnom dužinom kamere od 152 mm. Vremenski, podaci su



Slika 3.16: Tipičan način skidanja podataka visine terena sa stereo aerofotografija

obično stari 1 do 2 godine (a često i više).

Posao premera terena stereo aerofotografijom je uglavnom u domenu državne geodetske službe. Za potrebe projekata OUP, podaci dobijeni ovom metodom mogu biti od velikog značaja, ukoliko već postoje i ukoliko mogu da se dobiju na upotrebu. Iskustvo stečeno izradom nekoliko projekata kanalizacija u našoj zemlji, međutim, pokazuje da iako fotografije postoje, često nisu obrađene na način pogodan za projekte OUP-a, a i oni podaci koji postoje ne mogu da se dobiju, ili fotografije postoje ali nisu rektifikovane i obrađene. Cena dodatne obrade fotografija je, uglavnom, toliko velika da standardni projekti OUP u domaćim uslovima to ne mogu da podmire (kao na primer u projektu rekonstrukcije kanalizacije Kumodraškog sliva, opisanog na strani 173).

### 3.2.3.3 Mogući izvori podataka za DMT - Satelitski stereosnimak

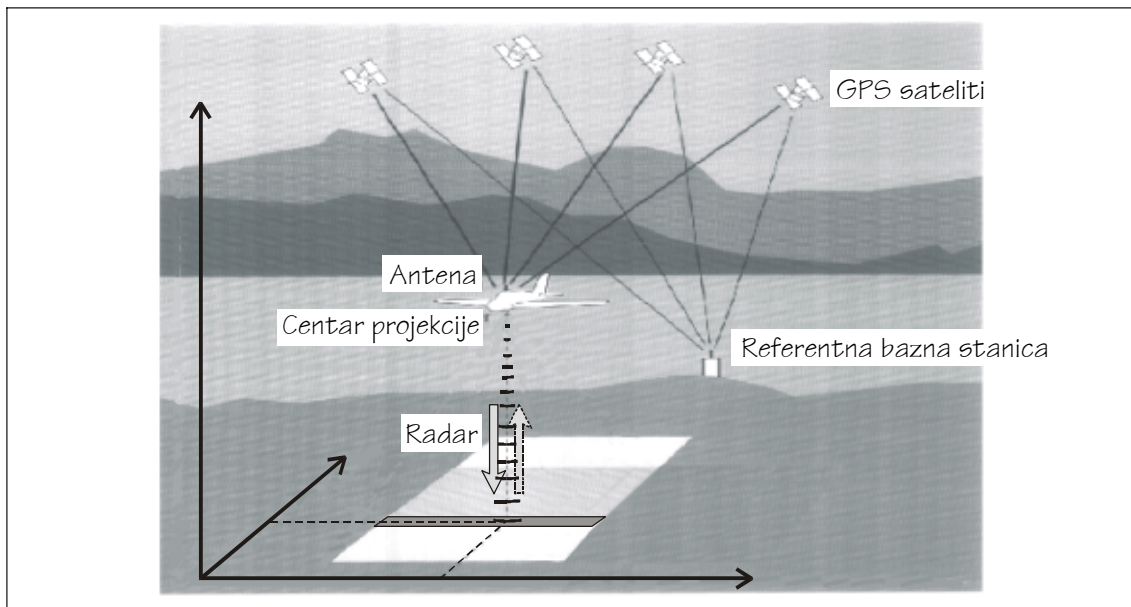
Satelitski stereosnimak je metoda slična stereo aerofotografiji: neki sateliti imaju fiksne kamere a promenom svog nagiba dobijaju stereosnimak istog terena (misija SPOT), dok drugi sateliti su fiksni ali imaju kompjutersko pomeranje paralaksi tačaka. Nakon korekcija i kompleksnih obrada (u koje spada i uvezivanje snimaka u državni koordinatni sistem), moguće je dobiti podatke o visini terena.

Današni najsavremeniji civilni sateliti obezbeđuju horizontalnu rezoluciju u klasi 1 do 2 metra. Obradom takvih snimaka, moguće je dobiti podatke o visini terena sa tačnošću od 10-tak metara. Takvi podaci o DMT-u su praktično neupotrebljivi za projekte OUP-a. Sa druge strane, ovo je izuzetno efikasan način za dobijanje podataka za globalne hidrološke analize kao i za analize na velikim ruralnim slivovima.

### 3.2.3.4 Mogući izvori podataka za DMT - Radarsko aerosnimanje sa malih visina

Radarsko aerosnimanje sa malih visina je nova metoda, bazirana na direktnom radarskom merenju udaljenosti od aviona do terena, uz istovremeno kontinualno praćenje sve tri koordinate aviona uz pomoć GPS uređaja. Na osnovu vremena putovanja radarskog odraza, meri se udaljenost od zemlje, čime se dobija reljef terena. Dodatnim procesiranjem, automatskom spektralnom klasifikacijom, dobijaju se i kvalitetni podaci o nameni površine terena.

Tačnost podataka o visini, kao i rezolucija u prostoru je izuzetno dobra i reda je veličine centimetra. Ova metoda daje brzo (nije potrebna posebna naknadna obrada podataka) veoma kvalitetne podatke za projekte OUP. Za sada se još uvek radi na uhodavanju sistema, ali kada postane šire rasprostranjena, u bliskoj budućnosti, verovatno će postati jedan od standardnih načina za prikupljanje podataka o visini terena [60].



Slika 3.17: Radarsko aerosnimanje sa malih visina - princip rada

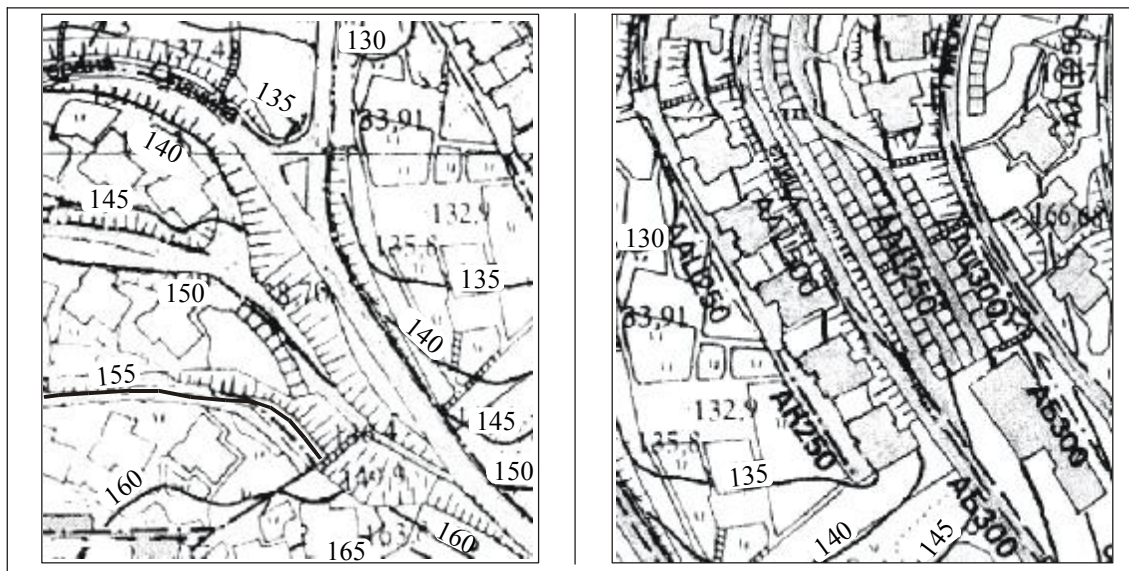
### 3.2.3.5 Mogući izvori podataka za DMT - Izohipse i tačke sa topografskih karti

Izohipse i tačke sa topografskih karti su najčešći, ali na žalost i najlošiji izvor podataka u projektima OUP-a. Većina projekata kreće sa skeniranjem starih papirnih karata i ručnim očitavanjem kota kanalizacione mreže, dok se u kvalitetnije izvedenim projektima izvrši digitalizacija izohipsa i pojedinih tačaka sa poznatim kotama uz kreiranje DMT-a.

Korisnici bez iskustva u poslovima kreiranja DMT-a obično nisu zadovoljni dobijenim rezultatima. Razlog za to je prenaplašen uticaj izohipsi na konačni model terena, zbog prevelike gustine tačaka duž tih linija a nepostojanja informacija o terenu između njih. Takođe, uz digitalizaciju izohipsa se vezuje i problem generalizacije sadržaja papirnih karti (u toku pripreme papirne karte za produkciju, neophodno je uopštiti sve informacije i klasifikovati ih prema određenim podelama; usled tog procesa, kvalitet informacija na papirnim kartama je uvek niži nego originalne informacije), problem distorzije (papirne karte se vremenom, zbog sušenja papira, izobličavaju i to, po pravilu, nejednako u podužnom i poprečnom pravcu) kao i velika starost papirnih karti.

Za urbanizovane delove terena, projektantima uglavnom stoje na raspolaganju papirne karte sa izohipsama snimljenim pre dvadeset do trideset godina i na kojima su naknadno ucrtani objekti sa tek po nekom karakterističnom kotom. U uslovima gde je prirodni reljef potpuno izmenjen objektima (putevi, kuće, parkinzi, itd.), digitalizacija "starih" izohipsi vodi u kreiranje DMT-a koji može biti potpuno neupotrebljiv. Za dobijanje upotrebljivog DMT-a neophodno je određeno iskustvo (slika 3.18), a često i dodavanje pojedinih kota kojih nema na originalnoj karti [58].





Slika 3.18: Deo skenirane karte naselja Miljakovac II, Beograd: kako digitalizovati izohipse kada se visina terena naglo menja (levo) i kako pratiti izohipse sa visinama 135 m, 140 m i 145 m (desno)

### 3.2.3.6 Mogući izvori podataka za DMT - Digitalne baze podataka

Digitalne baze podataka u razvijenim i uređenim delovima sveta polako ulaze u standardnu upotrebu. Ideja je da se na nacionalnom nivou određene službe brinu o postojanju svih potrebnih podataka u digitalnom i struktuiranom obliku, a da se za potrebe projekata OUP kupuju potrebni slojevi podataka.

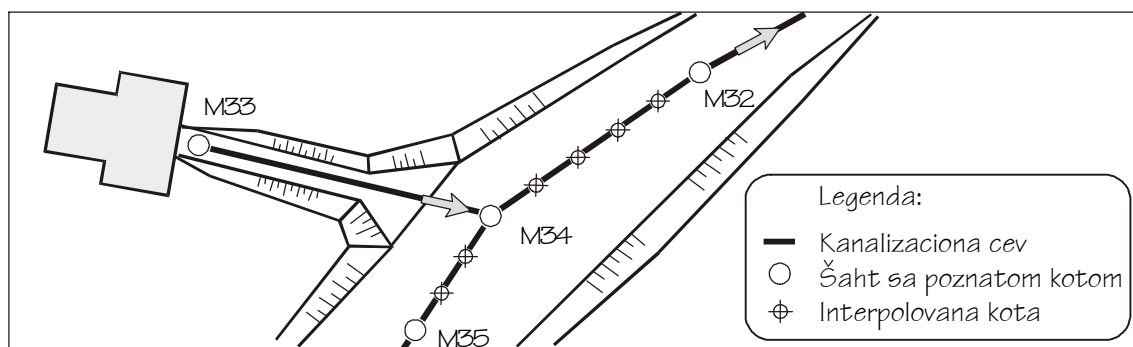
Naravno, preduslov za jednostavno korišćenje ovakvih baza podataka je da one postoje, da imaju sve neophodne podatke u nekoj od standardnih formi i da su dostupne projektantskim firmama. U našoj zemlji se krenulo putem formiranja takvih baza, ali je zbog izuzetno visokih troškova formiranja baza i unosa podataka to još uvek u povoju.

Čest je slučaj da investitor raspolaže nekim podacima u digitalnoj formi. Ukoliko ti podaci nisu struktuirani i ukoliko nisu povezani grafički elementi sa odgovarajućim atributima u nekoj od standardnih baza podataka, njihovo korišćenje može biti mukotrpnije od kompletnog unosa novih podataka. Takođe, najčešće su ti podaci bez pratećih metapodataka, sumnjivog kvaliteta, dobijeni skeniranjem ili digitalizacijom starih papirnih karti.

### 3.2.3.7 Realni izvori podataka za DMT u okviru projekta OUP

Pregledom raspoloživih tehnika unosa podataka o visinama, može se zaključiti da bi, za projekte OUP, najbolje bilo imati pristup nacionalnoj digitalnoj bazi podataka. Naša realnost je, međutim, sledeća: papirne podloge razmere 1:5000 (ili retko kada 1:2500) sa sadržajem starim više od 10 godina, podaci o kotama cevi se

uglavnom mogu naći u papirnoj formi, ali najčešće nedostaju podaci o koti terena (šahta), i postoje aerofotogrametrijski snimci (stari do par godina) koji su, ili nedostupni, ili dostupni ali neobrađeni. U ovakvoj situaciji, u zavisnosti od raspoloživog budžeta projekta kao i vremena za njegovu izradu, pristupa se premeru barem postojeće kanalizacione mreže i odabranih mikrolokacija uz pažljivo korišćenje papirnih karti i izohipsa.



Slika 3.19: Kada se ne raspoložuje sa dovoljno podataka o visini terena za kreiranje DMT, a postoje podaci o kotama šahtova i o ulicama, može se izvršiti linearna interpolacija visina duž kolektora, uz uslov da uzvodni i nizvodni šaht leže na istoj ulici

Na slici 3.19 je prikazan jedan od načina kako se može generisati pouzdaniji DMT u urbanim uslovima. Ukoliko se raspoložuje sa snimljenim kotama šahtova, kao jedinim izvorom podataka o visinama terena, broj raspoloživih tačaka neće garantovati kvalitetan DMT, pogotovu sa stanovišta određivanja hidroloških parametara. Da bi se obezbedilo da ulice imaju određeni uticaj na pravce površinskog tečenja, može se izvršiti linearna interpolacija visina terena duž ulica.<sup>18</sup> Iz baze podataka se selektuju svi uzvodni/nizvodni šahtovi koji pripadaju jednoj ulici (na slici M36/M34, M34/M32), pa se sa zadatim korakom, generišu linearnom interpolacijom nove tačke.<sup>19</sup> Moguće je dodati i uslov o širini ulice, pa generisati još i tačke na bankinama ulica.

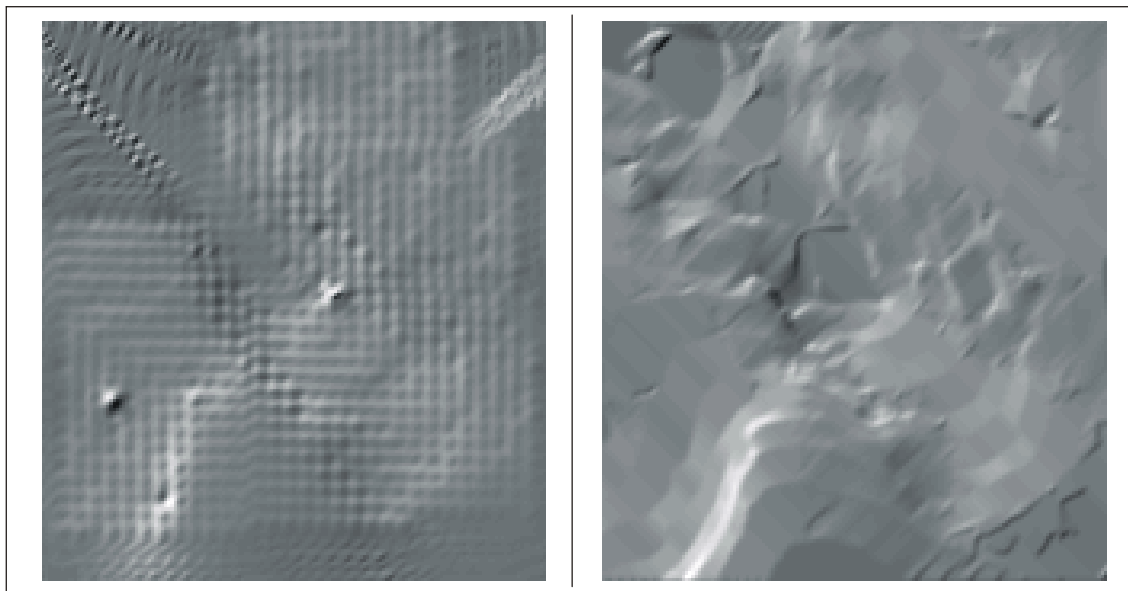
Uz problem nedostatka kvalitetnih podataka, direktno je povezan i problem uklapanja podataka iz različitih izvora. Često se DMT kreira na osnovu podataka o visinama šahtova kao i na osnovu starih izohipsi. Nije redak slučaj da se na terenu pojave razlike u visini i do 1 m za dve bliske tačke, što vodi ka nerealnim nagibima terena. Takođe, spoj dve grupe kvalitetnih podataka (na primer, rezultati premera zemljišta) može dati pogrešan DMT jer svaka grupa koristi drugi referentni geodetski sistem (povremeno dolazi do zvaničnih promena u referentnom sistemu, tako da je neophodno naknadno georeferencirati podatke iz starih koordinatnih sistema).

<sup>18</sup>Postupak linearne interpolacije duž ulica je samo gruba varijanta mnogo kvalitetnijeg postupka izrade DMT, gde se za ulice unose kao linije prekida, sa tačnim kotama duž bankina i po sredini ulice. Naravno, ovo je moguće samo ako su na raspolaganju svi ti podaci.

<sup>19</sup>Voditi računa da se linearnom interpolacijom ne dobija nova informacija o visinama terena, tako da veći broj tačaka ne znači automatski i bolji DMT!

### 3.2.3.8 Kontrola interpolovanog DMT-a

Nakon unosa podataka o visinama i njihove interpolacije, neophodno je izvršiti kontrolu kreiranog DMT-a. Standardni način kontrole DMT-a je generisanje određenog broja slučajno raspoređenih tačaka na terenu, očitavanje njihove visine sa DMT-a i upoređenje sa tačnim visinama dobijenim terenskim merenjima.

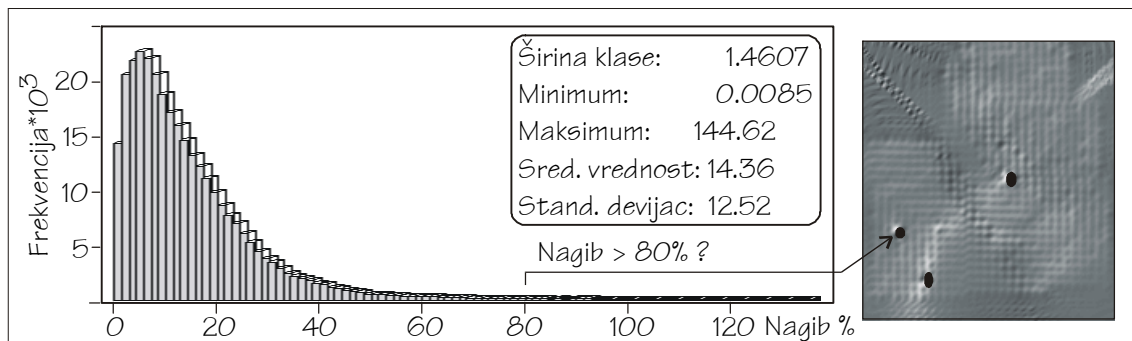


Slika 3.20: DMT naselja Miljakovac II, Beograd: DMT kreiran direktnom interpolacijom u grid - jasno se vide tačke korišćene za interpolaciju i tačke sa pogrešnim kotama (levo); DMT kreiran na osnovu izohipsa - vidi se izražen uticaj izohipsa na visine (desno)

Pored egzaktne mere tačnosti kreiranog DMT-a, potrebno je međutim, prvo obaviti vizuelnu kontrolu. Crtanjem karte refleksije svetlosti sa terena (slika 3.20), često se odmah uočavaju problematična mesta na DMT-u. Na slici 3.20 levo, jasno se uočava da je DMT pravljen direktnom interpolacijom na osnovu pravilno raspoređenih tačaka i da postoji 5 tačaka sa kotama koje verovatno nisu dobre. Pregledom ulaznih podataka, potrebno je naći i korigovati te tačke.

Na slici 3.20 desno, prikazan je isti teren modelovan korišćenjem samo izohipsa. Teren je modelovan linearnom interpolacijom visina duž pravaca maksimalnog nagiba. Sa slike se vidi da samo u severoistočnom delu terena postoji zona u kojoj treba proveriti ulazne podatke i eventualno dodati neku izohipsu.

Karta refleksije omogućava brzu vizuelnu proveru DMT-a. Ako se izračunaju nagibi terena, moguće je i numerički izvršiti proveru, s obzirom da će se u okolini tačaka sa pogrešnim kotama javiti nagibi znatno veći od prosečnih. Na slici 3.21 je prikazan histogram nagiba sračunatih na osnovu DMT-a sa slike 3.20 levo. Srednja vrednost nagiba je 14%, a vidi se da postoje delovi sa malom frekvencijom pojavljivanja ali sa nagibima i preko 100%. Na istoj slici su tamnim tačkama označene zone sa nagibom većim od 80%, kao mesta koja treba proveriti u ulaznim podacima.



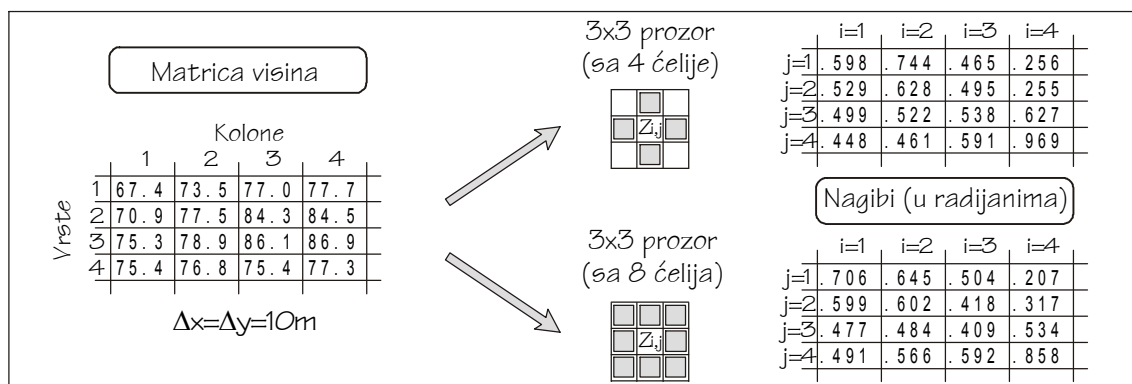
Slika 3.21: Histogram nagiba sračunatih na osnovu DMT naselja Miljakovac II, Beograd, kreiranog direktnom interpolacijom u grid

### 3.2.4 Osnovni slojevi izvedeni iz DMT-a

Kreiran i verifikovan DMT je osnova za mnoge GIS analize [9, 36]. U većini tih analiza, međutim, pored DMT-a, koristi se i sloj sa maksimalnim nagibima i pravcima tih nagiba. U nastavku će se dati način proračuna ta dva sloja, kao i kratak prikaz ostalih slojeva koji se mogu izvesti iz DMT-a, a koriste se u modelima OUP-a.

#### 3.2.4.1 Sloj maksimalnog nagiba i pravca maksimalnog nagiba

Nagib terena je prvi izvod površine koja je definisana DMT-om. Ako se u nekoj tački terena postavi ravan, tako da bude tangenta na teren, nagib terena je određen kao maksimalna vrednost promene visine, a pravac nagiba je orijentisani smer maksimalne promene visine. U nekim morfološkim analizama terena, potreban je i drugi izvod terena, konveksnost. Nagib se obično izražava u procentima ili stepenima, pravac nagiba u stepenima mereno od severa (azimut), gde je pozitivan smer određen smerom kazaljke na satu (od severa ka istoku), a konveksnost u stepenima po jedinici rastojanja.



Slika 3.22: Matrica visina (grid DMT) i “prozori” za proračun nagiba: “prozor” prvog reda (desno, gore); “prozor” drugog reda (desno dole)

Izvodi u tačkama grida se najčešće računaju lokalno, koristeći “prozor” (slika 3.22). Maksimalan nagib je definisan sa uglom prema horizontali  $G$ :

$$\tan G = \left[ \left( \frac{\partial Z}{\partial X} \right)^2 + \left( \frac{\partial Z}{\partial Y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.3)$$

gde je  $Z$  visina tačke u kojoj se računa nagib, a  $X$  i  $Y$  su koordinatne ose. Pravac maksimalnog nagiba, azimut, je:

$$\tan \mathcal{A} = \frac{-\frac{\partial Z}{\partial Y}}{\frac{\partial Z}{\partial X}} \quad (-\pi < \mathcal{A} < \pi) \quad (3.4)$$

Konveksnost (i konkavnost, tj. negativna konveksnost) se definišu na sličan način.

Proračun nagiba i pravca nagiba se može izvesti interpolacijom podataka o visinama unutar “prozora”, obično veličine  $3 \times 3$ , koristeći kvadratnu površinu. Jednostavniji i češći način je, međutim, korišćenjem konačnih razlika. Ako se koriste 4 ćelije unutar “prozora”, nagib u  $X$  pravcu, u tački  $(i, j)$  je, prema metodi centralnih razlika za aproksimaciju prvog izvoda:

$$\left[ \frac{\partial Z}{\partial X} \right]_{i,j} \approx \frac{Z_{i+1,j} - Z_{i-1,j}}{2\Delta x} \quad (3.5)$$

gde je  $\partial x$  rastojanje između centara ćelija. Vrednost ovako sračunatog nagiba je osetljiva na lokalne greške u DMT-u, pa se u ovom radu koristi metoda 2-gog reda, sa 8 ćelija unutar “prozora”:

$$\left[ \frac{\partial Z}{\partial X} \right]_{i,j} \approx \frac{[(Z_{i+1,j+1} + 2Z_{i+1,j} + Z_{i+1,j-1}) - (Z_{i-1,j+1} + 2Z_{i-1,j} + Z_{i-1,j-1})]}{8\Delta x} \quad (3.6)$$

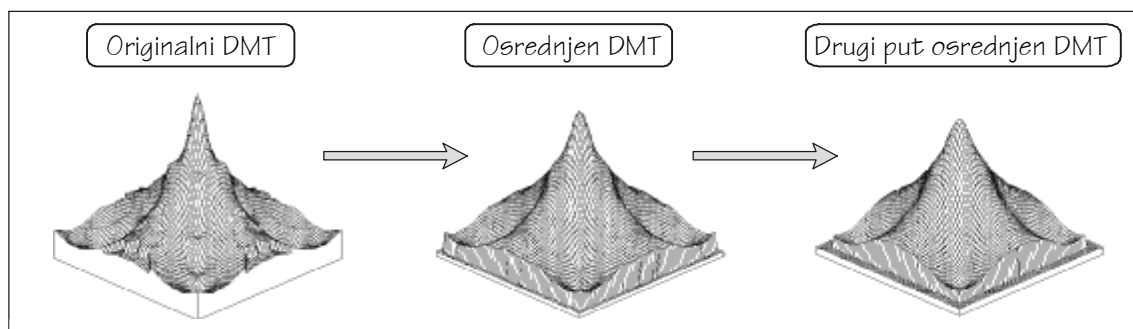
$$\left[ \frac{\partial Z}{\partial Y} \right]_{i,j} \approx \frac{[(Z_{i+1,j+1} + 2Z_{i,j+1} + Z_{i-1,j+1}) - (Z_{i+1,j-1} + 2Z_{i,j-1} + Z_{i-1,j-1})]}{8\Delta y} \quad (3.7)$$

Na slici 3.22 je dat primer proračuna nagiba, korišćenjem “prozora” veličine  $3 \times 3$ . Proračun je sproveden nad gornjim levim delom matrice visina, date na slici 3.6, koristeći 4 i 8 ćelija. Kolone broj 0 i 5, kao i vrste broj 0 i 5, nisu prikazane na slici, ali su korišćene u proračunu.

Granični problem pri proračunu nagiba (za ćelije koje su na granici DMT-a, potrebni su podaci o visinama ćelija “izvan” površine obuhvaćene DMT-om) se rešava na nekoliko načina. Najčešća pretpostavka je da su visine nedostajućih tačaka (tačaka sa druge strane granice) iste kao visina tekuće tačke. Ako treba što vernije prikazati nagibe terena, visina nedostajuće tačke se određuje iz nagiba poznatih tački. Nekada treba obezbediti da sva voda sa DMT-a sigurno napusti teren, pa se

za granične tačke uzimaju nerealno male visine (ili obrnuto, ako treba zadržati svu vodu, uzimaju se nerealno velike visine).

Izračunati nagibi se, za potrebe prikaza, najčešće reklasifikuju u određen broj intervala. Kako nagibi često variraju u širokom opsegu, najbolje je granice intervala odrediti prema srednjoj vrednosti  $\bar{G}$  i standardnoj devijaciji  $\sigma$ . Dobri rezultati se najčešće postižu sa šest klasa, sa granicama na  $\bar{G}$ ,  $\bar{G} \pm 0.6\sigma$  i  $\bar{G} \pm \sigma$  [8]. Pravci maksimalnih nagiba se reklasifikuju u 9 klasa, po jedna za svaki od 8 glavnih smerova (sever, severoistok, ..., severozapad) i jedna za horizontalan, ravan teren.



Slika 3.23: Efekat niskopropusnog filtera (osrednjavanje) na DMT – izražen vrh se smanjuje a brojna udubljenja i uzvišenja se smanjuju

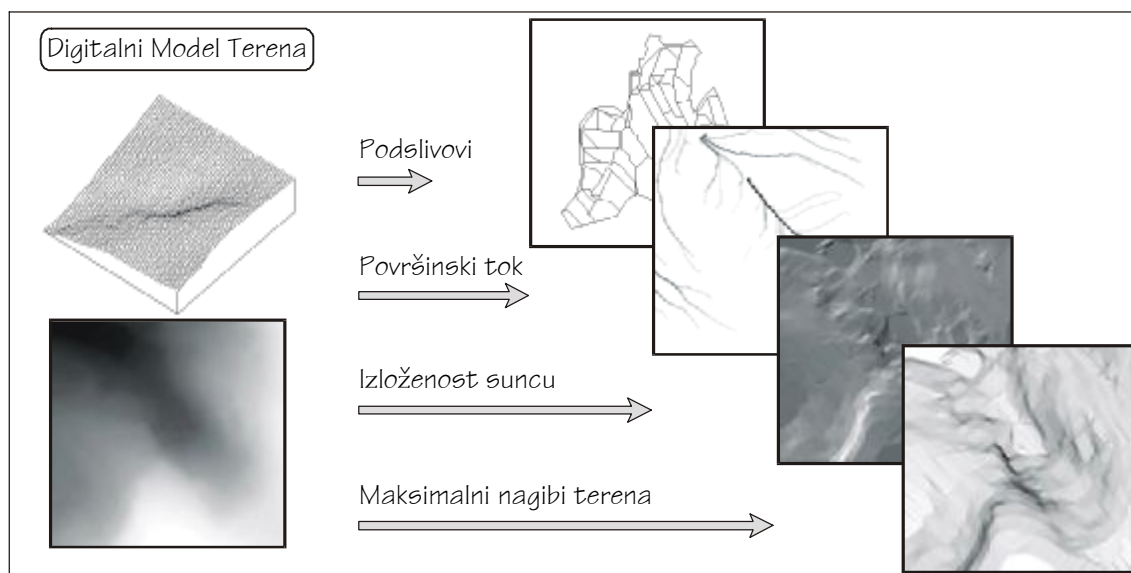
Proračun nagiba terena, odnosno proračun prvog izvoda površine, je osetljiv na lokalne greške u DMT-u. Svaka metoda interpolacije generiše određene lokalne poremećaje (primeri dati na slikama 3.8 i 3.13). Kod kvalitetno kreiranog DMT-a, kada se koristi samo za analizu visina (očitavanje kote neke tačke, proračun kubatura iskopa i slično), ti poremećaji ne utiču mnogo na rezultate. Isti DMT, međutim, po pravilu daje loše rezultate u proračunu nagiba i pravaca nagiba, jer lokalni poremećaji mogu formirati zone sa kontra nagibima u odnosu na globalni nagib terena (primer je dat na slici 3.9).

Da bi se umanjio uticaj lokalnih uzvišenja i udubljenja, ili naglih pregiba između trouglova koji se koriste u interpolaciji, neophodno je primeniti postupak osrednjavanja DMT-a (filtriranje sa niskopropusnim filterom). Na slici 3.23 je prikazan efekat osrednjavanja DMT-a kreiranog metodom srednjih vrednosti sa inverznim kvadratom rastojanja. Korišćen je filter veličine  $3 \times 3$ , gde su svi članovi matrice isti i jednaki  $1/9$ .

Rezultat jednostrukog filtriranja originalnog DMT-a je prikazan na sredini a dvostrukog na desnoj strani slike 3.23. Brojna uzvišenja i udubljenja, prisutna u polaznom (originalnom, tačnom) DMT-u su se postepeno smanjila. Njihov uticaj u rezultujućem DMT-u na proračun nagiba će biti znatno manji, čime će se omogućiti jednostavnija upotreba tih slojeva u kasnijim analizama tečenja po površini terena. Naravno, ni jednog trenutka se ne sme zaboraviti da filtrirani DMT nema korektne informacije o visinama terena, te da se sme koristiti samo za proračun nagiba.

### 3.2.4.2 Slojevi potrebni modelima OUP-a

Na osnovu sloja sa podacima o nagibima i pravcima nagiba, kao i korišćenjem originalnog DMT-a, GIS operacijama se mogu kreirati sledeće informacije neophodne modelima OUP-a: detekcija manjih i većih depresija, određivanje granica tih depresija (delineacija depresija), proračun krive zapremine kao i međusobna povezanost depresija; nakon delineacije depresija, moguće je “korigovati” DMT tako da se sve depresije “popune” (na taj način se dobija DMT sa koga će sigurno sva voda negde da otekne); detekcija prevoja kao i potencijalnih vodotokova uz njihovo povezivanje u topološki uređenu mrežu; delineacija slivnih površina (podela sliva) na podslivove koji pripadaju ili površinskoj mreži vodotova ili podzemnoj kanalizacionoj mreži, kao i ukupne slivne površine; prosečan nagib celog sliva, nagib za svaki od podslivova, izloženost podslivova suncu, kao i slojevi specifični za dvojno odvodnjavanje urbanih površina.

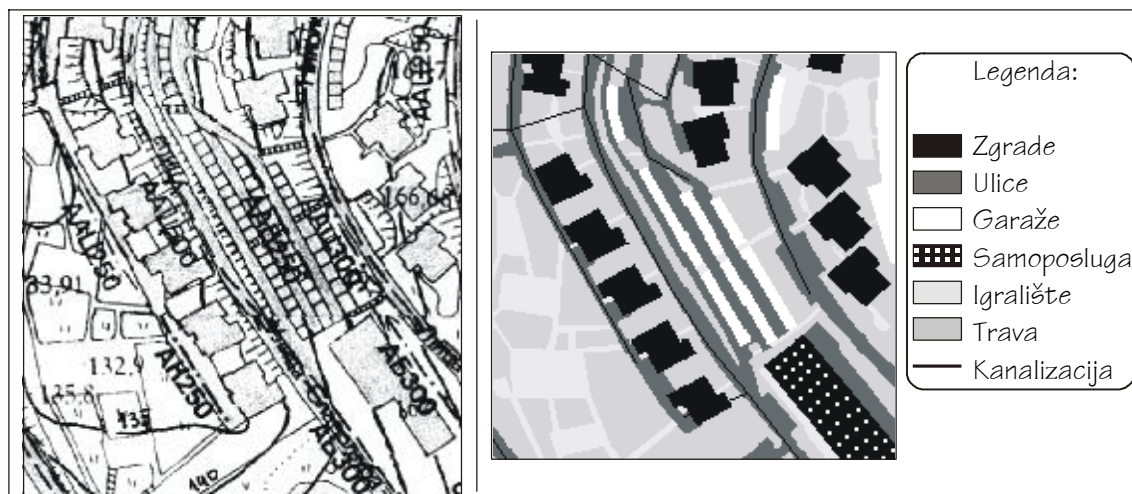


Slika 3.24: Neki slojevi bazirani na DMT-u koji se koriste u projektima OUP-a

Na slici 3.24 je prikazano svega nekoliko slojeva kreiranih na osnovu DMT-a. U sledećim poglavljima će biti detaljnije prikazani razvijeni algoritmi koji, zajedno sa nekim standardnim GIS operacijama, čine jezgro informatičkog modela za projekte OUP-a.

## 3.3 Podaci o nameni površine terena

Sloj namene površine terena je sloj u kome numerička vrednost svake tačke (u rasterskom sistemu svake ćelije, a u TIN sistemu površine svakog trougla) predstavlja jedinstven sadržaj na terenu, gledano odozgo. Ekvivalent sloju namene površina je papirna tematska karta, gde su bojama predstavljeni različiti objekti.



Slika 3.25: Skenirana papirna karta (levo) i slika sloja namene površine (desno)

U projektima OUP-a od interesa je sloj namene površina sa sadržajem na terenu klasifikovanom prema parametrima vezanim za procese odvodnjavanja. U procesu klasifikacije, bitna su dva kriterijuma: razdvojiti objekte koji značajno utiču na površinski tok vode (zidovi, ulice, zgrade, prolazi itd.) i površine koje imaju različite hidrauličke parametre vezane za površinsko tečenje (koeficijent hrapavosti, apsolutna hrapavost) i infiltraciju (koeficijent filtracije, poroznost). S obzirom da kriterijum klasifikacije zavisi od matematičkog modela OUP-a, već u fazi unošenja podataka o površini terena treba znati koji će model biti upotrebljen u projektu.

Na slici 3.25 je dat detalj skeniran sa klasične papirne karte (levo) i isti taj detalj na slici sloja namene površina (desno). U klasičnim analizama oticanja vode od kiše, korisnik pogleda papirnu kartu i sam proceni, na osnovu podataka sa karte i na osnovu iskustva, sve potrebne parametre na mestu sa koordinatom  $[X, Y]$ . U savremenom informatičkom modelu, računar koristi sliku namene površina i sa nje pročita kojoj klasi pripada površinski pokrivač na mestu  $[X, Y]$ . Koristeći redni broj klase kao indeks, iz baze podataka se dobijaju svi potrebni parametri za rad simulacionog modela. Takođe, u fazi analize tečenja po površini, konsultuje se sloj namene površina, da bi se odredio uticaj objekata na tok vode.

Sloj namene površina je bitan deo informatičkog modela u projektu OUP. U nastavku rada, posvetiće se pažnja načinima za kreiranje sloja namene površina, a zatim će se navesti mogućnosti primene tako kreiranog sloja u projektima OUP-a.

### 3.3.1 Unos i kontrola podataka

Za kvalitetno kreiranje sloja namene površine terena, potrebno je uneti puno podataka. U grafičkoj bazi treba kreirati poligone razvrstane na podslojeve, za sve veće objekte (kuće, ulice, staze, igrališta, fabrike, parkinzi, itd.), a zatim te objekte povezati sa bazom podataka gde će se uneti potrebni numerički parametri.



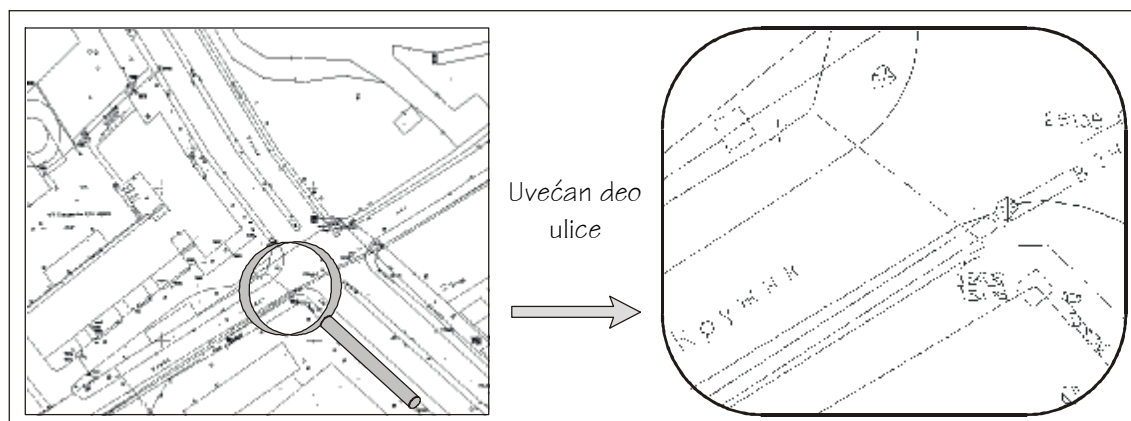
### 3.3.1.1 Raspoloživi izvori podataka

Tehnike koje su na raspolaganju za unos podataka, a samim tim i raspoloživi podaci, su slične tehnikama koje se koriste pri unosu podataka za DMT. Detaljan zemljišni premer je svakako najkvalitetniji način, ali i najskuplji. Obilaskom terena, pored preciznog snimanja koordinata svih objekata, odmah se vrši i klasifikacija (da li je krov direktno povezan sa kanalizacijom ili se voda sa krova izliva na pešačku stazu, i slično), čime se znatno povećava pouzdanost modelovanja postojećeg stanja.

Stereo aerofotografije su takođe dobar izvor kvalitetnih podataka. Ukoliko se raspolaže sa zvaničnim podacima, obično je potrebna dodatna obrada, jer standardno nisu uključeni svi objekti na način kako je to potrebno u projektima OUP-a.

Satelitske slike su upotrebljive za veće površine, jer im je (trenutno) rezolucija u klasi 1 do 2 m. Radarsko aerosnimanje sa malih visina, međutim, postaje sve interesantnije u projektima OUP zbog niske cene, velike brzine prikupljanja podataka i izuzetno visoke rezolucije u klasi 1 cm [60]. Takođe, koriste se i klasični video snimci kao dopuna sadržaja papirnih karti [6].

Na žalost, pored svih raspoloživih savremenih tehnika za unos podataka, naša realnost je da se najveći broj projekata radi na osnovu starih papirnih karti. Pri tome, za unos podataka se koriste ili digitajzeri ili se karte skeniraju a zatim se koristi ekranska digitalizacija.



Slika 3.26: Nestruktuiran CAD crtež koji je praktično neupotrebljiv za kreiranje strukturiranog sloja namene površina: u sitnoj razmeri, crtež izgleda korektno (levo); u krupnoj razmeri (uvećan deo ispod lupe) vidi se da je crtež sastavljen od nepovezanih linija

Često se, u želji da se ubrza postupak, ne koristi “ručna” digitalizacija, već se posao prevođenja slike u vektorski zapis poveri računaru. Na slici 3.26 je prikazan detalj Kumodraškog sliva, Beograd. Slika sa leve strane prikazuje podatke u grafičkoj bazi standardnog CAD paketa, dobijene skeniranjem papirnih karti i postupkom automatske vektorizacije. Takvi podaci, iako su u digitalnoj formi, imaju malu upotrebnu vrednost. Naime, ako se pod “lupom” pogleda detalj raskrsnice (desna slika), vidi se da je crtež sastavljen od sitnih linija, koje su međusobno nepovezane.

Čak ni tekst na crtežu (kote šahtova, ime ulice) nije u formi slova već nestruktuiranih linija. Ovakvi ulazni podaci se ne mogu koristiti direktno za formiranje sloja namene površine terena, već je potrebno “ručno” digitalizovati kompletan sadržaj.

### 3.3.1.2 Realni izvori podataka u okviru projekta OUP

Koji će se način unosa podataka o površini terena koristiti, zavisi od raspoloživosti tehnika ali i od budžeta projekta. U tabeli 3.1 je dat pregled izvora podataka koji se najčešće koriste u našoj praksi.

Veliki budžet		Mali budžet
Aerofotogrametrija	Papirne karte	Papirne karte
Ukoliko postoje obrađeni snimci, pregledati raspoložive podatke i skinuti još detalja specifičnih za projekat. Ako snimci nisu obrađivani, potrebno je dogovoriti sa operaterom koji sadržaj je od interesa za projekat.	Digitalizacijom skinuti sve vidljive objekte, ulice, staze, kuće, parkinge, garaže itd. Prethodno otkloniti deformaciju karte. S obzirom na starost papirne karte, koristiti aerofotografije za uvid u najnovije stanje na terenu, ili obići teren i uneti izmene na karti.	Sa papirnih karti digitalizovati samo glavne ulice, velike zelene površine, kao i velike nepropusne površine. Klasifikovati blokove zgrada prema procentualnim zastupljenostima površina i unositi samo konture tih površina. Koristiti aerofotografije kao pomoć. Ako postoje kvalitetni kolor snimci (foto ili video), rektifikovati snimke prema papirnoj karti, i pokušati automatsku reklasifikaciju ili ih koristiti radi uvida u trenutno stanje na terenu.

Tabela 3.1: Načini unosa podataka o nameni površine terena

Varijante za unos podataka, u tabeli 3.1 su poređane po kvalitetu, od najkvalitetnijih ka lošijima. Možda je najinteresantniji poslednji način unosa podataka, jer omogućava brzo dobijanje potrebnih slojeva za rad sa modelima OUP-a, uz najnižu cenu i uz korišćenje svih raspoloživih izvora podataka. Osnovna pretpostavka tog načina je, razdvajanje informacija potrebnih programima koji se bave analizom tečenja vode po površini, gde dominiraju veće ulice i par značajnijih objekata, od informacija potrebnih za transformaciju kiše u neto oticaj.

Da bi se izbeglo mukotrпно unošenje svih objekata na slivu, pribegava se detaljnoj analizi nekoliko odabranih tipova slivnih površina, a zatim se ceo sliv deli na tako određene kategorije. Takav pristup je primenjen, na primer, u projektu Klisa, Novi Sad (slika 8.14 na strani 171). Na osnovu papirnih karti, digitalizovane su samo ulice, kao i nekoliko karakterističnih tipova blokova kuća (detalj na slici). Analizom parametara sa karakterističnih površina, određeni su procenti propusnih i nepropusnih površina, kao i procenat krovova. Ceo sliv je, zatim, podeljen na tako izabrane klase, konsultujući i postojeće aerosnimke (čime se obezbeđuje da klasifikacija odgovara što više postojećem stanju).

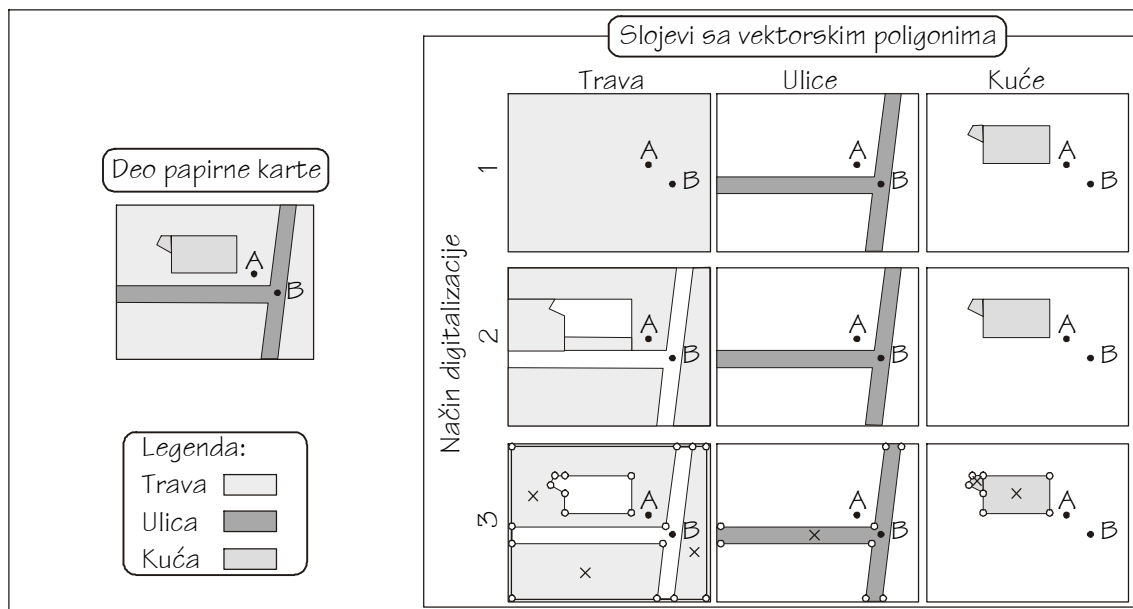
Razdvajanje funkcije sloja namene površina omogućava i primenu metoda za automatsku klasifikaciju satelitskih ili video snimaka. Naime, u literaturi se mogu naći brojni radovi o primeni satelitskih snimaka u ruralnoj hidrologiji. Zbog još uvek niske rezolucije, međutim, satelitski snimci se ne mogu koristiti u urbanim predelima, ako se pred njih postavi zadatak automatske klasifikacije celokupnog tematskog sadržaja. Čak i kod multispektralnih snimaka izuzetno visoke rezolucije (koje idu i do 1 m) brojni su problemi automatske klasifikacije kuća, ulica, parkova i ostalih urbanih sadržaja. Čest slučaj je da se dobijaju rezultati sa velikim procentom neklasifikovane površine, kao i da se, na primer, krov zgrade klasifikuje kao dve ili tri različite klase (jer je krov na “dve vode” pa je zbog različitog ugla različita i spektralna karakteristika istog krova).

Zahvaljujući razdvajanju funkcije sloja namene površina, od satelitskih ili avio snimaka se zahteva samo klasifikacija određenih, karakterističnih tipova površina. S obzirom da postoji sloj sa digitalizovanim ulicama, dugačkim linijskim objektima, kao i sa detaljno digitalizovanim određenim tipovima površina, satelitski snimci niske rezolucije se mogu jednostavno georeferencirati, odrediti potrebne spektralne karakteristike izabranih tipova površina, a zatim obaviti automatsku reklasifikaciju celog sliva na izabrane klase.

Prema iskustvu nekih autora [28, 84], prilikom automatske klasifikacije (kao i digitalizacije, u manjoj meri) dolazi do potcenjivanja nepropusnih površina. U okviru projekta kišne kanalizacije grada Drezden (slike 8.5 i 8.6 na stranama 160 i 161), postojala je namera da se potvrde ta iskustva, upoređenjem rezultata klasifikacije satelitskih snimaka sa rezultatima digitalizacije papirnih karti. Ali, kako nisu nabavljeni multispektralni snimci odgovarajućeg kvaliteta za rad u urbanim uslovima (procenjena rezolucija snimaka je 30 m), takva analiza nije sprovedena.

### 3.3.1.3 Rasterizacija sloja namene površina

U većini slučajeva, podaci o nameni površina se unose u CAD ili GIS vektorskom sistemu, kao topološki definisani zatvoreni poligoni. Ako je potrebno odgovoriti na pitanje: “Šta se nalazi na površini terena, na lokaciji  $X=1001.20$ ,  $Y=1994.10$ ?”, iz baze podataka treba pronaći prvi poligon koji okružuje traženu tačku, gledajući sve raspoložive slojeve. Zatim treba proveriti odnos tog poligona prema ostalima, vodeći računa o redosledu slojeva.



Slika 3.27: Načini digitalizacije sloja namene površine

Na slici 3.27 je dat veoma uprošćen primer sa jednom kućom, dve ulice i travnatom površinom. Za tačke **A** i **B**, jednostavno se određuje tip površine ako se gleda leva slika. Na desnoj slici, gde su poligoni uneti po slojevima (prikazana su tri moguća načina unosa podataka), za tačku **A** se pretragom po svim slojevima jednoznačno utvrđuje da pripada travi, dok se za tačku **B** dobijaju poligoni na sloju ulice i sloju trave. Tek uspostavljanjem odnosa između ta dva sloja, može se pouzdano odgovoriti kojoj površini pripada tačka **B**.

U razvijenom informatičkom modelu za projekte OUP-a, upiti ovoga tipa se često koriste. Na osnovu informacija o nameni površina, određuju se pravci tečenja vode kao i parametri modela OUP-a. Da bi se ubrzao rad, sloj namene površina se prevodi iz vektorskog oblika (podaci kao na slici 3.27 desno) u rasterski oblik (slika 3.27 levo), postupkom koji se zove rasterizacija. Za određenu veličinu ćelije, rešava se problem određivanja sadržaja te ćelije i dodeljuje joj se jedinstveni broj, indeks.

Sam postupak rasterizacije u mnogome zavisi od načina (vektorskog) unosa podataka. Na slici 3.27 desno, dat je primer za tri moguća načina digitalizacije:

1. (gornja grupa slika) unos samo granica objekata, primenjivo i za CAD sisteme jer ne zahteva uspostavljanje čvršće topološke veze među poligonima, ali zahteva striktno poštovanje "visinskih" relacija među slojevima (sloj sa višim prioritetom pokriva niži sloj);
2. (srednja grupa slika) unos granica svih kontinualnih podpovršina, pri čemu svi poligoni mogu biti na jednom sloju i istog su prioriteta, ali je znatno povećana količina podataka koju treba uneti kao i redudansa baze podataka;

3. (donja grupa slika) korišćenjem GIS okruženja, digitalizacija samo stranica poligona, uz kasnije formiranje zatvorenih poligona, njihovo razvrstavanje na slojeve i uspostavljanje veza (na slici su krstićem prikazane unutrašnje tačke poligona, potrebne GIS programu da formira korektnu topologiju).

Mada je treći način unosa podataka najkvalitetniji, potrebno je duže vreme za inicijalnu digitalizaciju nego kod prvog načina. Takođe, postoji određena redundansa baze podataka, mada manja nego kod drugog načina. Najveći problem je što se za takav unos podataka zahteva korišćenje GIS alata.

U razvijenom informatičkom modelu za potrebe OUP-a, prikazanom u ovom radu, način unosa podataka nije unapred određen. Svi primeri su urađeni prvim načinom unosa podataka, kao najbržim i najjednostavnijim. Unapred se formira spisak slojeva koji su od interesa, i kreće se sa digitalizacijom od najnižeg sloja ka najvišem, unoseći samo globalne granice.<sup>20</sup> U postupku rasterizacije, potrebno je zadržati isti redosled slojeva, od najnižih ka višim.

U postupku rasterizacije, korisnik mora da odluči koja će biti veličina ćelije u finalnoj slici. Za razliku od vektorskog formata, gde se čuvaju koordinate svake tačke sa milimetarskom rezolucijom<sup>21</sup>, u rasterskom obliku prostorna rezolucija je reda veličine metra. Za većinu projekata OUP-a, sa srednjom gustinom urbanizacije i sa unetim krupnijim objektima, dovoljna je rezolucija od 2 do 3 metra. Ako su uneti i sitniji objekti, zgodno je koristiti rezoluciju od 1 metra.

Sloj namene površina, koji je rezultat automatske reklasifikacije satelitskih, video ili avionskih snimaka, se već nalazi u rasterskom obliku. Da bi se takva slika koristila, potrebno je formirati spisak klasifikovanih sadržaja, proveriti veličinu ćelije kao i georeferenciranost. Promena prostorne rezolucije kao i potrebne prostorne deformacije se obavljaju linearnim interpolacijama.

#### 3.3.1.4 Kontrola kreiranog sloja namene površina

Po završenom kreiranju sloja namene površina, neophodno je obaviti kontrolu. Crtanjem slike u razmeri istoj kao što je polazni izvor podataka (papirna karta, snimak, itd.), vizuelno se uočavaju mesta koja nisu obrađena, loše preklapljenosti ili koja su se, naknadnom analizom, pokazala kao bitna za proračun oticaja.

Pored vizuelnog upoređenja kreirane slike sa polaznim podacima, moguće je generisati veći broj slučajno raspoređenih tačaka i uporediti stvarni sadržaj sa terena (potreban je obilazak terena) sa sadržajem sloja namene površina [24]. U tabeli 3.2 je dat jedan slučaj upoređenja sadržaja, sa svega 4 klase: kuće, garaže, ulice i trava. Dijagonalni brojevi pokazuju koliko je tačaka sa određenim sadržajem tačno kartirano. U pretposlednjoj koloni je dat ukupan broj kartiranih tačaka, a u

<sup>20</sup>Treba voditi računa o tome da tako dobijeni poligoni ne odgovaraju stvarnosti - oni su po pravilu znatno veći, jer uključuju i sve unutrašnje sadržaje. Prava površina trave, na slici 3.27 je manja nego površina poligona na sloju Trava (gornja grupa slika).

<sup>21</sup>Rezolucija nije isto što i tačnost. Pogrešan podatak sa visokom rezolucijom je i dalje pogrešan podatak!

	Tačni podaci sa terena				Slika:Ukupno	Greška viška
	Kuće	Garaže	Ulice	Trava		
Slika: Kuće	35	1	7	3	46	0.239
Slika: Garaže	1	9	0	2	12	0.250
Slika: Ulice	4	0	41	6	51	0.196
Slika: Trava	0	0	4	39	43	0.093
Teren: Ukupno	40	10	52	50	152	
Greška ispuštanja	0.125	0.100	0.212	0.220		0.184

Tabela 3.2: Matrica grešaka za sliku namene površine

pretposlednjoj vrsti ukupan broj tačnih klasa. U poslednjoj koloni je data greška koja pokazuje koliko je više tačaka<sup>22</sup> kartirano u određenoj klasi, dok je u poslednjoj vrsti greška koja pokazuje koliko je ispušteno tačaka<sup>23</sup> u kartiranju. U donjem desnom uglu, data je greška:

$$\epsilon = 1 - \frac{\sum \text{Dijagonalni elementi}}{\sum \text{Ukupan broj tacaka}} = 1 - \frac{124}{152} = 0.184 \quad (3.8)$$

kao ukupan pokazatelj tačnosti kartiranja sloja namene površina. Inače, prema iskustvu nekih autora, u procesu digitalizacije, u urbanim područjima, obično se potcenjuje nepropusna površina [28].

### 3.3.2 Sloj namene površina u modelima OUP-a

Kreirani sloj namene površina je neophodan u složenom informatičkom modelu OUP-a. Način kako će se ona kreirati, zavisi pre svega od raspoloživih resursa: podataka, ljudi, vremena i novca. Takođe, bitan element u donošenju odluke o načinu kreiranja sloja namene površina je da li će se koristiti jednokratno, samo za potrebe simulacije postojećeg stanja kao i planiranja budućeg, ili će činiti sastavni deo složenijeg gradskog ili regionalnog informatičkog modela.

U procesu kreiranja podataka potrebnih simulacionim modelima OUP-a, sloj namene površina se koristi u sledećim aktivnostima:

- Kao opis površine terena u digitalnom obliku, čime se omogućava jednostavna promena varijanti. Polazeći od postojećeg stanja, lako se simuliraju različiti scenariji razvoja određenih oblasti. Na taj način se proverava robustnost sistema, odnosno osetljivost budućeg rešenja na neplanirani razvoj.
- Kao indeks za pristup bazi podataka, u kojoj se nalaze karakteristike terena. Pored hidrauličkih parametara, u bazi se nalaze i informacije o načinu povezanosti zgrada na kanalizacioni sistem, podaci o spratnosti, količini upotrebljenih voda, kvalitet ispuštenih voda kod industrijskih objekata, itd.

<sup>22</sup>Na engleskom jeziku *errors of commission*.

<sup>23</sup>Na engleskom jeziku *errors of omission*.

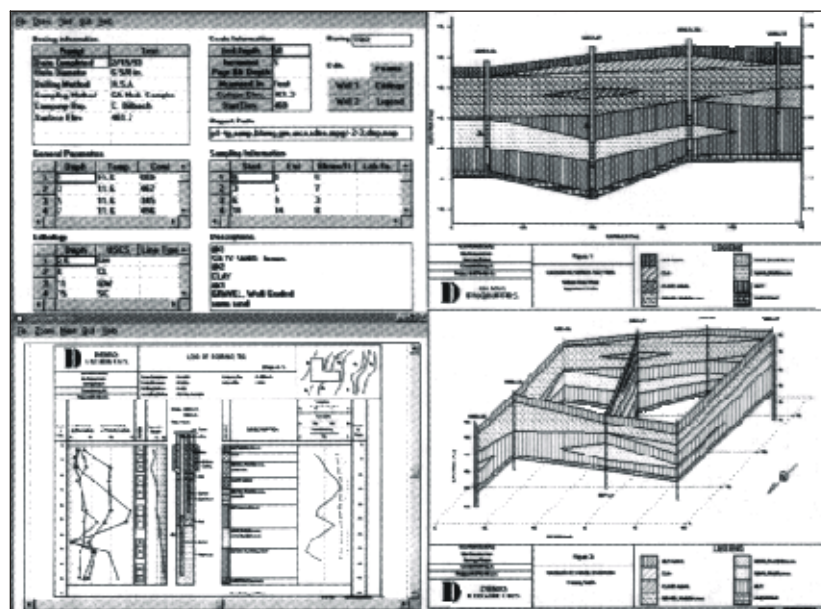
- Kao pomoćni sloj u analizi tečenja vode po površini terena. Moguća su dva pristupa: korišćenjem objekata koriguje se DMT veštačkim izdizanjem (kuće, garaže, ...) i spuštanjem terena (ulice, staze, ...), ili definisanje koeficijenta trenja, pri čemu vertikalni zidovi imaju beskonačno trenje. U ovom radu se koristi prvi pristup, uz dodatne korekcije uglova tečenja vode uz vertikalne zidove.
- Kao pomoćni sloj u automatskom generisanju količina upotrebljene vode, u uslovima kada ne postoje eksplicitne veze između zgrada i kanalizacionog sistema. Konstruisanjem slike udaljenosti od kanalizacionih cevi, voda iz zgrada se upućuje u najbliže cevi. Moguće je postaviti kriterijum da sve zgrade koje su dalje od neke granične dužine, imaju septičke jame.
- Kada kanalizacioni sistem nije u stanju da primi svu vodu ili kada dođe do zapušavanja slivnika, matematički model dvojnog odvodnjavanja će voditi računa o površinskoj vodi, njenom toku, punjenju depresija i nizvodnom vraćanju u sistem. Na osnovu sloja namene površina proračunavaju se brojni parametri potrebni za model dvojnog odvodnjavanja.
- Prilikom izlivanja na teren, potrebno je kartirati oblasti koje će se potapati. Na osnovu sloja namene površina, kao i na osnovu izračunatih dubina i trajanja potapanja, moguće je dobiti procenu mogućih šteta. Takva procena bi trebala da bude jedan od kriterijuma prilikom rekonstruisanja ili projektovanja nove kanalizacije, kao i kod osiguranja i davanja kredita za gradnju objekata.

### 3.4 Podaci o površinskom sloju tla

Informacije o površinskom sloju tla su vrsta tla, visina kapilarnog penjanja, granulometrijski sastav, kohezija, pijezometarska kota vode i slično. Na osnovu ovih informacija, moguće je napraviti digitalni model površinskog sloja tla. Čitav spektar problema i, samim tim matematičkih modela je vezan za podzemne vode i njihovu interakciju sa površinskim vodama. Ova problematika posebno dobija na značaju uvođenjem tehnika kojima se smanjuje maksimalni oticaj od kiše, kao što su retenzioni bazeni i infiltracioni rovovi, kao i porastom stepena zagađenja kišnih voda.

U zavisnosti od problema koji se rešava, kao i modela koji se koristi, razlikuju se načini pripreme i obrade podataka. Kvalitetan izvor podataka su rezultati geološkog bušenja tla ili pravljenje iskopa, kombinovano sa geofizičkim metodama. U projektima OUP-a, to se uglavnom svodi na izvođenje novih istražnih radova, u zonama gde se predviđa formiranje retenzionih prostora. Takvi rezultati se mogu kombinovati sa ranijim istraživanjima, obavljenim za druge potrebe, koji su u formi zapisnika ili već kartiranih geoloških jedinica.

Karakteristične vrste tla u površinskom sloju se mogu predstaviti kao trodimenzionalni objekti. Standardni GIS sistemi nisu opremljeni funkcijama za prostorne



Slika 3.28: QuickCross/Fence program za obradu rezultata istražnih radova

objekte, tako da je obrada ovih podataka nešto kompleksnija [29]. Na osnovu rezultata istražnih radova, koji daju karakteristike tla u jednoj tački, interpolacijom se kreira prostorni raspored, pri čemu se sa jednom površinom definiše gornja granica (povlata), a sa drugom površinom donja granica sloja (podina). Za interpolaciju se koriste ili Kriging metode, ili TIN struktura. Posebna pažnja mora da se posveti problemu međusobnog prodora različitih površina kao i nestajanju i pojavljivanju proslojaka jedne vrste tla.

Na slici 3.28 je prikazan jedan od načina prezentacije rezultata istražnih radova. Kao izvor podataka služe rezultati bušenja i probnog crpljenja. Nakon interpolacije, rezultati se prikazuju u prostoru (u formi "ograda") ili u dve dimenzije (u formi podužnog preseka).

Izloženi informatički model odvodnjavanja urbanih površina, u ovom radu, ne razmatra probleme vezane uz podzemne vode. Numerički modeli OUP-a, za koje se pripremaju ulazni podaci, uglavnom računaju infiltraciju kišne vode u nezasićenim sredinama korišćenjem Green-Ampt ili Horton-ovog modela, za koji se parametri potrebni za proračun dobijaju na osnovu sloja namene površina. Kako za izloženi informatički model nisu potrebni podaci o tlu, u ovom radu se dalje ne razmatra kreiranje digitalnog modela tla kao ni upotreba tih podataka.





## Glava 4

# Kreiranje sloja površinskog toka vode

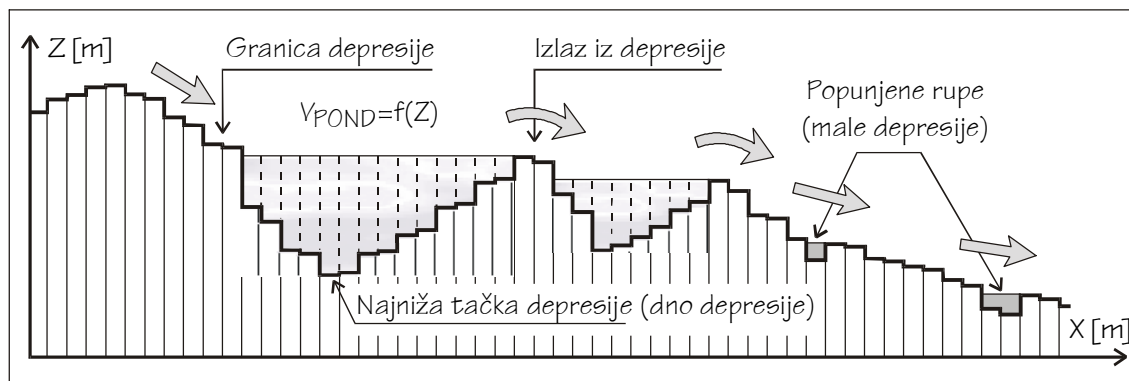
Slojevi sa kanalizacionom mrežom, DMT-om i namenom površine terena su digitalna reprezentacija postojećeg stanja. Ti slojevi ne nose nove informacije, već samo omogućavaju jednostavniji rad sa mnoštvom grafičkih i numeričkih podataka. Na osnovu njih, međutim, mogu se kreirati novi slojevi, koji donose projektantima nove informacije važne u procesu projektovanja sistema za OUP, i znatno ubrzavaju proces rada uz smanjenje subjektivnosti u izboru simulacionih parametara.

U delu 3.2.4 *Osnovni slojevi izvedeni iz DMT-a*, već su najavljeni slojevi koji se mogu kreirati korišćenjem DMT-a. Dat je i prikaz proračuna nagiba terena kao i pravca maksimalnog nagiba. U ovom poglavlju, daće se detaljnije prikaz razvijenih procedura za kreiranje DMT-a bez depresija, pri čemu će se razdvojiti male depresije koje su rezultat grešaka u interpolaciji terena, od depresija koje zaista postoje na terenu. Koristeći tako korigovan teren, i primenjujući visinsku korekciju na osnovu podataka u sloju namene površine terena, određiće se slika površinskog toka, prvo u rasterskom obliku, a zatim i vektorizovana i topološki uređena. Rezultati tih analiza će se koristiti u sledećim poglavljima, pri određivanju granica podslivova kao i pri definisanju novog simulacionog modela za kvalitetniji proračun odvodnjavanja sa urbanih površina.

## 4.1 Digitalni model terena bez depresija

### 4.1.1 Definicija DMT-a bez depresija

DMT je rezultat interpolacije između tačaka sa poznatim visinama, bilo direktno ili koristeći TIN strukturu. Kao jedan od produkata interpolacije, u DMT-u se mogu pojaviti male depresije, koje ne postoje u prirodi. Na slici 3.9, u delu u kome se govori o direktnoj interpolaciji DMT-a, prikazan je način generisanja tih malih depresija i kako one menjaju kompletnu sliku tečenja na površini terena.



Slika 4.1: Podužni presek kroz DMT sa dve velike povezane depresije i dve male

Pored veštački generisanih malih depresija, DMT obično sadrži i prirodne depresije, po pravilu znatno veće. Na slici 4.1 je dat presek kroz DMT, u kome se nalaze velike i male depresije. Svaka velika depresija u procesu oticanja vode, se puni od kote dna do kote preliva, a zatim se površina depresije ponaša kao tranzitna zona. Za korektno modelovanje površinskog tečenja, neophodno je poznavati karakteristike depresija (kotu dna, tačku preliva, krivu zapremine i krivu površine) [96, 97].

Ako se na osnovu analiza DMT-a odrede male i velike depresije, a zatim se DMT tako koriguje da se na mestima depresije teren podigne do kote odgovarajućeg preliva, dobija se digitalni model terena bez depresija.<sup>1</sup> U analizama tečenja po terenu, DMT bez depresija je bitan jer predstavlja granični slučaj, u kome sva kiša koja padne na teren i transformiše se u površinski oticaj, sigurno dolazi do izliva sa razmatranog slivnog područja.

Pored upotrebe DMT-a bez depresija u analizi tečenja po površini, rezultat delineacije<sup>2</sup> depresija se može koristiti i u kontroli kvaliteta ulaznih podataka o visinama terena. Veliki broj malih depresija raspoređenih u određenoj zoni, je siguran pokazatelj grešaka u podacima o visini.

### 4.1.2 Delineacija depresija u DMT-u

Problemom određivanja depresija u DMT-u se do sada bavilo više autora [9, 36, 62, 96]. Generalno govoreći, postoje dva pristupa problemu: prvi je primena višestrukog osrednjavanja DMT-a (primer kao na slici 3.23) nakon čega se vrši oduzimanje originalnog DMT-a i osrednjenog, kako bi se došlo do zapremine depresija koje su osrednjavanjem "popunjene", a drugi je iterativno popunjavanje depresije sve dok se ne dođe do tačke kada voda može da istekne.

Za potrebe informatičkog modela OUP-a, razvijen je program za delineaciju koji koristi jednu od varijanti iterativnog popunjavanja depresija. Takođe, program

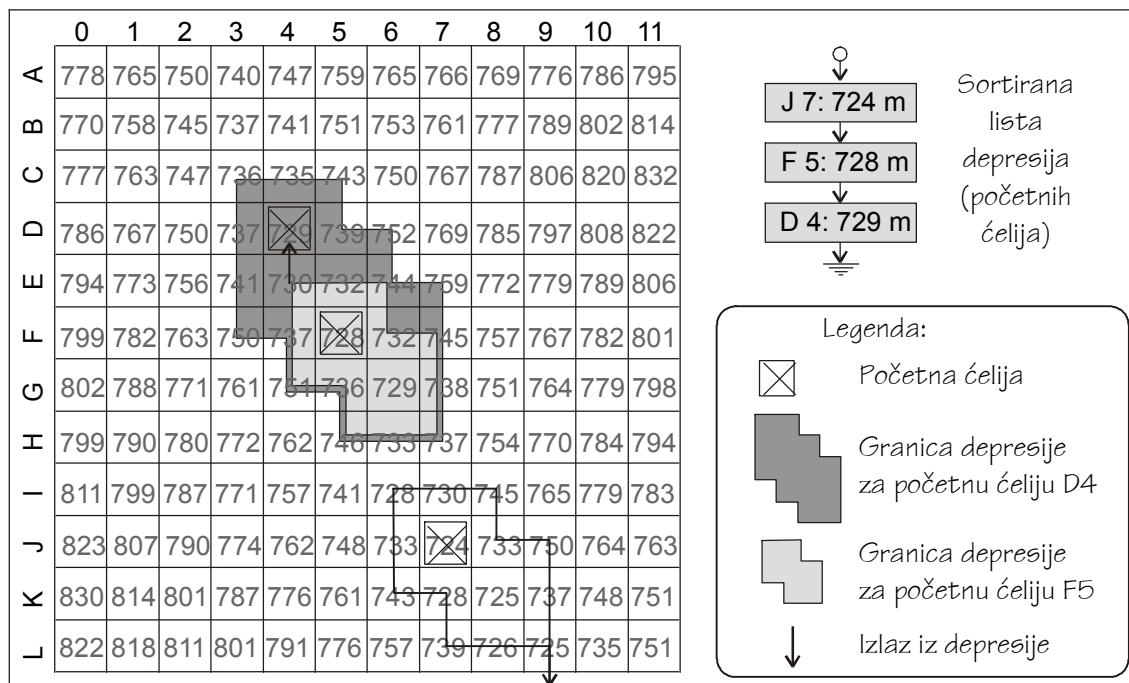
<sup>1</sup>Na engleskom jeziku *depressionless DEM*.

<sup>2</sup>Delineacija kao termin koji označava postupak određivanja granice neke površine se koristi kako kod podele slivne površine na podslivove, tako i u proračunu granica depresija.

uzima u obzir i sloj sa podacima o kanalizacionoj mreži (ako postoji), tako da je jedan od kriterijuma za granicu depresije i prisustvo kanalizacione cevi. Polazeći od originalnog DMT-a, algoritam za delineaciju je sledeći:

1. Pronađi sve najniže tačke depresija na DMT-u, korišćenjem prozora  $3 \times 3$ , odnosno sve tačke iz kojih voda nema gde da istekne (slučaj kada je kota ćelije niža od kota 8 ćelija koje je okružuju).
2. Napravi listu depresija i sortiraj je prema koti, od najniže ka najvišoj. Ova lista predstavlja spisak svih najnižih tačaka depresija i kod loše kreiranih DMT-a može biti prilično dugačka!
3. Za svaku tačku u listi, počev od najniže, uradi delineaciju granice depresije:
  - (a) Napravi listu ćelija koje su u depresiji, u prvoj iteraciji je to samo početna tačka.
  - (b) Napravi spisak ćelija oko depresije (formiraj listu granice).
  - (c) Nađi najnižu tačku u granici kao mogući izlaz iz depresije.
  - (d) Da li je mogući izlaz istovremeno i stvarni izlaz? Ako je aktivirana opcija upotrebe i kanalizacione mreže, kao mogući izlaz se uzima bilo dreniranje depresije u kanalizacionu mrežu bilo prirodno oticanje po terenu.
    - Ne, okolne tačke ne dozvoljavaju vodi da istekne. Dodaj ovu tačku u listu ćelija koje čine depresiju. Idi na korak 3b.
    - Da, postoji put kojim voda može da istekne. Pronađen je izlaz iz depresije, idi na korak 4.
4. Sve ćelije u listi depresije podigni na kotu izlazne tačke.
5. Izračunaj parametre depresije, ukupnu zapreminu, krivu zapremine i krivu površine.
6. Zapiši sve parametre. Proveri da li je neka od preostalih tačaka u listi depresija već obuhvaćena upravo određenom depresijom (slučaj kada veća depresija pokrije nekoliko malih) i ako jeste, izbaci ih iz liste.
7. Da li su obrađene sve depresije?
  - Ne, preostalo je još tačaka u listi depresija. Idi na sledeću tačku u listi i na korak 3.
  - Da, sve depresije su obrađene, kraj proračuna.

Na slici 4.2 je dat test primer, sa DMT-om preuzetim iz literature [36]. Na prikazanom DMT-u veličine  $12 \times 12$ , određene su prvo najniže tačke koje predstavljaju dno depresije (na slici označeno krstićem), a zatim je za svaku tačku iterativnim putem, određena depresija. Na slici se može videti da je prva depresija istovremeno



Slika 4.2: Primer delineacije depresije u fiktivnom DMT-u

i izlaz iz sliva, a da je druga depresija prekrivena trećom, tako da se na kraju dobija DMT sa dve depresije.

Izlaz iz svake od depresija predstavlja linija čiji je početak centar izlazne ćelije, a kraj centar prve sledeće nizvodne ćelije. Kota svih ćelija unutar granice depresije je jednaka koti izlazne tačke.

S obzirom da nisu poznate visine ćelija izvan granice slike, potrebno je obratiti pažnju na način zadavanja graničnih uslova. U programu su predviđene tri mogućnosti: prva je da se visina tački izvan granice slike odrede na osnovu nagiba terena u okolini tačke (na neki način dobijajući logičan nastavak terena), druga je da se visina tako odredi da se uvek formira izlaz iz depresije na samoj granici (na taj način se sigurno dobija teren čije sve ćelije se dreniraju do granice slike), a treća je suprotna od druge, tj. visina tačaka se tako određuje da se nikada izlaz ne formira na granici slike.

Kao rezultat kreiranja DMT-a bez depresija, dobijaju se sledeći slojevi:

- Korigovani DMT bez svih depresija. Rasterski sloj.
- Slika depresija. Rasterski sloj, u kome su sve ćelije 0, a ćelije unutar depresija imaju broj jednak rednom broju depresije (indeks za sve ostale parametre).
- Granica depresija. Vektorski sloj, zatvoreni orijentisani poligoni. Za razliku od slike depresija, gde se nalaze samo najveće depresije, u ovom sloju se nalaze podaci i o manjim, prekrivenim depresijama.

- Izlaz iz depresija. Vektorski sloj, orijentisane linije. Kao i u sloju granica depresija, sadrži i izlaze za manje, prekrivene depresije. U slučaju kada se koriste podaci o kanalizacionoj mreži, za depresiju koja se drenira preko kanalizacione cevi, početna i krajnja tačka vektora izlaza su iste.
- Dno depresija. Vektorski sloj, tačke. U ovom sloju se nalaze kote i koordinate dna svih depresija.
- Parametri depresija. Tekstualna datoteka. Koristeći sliku depresija kao indeks, u ovoj datoteci se mogu naći zapremina, kriva zapremine i kriva površine depresije.
- Veza između depresija i rednog broja cevi koja drenira depresiju. Tekstualna datoteka. Kreira se samo ako je prisutan sloj sa kanalizacionom mrežom.

Vektorska granica depresije je sastavljena od koordinata centara ćelija koje okružuju depresiju. U iterativnom postupku, lista ćelija koje čine granicu se ne kreira u svakom koraku od početka, već se unutar liste, u svakom koraku, brišu ćelije koje su proglašene elementima depresija, a umeću se nove granične ćelije. Takav algoritam znatno ubrzava delineaciju depresija, ali zahteva na kraju programa sortiranje graničnih ćelija da bi se dobio zatvoreni i orijentisan poligon.

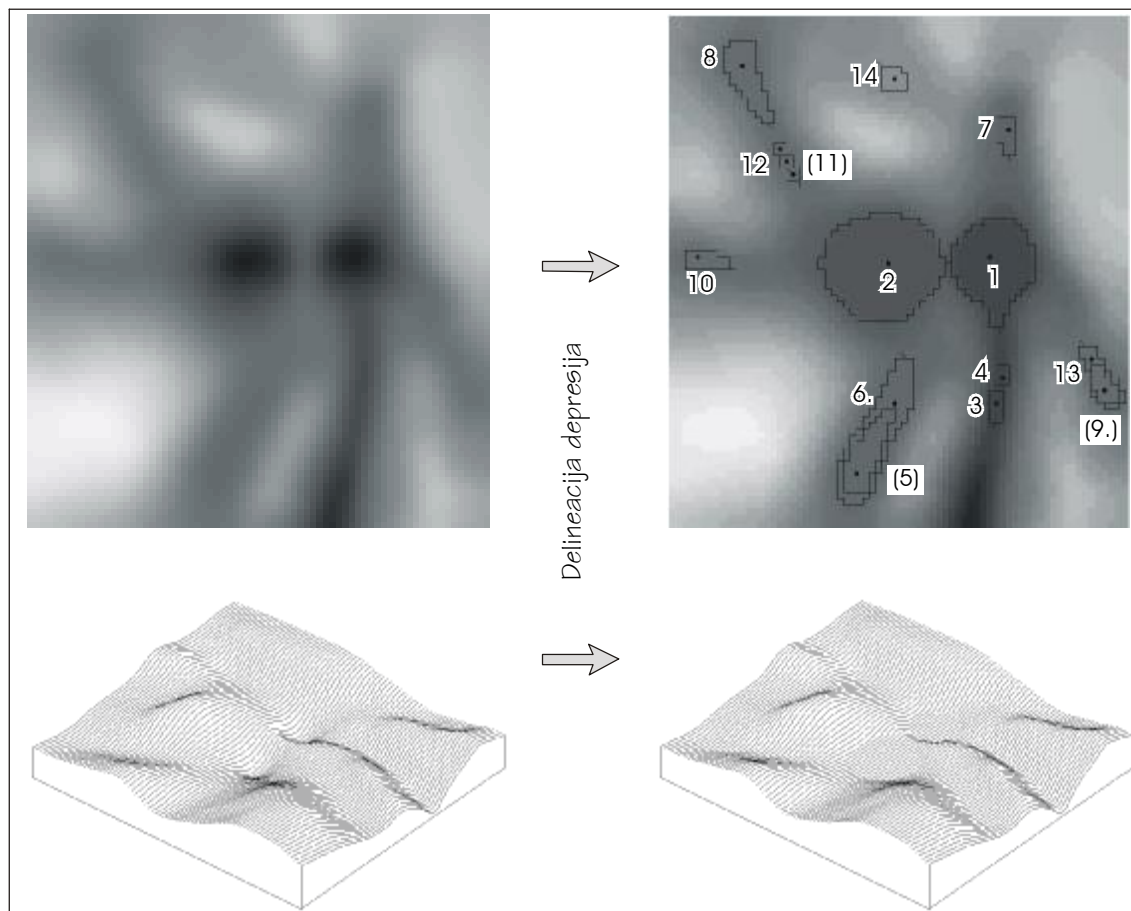
Na slici 4.3 je dat još jedan primer originalnog DMT-a, kao i DMT-a nakon uklanjanja svih depresija, sa preklopljenim vektorskim slojem granica, izlaza i dna depresija. Na slici se može uočiti par većih depresija, koje imaju značajniju ulogu u procesu retenziranja kišnih voda, kao i nekoliko depresija veličine jedne do dve ćelije, koje su rezultat grešaka u interpolaciji terena. Na korisniku informatičkog modela OUP-a je da odluči ispod koje granice se depresije smatraju greškom u DMT-u, i da, na osnovu broja i gustine tih malih depresija, odluči da li da se vrati na korak kreiranja DMT-a i da pokuša da napravi kvalitetniji model.

## 4.2 Kreiranje podataka o površinskom toku

Kretanje vode po površini terena se u informatičkom modelu OUP-a različito razmatra u slučaju gde ne postoji kanalizaciona mreža, pa se površinska voda drenira prirodnim putem po površini terena, od slučaja kada postoji (ili kada se projektuje nova) kanalizaciona mreža. U prvom slučaju, voda teče nesmetano po terenu do određene tačke izliva i površinska mreža tokova se može odrediti analizirajući DMT i sliku namene površine terena.

U nastavku se daju razvijeni algoritmi koji automatski kreiraju topološki korektan vektorski sloj površinske mreže. Simulacioni modeli OUP-a mogu direktno da preuzmu podatke sa novokreiranih slojeva i da formiraju matematički model tečenja po površini terena.

Drugi slučaj obuhvata tečenje površinske vode kada pored karakteristika terena i objekata na terenu, dominantnu ulogu u određivanju površinske mreže ima



Slika 4.3: Primer delineacije depresija: polazni DMT i DMT bez depresija

i podzemna kanalizaciona mreža, koja se ravnopravno pojavljuje u vertikalnom bilansu voda. Iako je trenutni trend postepeno povezivanje CAD i GIS paketa sa postojećim numeričkim, fizički baziranim simulacionim modelima OUP-a, taj slučaj tečenja bez značajnije promene koncepta samog modela nije moguće obuhvatit. U ovoj disertaciji se u poglavlju 7 *Koncepcija modela dvojnog odvodnjavanja* predlaže poboljšanje simulacionih modela, bazirano na uspostavljanju dvosmerne veze između površinskog toka i toka u kolektorima. U tački 7.3.2 *Veza kanalizacione mreže i površinskog toka* (na strani 143), će se dati moguće veze ta dva sistema.

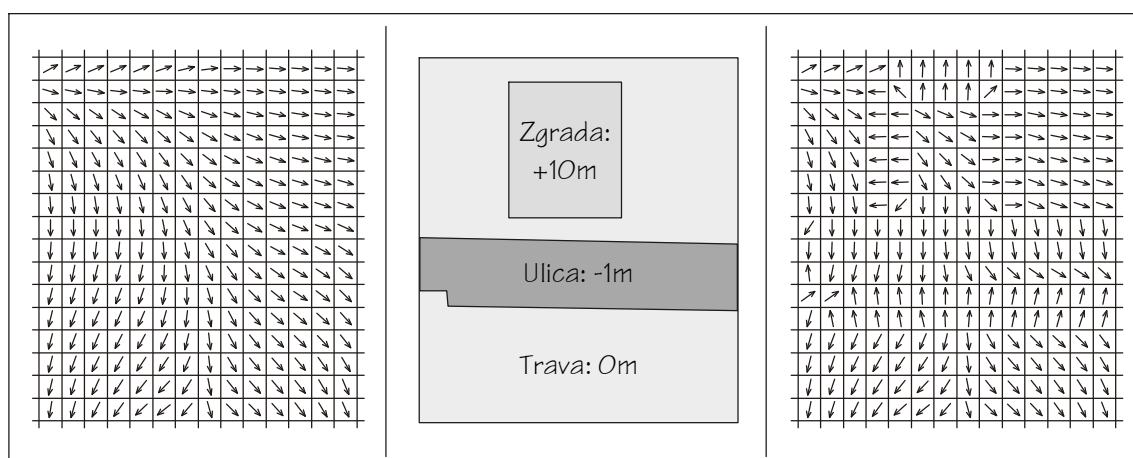
#### 4.2.1 Uticaj objekata na površinski tok vode

Korišćeni model tečenja vode po površini, zanemaruje uticaj inercijalne sile na masu vode, gravitaciona sila i sila trenja su te koje imaju dominantnu ulogu u određivanju pravca toka. Za vodu iz svake od ćelija usvojenog grid sistema, može se smatrati da će teći u pravcu maksimalnog nagiba te ćelije, pri čemu se ti pravci mogu odrediti iz DMT-a (tačka 3.2.4.1).

U urbanim uslovima, pored nagiba terena, na pravac tečenja vode značajan

uticaj imaju i veštački objekti. Ulice, kuće i ostali veštački objekti u znatnoj meri menjaju sliku tečenja vode. Da bi se te promene uzele u obzir, moguće je:

1. napraviti DMT u kome su preko linija prekida definisane stvarne visine objekata, što zahteva mukotrpan rad i kvalitetne ulazne podatke, a to je obično izvan realnih mogućnosti projekata OUP-a,
2. napraviti set pravila koja će, koristeći informacije iz sloja namene površina kao iz sloja pravaca maksimalnih nagiba, odlučivati koji je pravac tečenja u svakoj od ćelija,
3. visinski korigovati DMT tako što se na mestima gde se nalaze kuće podiže, a gde su ulice spušta teren, pa se nad tako korigovanim DMT-om računaju pravci maksimalnih nagiba (korekcije visina su takve da obezbeđuju formiranje “granice” oko objekta sa suprotnim smerom toka).



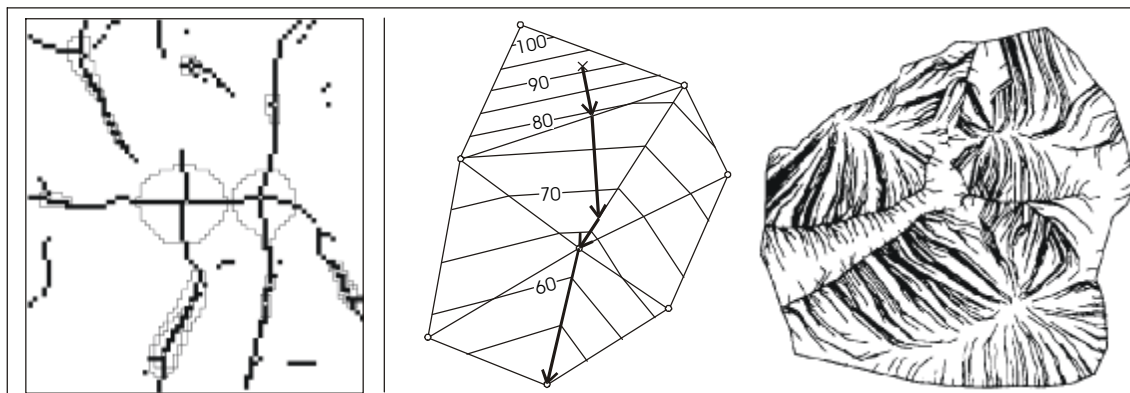
Slika 4.4: Pravci maksimalnih nagiba pre (levo) i nakon korekcije DMT-a (desno) korišćenjem sloja namene površina (sredina)

U razvijenom informatičkom modelu OUP-a, mogu se koristiti prva i treća varijanta: ako postoji kvalitetan DMT sa korektnim visinama svih objekata, on se direktno koristi za proračun pravca toka vode, inače se DMT visinski koriguje prema sloju namene površina (slika 4.4). Druga varijanta ovde nije razmatrana, jer ne vodi ka tačnijem rešenju a komplikovani set pravila bi morao od projekta do projekta da se menja i prilagođava lokalnim potrebama.

#### 4.2.2 Metode automatskog određivanja pravaca površinskog toka

Na osnovu pregleda literature, mogu se izdvojiti tri najčešće korišćena načina za automatsko određivanje pravaca površinskog toka vode:





Slika 4.5: Rezultat automatskog određivanja pravaca površinskog toka lokalnom metodom, korišćenjem prozora  $2 \times 2$  (levo) i direktno iz TIN-a (desno, [64])

1. Lokalne metode [8, 58], bazirane na rasterskoj prezentaciji DMT-a, koje pronalaze sve delove DMT-a konveksne na gore ( $\cup$ ). Najčešće korišćen algoritam je baziran na prozoru veličine  $2 \times 2$  (ili  $3 \times 3$ ), koji u jednom prolazu kroz DMT setuje sve ćelije sa maksimalnom visinom - ćelije koje ostanu nepromenjene formiraju površinski tok. Rezultat ovakvog algoritma (slika 4.5 levo) može da se upotrebi za vizuelnu prezentaciju mogućih tokova vode, dok je za dalje korišćenje neophodna dodatna obrada (povezivanje kratkih segmenata, stanjivanje linije, itd. [5]).
2. Metode bazirane na praćenju pravaca maksimalnih nagiba, u rasterskom DMT-u [15, 36, 45]. Proračun se vrši za svaku ćeliju DMT-a, tako što se prati put toka vode od ćelije do ćelije, u pravcu maksimalnih nagiba uz kumulativno skupljanje vode sa usputnih ćelija. Praćenje toka se završava ili dolaskom do kraja sliva ili nailaskom na depresiju.

Količina akumulirane vode u ćeliji, nakon završenog proračuna, pokazuje broj uzvodnih ćelija u odnosu na datu ćeliju. Sloj sa ovim podacima se zove slika sumarnih dotoka.<sup>3</sup> Na osnovu slike sumarnih dotoka, određuje se slika površinskog toka vode, uzimanjem u obzir samo onih ćelija koje imaju uzvodnu površinu (odnosno dotok) veći od neke određene granice.

3. Metode bazirane na praćenju pravaca maksimalnih nagiba, u TIN sistemu [18, 31, 38, 64] su u principu slične metodi sa slikom sumarnih dotoka u rasterskom sistemu: polazeći od težišta svakog trougla, prati se put vode do kraja sliva ili do depresije (slika 4.5 desno). Ova metoda se ne koristi u informatičkom modelu OUP-a, jer su svi podaci u grid sistemu (osim polaznog DMT-a koji se formira interpolacijom iz TIN-a).

Pored ovih načina, u poslednje vreme se intenzivno radi i na primeni sistema baziranih na neuronskim mrežama [40]. Zbog nedostatka opšte teorije funkcionisanja

<sup>3</sup>Na engleskom jeziku *flow accumulation image*.

neuronskih mreža kao i zbog kompleksnosti prirodnih i urbanih terena, njihova primena u projektima OUP-a za potrebe automatskog određivanja pravaca površinskog tečenja još uvek nije realna.

3.20	3.25	3.27	3.27	3.23	3.17	<del>198</del>	<del>196</del>	<del>185</del>	<del>168</del>	<del>151</del>	<del>146</del>	0	0	0	0	0	0
3.07	3.13	3.17	3.17	3.15	3.08	<del>205</del>	<del>204</del>	<del>193</del>	<del>172</del>	<del>152</del>	<del>146</del>	2	1	1	1	1	2
2.92	3.02	3.08	3.09	3.06	2.98	<del>212</del>	<del>213</del>	<del>202</del>	<del>172</del>	<del>148</del>	<del>145</del>	3	3	2	2	1	3
2.77	2.90	2.99	3.01	2.96	2.85	<del>219</del>	<del>222</del>	<del>212</del>	<del>169</del>	<del>141</del>	<del>142</del>	5	4	1	3	2	3
2.61	2.78	2.90	2.93	2.85	2.70	<del>226</del>	<del>221</del>	<del>220</del>	<del>162</del>	<del>132</del>	<del>134</del>	7	4	1	3	4	5

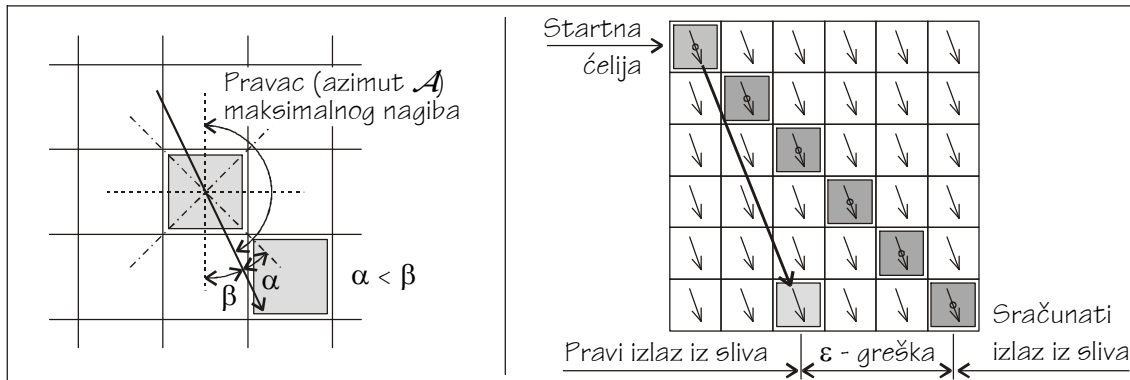
Slika 4.6: Matrica visina [u metrima](levo) na osnovu koje su određeni pravci maksimalnih nagiba [azimut, stepeni u odnosu na sever u smeru kazaljke na satu](sredina) i slika sumarnih dotoka [broj uzvodnih ćelija](desno)

U razvijenom informatičkom modelu OUP-a, koristi se modifikovana verzija druge metode. Nakon korekcije DMT-a i uklanjanja depresija, prateći put vode za svaku ćeliju, formira se slika sumarnih dotoka (slika 4.6). Pri tome, moguća su dva načina proračuna: prvi je isključivo orijentisan ka grid strukturi podataka gde se smatra da je sva zapremina vode skoncentrisana u centru ćelije i kretanje vode niz DMT ide od centra uzvodne do centra nizvodne ćelije, i drugi, gde je voda ravnomerno raspoređena po ćeliji i postoji jedinstvena tačka ulaza i tačka izlaza. U toku izrade informatičkog modela OUP-a, krenulo se od prvog načina proračuna, koji je standardno prihvaćen od mnogih autora. Zbog velikih grešaka koje se unose u proračun, posebno kod velikih setova podataka sa finim gridom, usvojen je, međutim, uz određene modifikacije, drugi način proračuna.

### 4.2.3 Slika sumarnih dotoka - grid orijentisani proračun

Za proračun slike sumarnih dotoka, prvo je razvijen algoritam praćenja nagiba terena, koristeći isključivo grid sistem. U literaturi se standardno nalazi uprošćena verzija proračuna, u kojoj se smatra da je najniža susedna ćelija istovremeno i nizvodna, a ako postoje dve ili više okolnih ćelija sa istom visinom, voda se deli na dva ili više delova. Ovakvo određivanje nizvodnih ćelija je podložno lokalnim greškama, pa je algoritam korigovan tako da se nizvodna ćelija određuje na bazi sloja pravaca maksimalnih nagiba.

Na slici 4.7 levo, prikazan je način određivanja nizvodne ćelije: za sračunat pravac maksimalnog nagiba, odrede se okolne ćelije koje mogu da prime vodu (na slici su to jugoistočna i južna ćelija). Zatim, analiziraju se uglovi između centara tih ćelija (na slici  $\alpha$  i  $\beta$ ) i kao nizvodna ćelija se uzima ona čiji je ugao manji.



Slika 4.7: Način određivanja nizvodne ćelije u grid orijentisanom sistemu kreiranja slike sumarnih dotoka (levo) i greška u proračunu koja je rezultat algoritma koji uzima u obzir samo 8 susednih ćelija (desno)

Metodologija određivanja slike sumarnih dotoka zahteva praćenje vode od svake ćelije do kraja moguće putanje. Da bi se izbegla višestruka analiza u traženju nizvodnih ćelija, u razvijenom programu se prvo kreira pomoćni sloj sa podacima o nizvodnim susedima. U pomoćnom sloju se primenjuje binarna tehnika kodiranja: za svaki pravac, počev od severa u smeru kazaljke na satu, “pali” se po jedan bit u osmobitnom broju: sever=001, severoistok=002, istok=004, ..., severozapad=128 (na slici 4.7 levo, vrednost u pomoćnom sloju za analiziranu ćeliju bi bila 008).

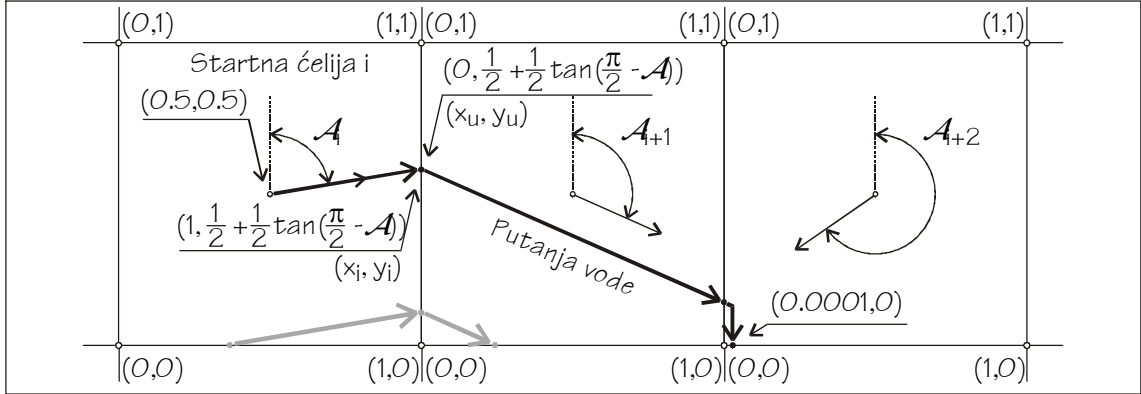
Kada se odredi pomoćni sloj nizvodnih suseda, u daljem proračunu nije potrebno obavljati spore matematičke operacije i poređenja realnih brojeva. U svakom koraku, “ide” se kroz pomoćni sloj i beleži se u slici sumarnih dotoka broj prolazaka kroz svaku ćeliju. Algoritam je izuzetno brz i omogućava jednostavnu paralelizaciju.

Primenjeni algoritam ima, međutim, i jedan veliki nedostatak. U svakom koraku proračuna, voda se “prebacuje” iz uzvodne ćelije u ranije određenog nizvodnog suseda. U sledećem koraku, smatra se da je sva voda skoncentrisana u centru te nizvodne ćelije, čime se gubi važan deo informacije o stvarnom mestu ulaska vode u ćeliju. Na desnom delu slike 4.7 je prikazan rezultat praćenja toka vode po površini terena, za konstantan pravac (azimut) maksimalnog nagiba od  $157.4^{\circ}$ . U pomoćnom sloju nizvodnih suseda, svaka ćelija će imati vrednost 008, te će rezultat proračuna biti da sva voda sa startne ćelije završava u donjem desnom uglu, kao da je pravac maksimalnog nagiba bio  $135^{\circ}$ . Greška u određivanju izlaza je  $\epsilon = (1 - \tan 22.6^{\circ}) \times d$ , gde je  $d$  dužina putanje, odnosno 58% pređene putanje.

#### 4.2.4 Slika sumarnih dotoka - vektorski orijentisani proračun

Velika prostorna greška u grid orijentisanom algoritmu se može u potpunosti izbeći, ukoliko se u svakom koraku vodi računa o stvarnim koordinatama tačaka kroz koju je voda ušla i kroz koju je izašla iz neke ćelije. Na taj način, voda u okviru ćelije se posmatra kao tačka bez mase (samim tim i bez inercije) koja prati

pravce maksimalnih nagiba ćelija preko kojih teče.<sup>4</sup> Jasno je da jedna ista ćelija može imati bezbroj ulaznih tačaka (kao i izlaznih), tako da nije moguće unapred pripremiti pomoćni sloj suseda, kao kod grid orijentisanog proračuna, pa je samim tim i proračun mnogo sporiji.



Slika 4.8: Način određivanja putanje vode po terenu u vektorski orijentisanom proračunu. Putanja vode označena crnom linijom je za startnu ćeliju  $i$ , dok je sivom linijom prikazana putanja za neku drugu startnu ćeliju

Na slici 4.8 je prikazan osnovni princip proračuna. Za svaku ćeliju kroz koju prolazi voda, postavlja se lokalni koordinatni sistem. Voda kreće iz centra ćelije, u pravcu maksimalnog nagiba datog azimutom  $\mathcal{A}$ , do kraja ćelije gde je “tačka izlaza”  $(x_i, y_i)$ :

$$(x_i, y_i) = \begin{cases} (1, \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \tan(\frac{\pi}{2} - \mathcal{A}_i)) & \pi/4 < \mathcal{A}_i \leq 3\pi/4 & \text{za istočni izlaz} \\ (\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \tan(\pi - \mathcal{A}_i), 0) & 3\pi/4 < \mathcal{A}_i \leq 5\pi/4 & \text{za južni izlaz} \\ (0, \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \tan(\frac{3\pi}{2} - \mathcal{A}_i)) & 5\pi/4 < \mathcal{A}_i \leq 7\pi/4 & \text{za zapadni izlaz} \\ (\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \tan(2\pi - \mathcal{A}_i), 1) & -\pi/4 < \mathcal{A}_i \leq \pi/4 & \text{za severni izlaz} \end{cases} \quad (4.1)$$

U sledećoj ćeliji, koja deli granicu sa startnom ćelijom na kojoj leži  $(x_i, y_i)$ , tačka izlaza postaje tačka ulaza  $(x_u, y_u)$ . Tačka ulaza je definisana lokalnim koordinatnim sistemom sledeće ćelije. Odnos između izlazne i ulazne tačke je:

$$\begin{aligned} \text{Izlaz } (1, t) & \text{ teče prema istočnoj ćeliji sa ulazom } (0, t) \\ \text{Izlaz } (t, 0) & \text{ teče prema južnoj ćeliji sa ulazom } (t, 1) \\ \text{Izlaz } (0, t) & \text{ teče prema zapadnoj ćeliji sa ulazom } (1, t) \\ \text{Izlaz } (t, 1) & \text{ teče prema severnoj ćeliji sa ulazom } (t, 0) \end{aligned} \quad (4.2)$$

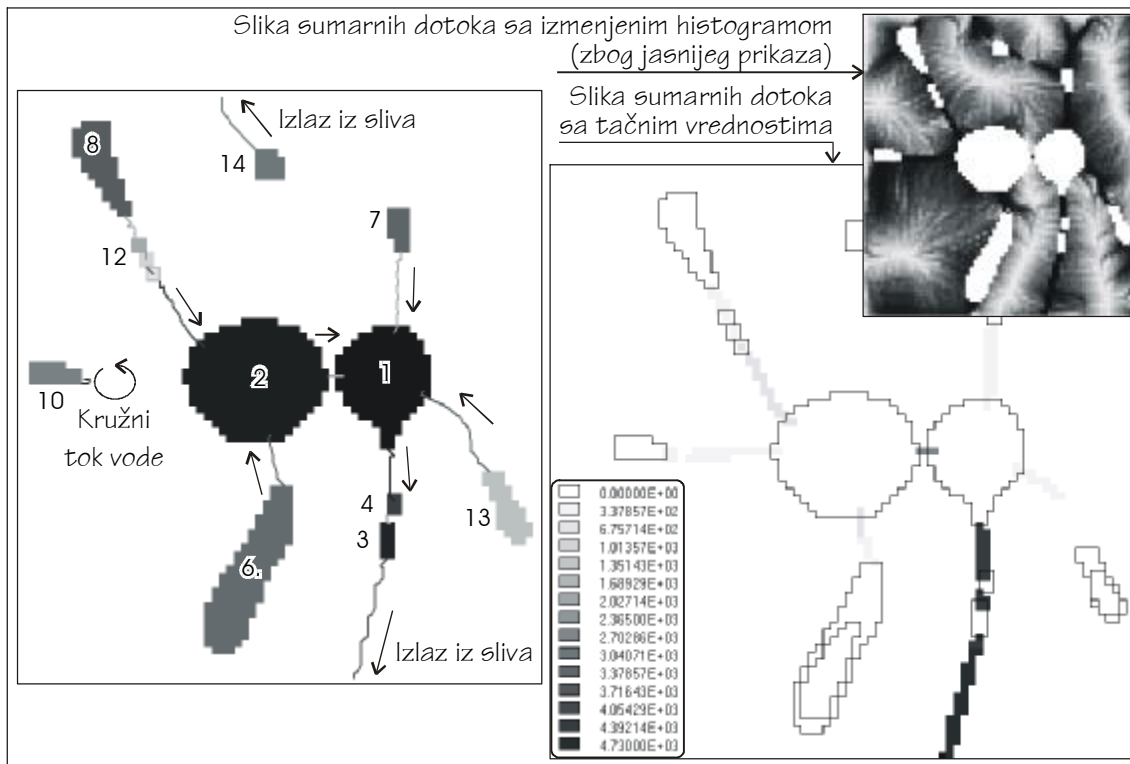
gde je  $t$  položaj duž jedne od ivica, u intervalu  $0 \leq t \leq 1$ . Izlaz iz sledeće ćelije se dobija u preseku prave, koja prolazi kroz  $(x_u, y_u)$  sa azimutom  $\mathcal{A}_{i+1}$ :

$$(y - y_u) = \tan(\frac{\pi}{2} - \mathcal{A}_{i+1})(x - x_u) \quad (4.3)$$

<sup>4</sup>U ovom radu je usvojen naziv *vektorski orijentisan proračun* jer se vodi računa o koordinatama tačaka a ne o ćelijama. Moguće je ovaj tip proračuna nazvati još i *kinematsko rutiranje* [45], prema analogiji sa modelom kinematskog talasa, tokom koji je samo pod uticajem sile gravitacije i sile trenja.

sa najbližom od ivica ćelije. Ako je azimut  $\mathcal{A}$  takav, da je presek na istoj ivici kao što je i tačka ulaska u ćeliju (primer je treća ćelija na slici 4.8), odnosno, ako dve ćelije imaju nagibe jedna prema drugoj, tada se voda prosleđuje duž granice, u smeru pozitivne komponente nagiba.

Praćenjem toka vode po površini, može se doći u situaciju da četiri ćelije imaju nagibe prema zajedničkoj tački, u kom slučaju ne postoji izlazna tačka. Takva tačka se naziva “tačka nagomilavanja” i, najverovatnije, predstavlja dno neke depresije. Takođe, postoji mogućnost da tok bude kružan, da posle određenog broja ćelija voda dođe do ćelije kroz koju je već prošla. Da bi se otkrila takva situacija, neophodno je u toku proračuna čuvati spisak svih ćelija kroz koje je voda već prošla. Naravno, ako se proračun obavlja koristeći DMT bez depresija, broj ovakvih problema bi trebao da bude minimalan.



Slika 4.9: Rezultat povezivanja svih depresija u DMT-u sa slike 4.3 (levo) i slika sumarnih dotoka sa korišćenjem podataka o vezi depresija (desno)

Sam program za određivanje slike sumarnih dotoka se može podeliti u dva dela: prvi deo prati tok vode koja izlazi iz svih depresija i formira topološki uređenu strukturu povezanih depresija, određenih u fazi kreiranja DMT-a bez depresija (levi deo slike 4.9), dok drugi deo programa prati tok vode polazeći od svake ćelije usvojenog grida i sabira broj prolazaka kroz svaku od ćelija, praveći sliku sumarnih dotoka (desni deo slike 4.9). Podelom programa na dva dela, postiže se, pored povezivanja depresija u uređenu strukturu, znatno ubrzanje rada programa u drugom delu: kada

tok vode dođe do ivice bilo koje depresije, sva voda se automatski prosleđuje do izlaza iz depresije, pa se na dalje koriste veze depresija do konačnog izlaza sa sliva. Polazeći od DMT-a bez depresija, kao i svih podataka o depresijama, algoritam programa je sledeći:

1. Kreiraj sliku maksimalnih nagiba.
2. Proveri da li postoje podaci o depresijama. Ako postoje, napravi vezu između depresija. Za svaku od depresija:
  - (a) Startna tačka za proračun toka vode je sredina izlazne ćelije iz depresije. Kreiraj novu listu putanje, ćelija koje su deo toka vode iz depresije.
    - Idući nizvodno, računaj izlazne tačke iz ćelija. U listu putanje dodaj ćelije preko kojih voda prođe.
    - U svakom koraku proveri da li je tok vode došao do kraja slike, do druge depresije, do ćelije u kojoj je već bio (kružni tok) ili do tačke nagomilavanja.
    - Slučaj nagomilavanja pokušaj da rešiš na osnovu nagiba okolnih ćelija.
  - (b) Za svaki od slučajeva kraja toka, zabeleži odgovarajući kod i idi na sledeću depresiju. Ako je kraj puta istovremeno početak sledeće depresije, zabeleži njen broj. Idi na korak 2a.

Na osnovu izračunatih putanja vode od svake depresije, koje se nalaze u listi putanja, formiraj uređenu strukturu depresija i snimi u datoteku. Takođe, snimi i putanje vode kao i kodove.

3. Inicijalizuj sliku sumarnih dotoka, stavljajući 0 u svaku ćeliju.
4. Za svaku ćeliju DMT-a odredi putanju vode:
  - (a) Kao i u analizi toka vode iz depresija, kreiraj listu putanja.
    - Prati tok vode, u listu putanja dodaj obrađene ćelije.
    - U svakom koraku proveri da li je kraj putanje, kružni tok, postojanje tačke nagomilavanja (koju pokušaj da rešiš) ili je dodirnuta depresija.
  - (b) Ako je kraj putanje u depresiji, prosledi vodu do izlaza iz depresije i preuzmi već određene putanje do kraja slike.
  - (c) Uvećaj vrednosti u ćelijama slike sumarnih dotoka, na osnovu liste putanja.
  - (d) Obriši listu putanja. Idi na sledeću ćeliju, korak 4a.
5. Snimi u izlaznu datoteku sliku sumarnih dotoka i sve otkrivene tačke nagomilavanja.

Kao rezultat programa za kreiranje slike sumarnih dotoka, dobijaju se sledeći slojevi informatičkog modela OUP-a:

- Slika sumarnih dotoka. Rasterski sloj. Vrednost u svakoj ćeliji predstavlja broj uzvodnih ćelija.
- Veza između depresija. Vektorski sloj, orijentisana linija od uzvodne ka nizvodnoj depresiji.
- Veza između depresija. Tekstualna datoteka sa kodovima, kojima se uređuje topološka povezanost.
- Koordinate tački nagomilavanja. Vektorski sloj, tačke. U korektnom DMT-u bez depresija, ne bi trebalo da postoji ni jedna tačka nagomilavanja!

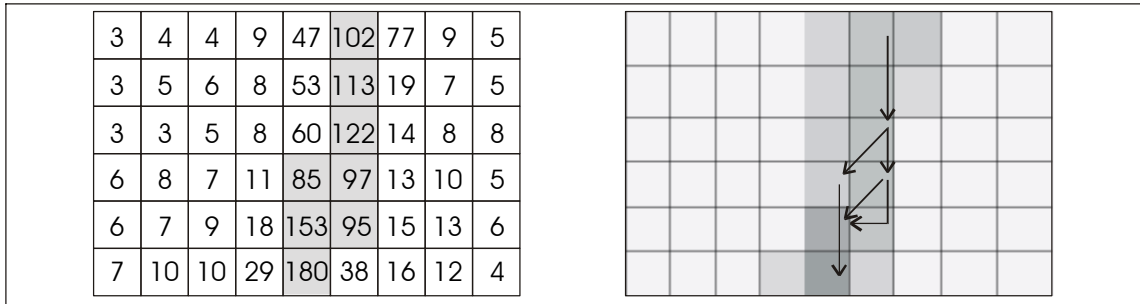
Osnovni nedostatak vektorskog pristupa u kreiranju slike sumarnih dotoka je relativno spor proračun. Ako DMT nema većih depresija, vreme izvršavanja je za red veličine veće od ostalih GIS operacija. Sam algoritam dozvoljava paralelizaciju, kreiranjem i istovremenim startovanjem više procesa koji prate tok vode od bilo koje ćelije do izlaza, ali je za stvarni dobitak u vremenu neophodno raditi na računaru sa više procesora.

U primeni programa, isprobano je još nekoliko mogućnosti za ubrzanje proračuna, od kojih su najinteresantnije dve:

1. U kreiranju slike sumarnih dotoka, standardno se kreće redom od svake ćelije pa do kraja putanje. Moguće je koristiti svaku  $n$ -tu ćeliju kao startnu, a zatim sve ostale kao prolazne. Ukupno vreme izvršavanja se skraćuje  $n$  puta. Treba voditi računa da slika sumarnih dotoka više ne pokazuje tačnu površinu svih uzvodnih ćelija, ali je struktura tokova ostala ista.
2. Kao startne ćelije mogu se koristiti i tačke koje leže sa obe strane prevoja na DMT-u. Lokalnim postupkom, koristeći prozor veličine  $2 \times 2$  i selektujući u jednom prolazu sve ćelije sa minimalnom visinom, dobijaju se svi prevoji. U sledećem prolazu kroz sliku prevoja, potrebno ih je proširiti po obodu za po jedan piksel. Tako kreirana slika se onda koristi kao informacija da li se određena ćelija koristi u proračunu toka vode ili ne. Ukupno ubrzanje zavisi od strukture terena.

Interesantan je i sporedni efekat primene vektorskog pristupa, koji kasnije može da iskomplikuje postupak obrade slike sumarnih dotoka: voda iz jedne ćelije ne ide uvek u istu nizvodnu ćeliju (što nije slučaj kod rasterskog pristupa). Na slici 4.8, crnom linijom je označena putanja vode ako je  $i$ -ta ćelija startna. Iz  $(i + 1)$ -ve ćelije, voda odlazi u istočnu,  $(i + 2)$ -gu ćeliju. Za neku drugu startnu ćeliju, voda će ući u  $i$ -tu ćelju sa južne strane (siva linija) i napustiti  $(i + 1)$ -vu ćeliju na južnoj strani.

Rezultat ovakve podele vode je da u slici sumarnih dotoka, idući u pravcu globalnog toka i prateći samo po jednu ćeliju, broj uzvodnih ćelija (odnosno, količina vode



Slika 4.10: Severoistočni deo sloja sumarnih dotoka prikazanog na slici 4.9 desno, u formi matrice gde brojevi predstavljaju ukupan broj uzvodnih ćelija (levo) i kodirano intenzitetom crne boje (desno)

ili uzvodna površina) nije monotono rastuća funkcija. Na slici 4.10 je dat uvećan detalj iz sloja sumarnih dotoka sa slike 4.9. U matrici brojeva, koji predstavljaju ukupan broj uzvodnih ćelija, vidi se glavni pravac toka vode kroz rast vrednosti: 100, 113, 122. Prva sledeća ćelija posle 122, međutim, ima manji broj, 97, da bi nizvodno taj broj opet počeo da raste.

#### 4.2.5 Slika površinskog toka vode

Vrednost svake ćelije u slici sumarnih dotoka je jednaka broju uzvodnih ćelija, odnosno, ako se pomnoži sa jediničnom površinom, ukupnoj uzvodnoj površini sliva. Da bi se kreirala slika površinskog toka vode, potrebno je reklasifikovati sliku sumarnih dotoka prema sledećem kriterijumu:

$$PT_i = \begin{cases} 0 & N_i \leq N_{GR} \\ 1 & N_i > N_{GR} \end{cases} \quad (4.4)$$

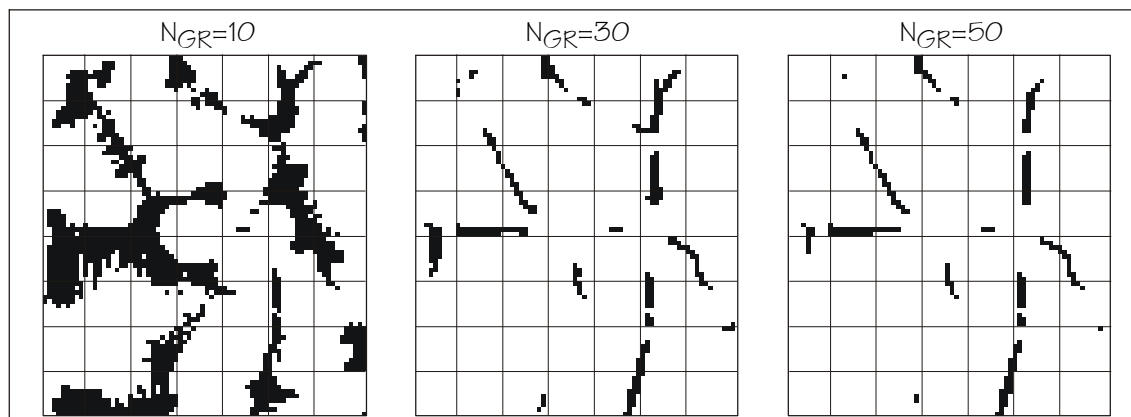
gde je  $PT_i$  vrednost u  $i$ -toj ćeliji u slici površinskog toka vode,  $N_i$  broj uzvodnih ćelija u slici sumarnih dotoka i  $N_{GR}$  granična vrednost broja uzvodnih ćelija<sup>5</sup> ispod koje se ne formira površinski tok (odnosno, granična vrednost uzvodne površine).

Na slikama 4.11 i 4.12 su dati primeri reklasifikacije sloja sumarnih dotoka, za različite granične vrednosti. Na prvoj slici je dat prikaz površinskog toka vode za DMT sa slike 4.3, nastao reklasifikacijom sloja sumarnih dotoka sa slike 4.9. Kako je DMT urbanog područja rezolucije  $1 \times 1$  m, sa dve velike i nekoliko manjih depresija, površinska mreža nije razgranata. Na drugoj slici, međutim, prikazan je tipični ruralni sliv, sa ćelijom veličine  $250 \times 250$  m, ukupne slivne površine  $708.5 \text{ km}^2$  [99], sa veoma razgranatom mrežom površinskih kanala. Korišćenjem različitih graničnih vrednosti u reklasifikaciji slike sumarnih dotoka, dobija se više ili manje složena površinska mreža.

Iz data dva primera može se videti da je granična vrednost broja uzvodnih ćelija (ili uzvodne slivne površine) važan parametar u obradi slike sumarnih dotoka.

<sup>5</sup>Na engleskom jeziku *threshold area*.





Slika 4.11: Slika površinskog toka vode, za tri različite granične vrednosti broja uzvodnih ćelija primenjenih na sloj sumarnih dotoka, datog na slici 4.9 (pomoćni raster na svim slikama je  $10 \times 10$  m)

Oblašću određivanja optimalne granične vrednosti se uglavnom bave hidrolozi, analizirajući ruralne slivove velikih površina [95, 99]. Polazna ideja je da se granična vrednost odredi tako da se dobije površinska mreža najviše rezolucije (ili gustine) pri čemu su još uvek zadovoljeni zakoni skaliranja koji su tradicionalno određeni za prirodne vodotoke. Pri tome, najčešće se koristi “Horton-ov zakon”<sup>6</sup> [34] prema kome je odnos broja kanala, dužine kanala, pripadajućih slivnih površina i nagiba kanala približno konstantan između kanala koji pripadaju susednim kategorijama (rangovima).

Pored klasične analize parametara sliva, da bi se odredila granična vrednost broja uzvodnih ćelija koristi se i teorija fraktala. Koristeći spektar  $f(\alpha)$  fraktalnih dimenzija analizira se “funkcija širine” toka<sup>7</sup> [100] ili ukupna dužina mreže kanala  $L_C$  koja eksponencijalno zavisi od fraktalne dimenzije  $D_f$  i uzvodne slivne površine  $S_a$  [35]:

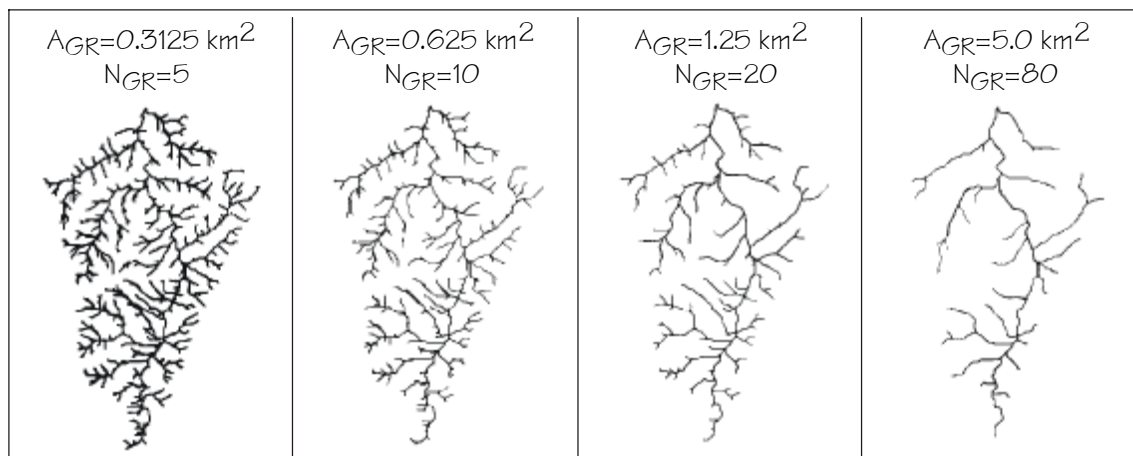
$$L = k e^{-D_f S_a} \quad (4.5)$$

Zajedničko za sve dosadašnje radove je, da su kao osnovu koristili DMT velikih ruralnih slivova, sa gustom, prirodno izdiferenciranom i razgranatom mrežom vodotoka. Skaliranje metodologije sa ruralnih na manje, urbane slivove, nije prihvatljivo, jer je mreža površinskih kanala u urbanim uslovima pre svega određena DMT-om koji nije posledica prirodnih procesa, već veštački napravljenim objektima.

U razvijenom informatičkom modelu se problemu određivanja granične vrednosti broja uzvodnih ćelija prilazi na nešto drugačiji način: umesto praćenja opštih ka-

<sup>6</sup>R.E. Horton (1932/1945) je uveo nizvodni sistem kategorizacije prirodnih vodotoka, koji je kasnije revidovao A.N. Strahler (1952/1957). Prema toj kategorizaciji, ustanovljeno je da je odnos karakteristika slivova za vodotoke susedne kategorije (ranga) približno konstantan [94], pa je S.A. Schumm (1956) to nazvao Horton-ovim zakonima: Zakon o broju tokova i Zakon dužine tokova.

<sup>7</sup>Funkcija širine toka se definiše kao raspodela broja kanala u zavisnosti od njihove udaljenosti od izlaza sa sliva.



Slika 4.12: Slika površinskog toka vode za sliv veličine  $708.5 \text{ km}^2$ , Hime River, Japan [99], sa graničnim vrednostima uzvodnih površina  $0.3125 \text{ km}^2$ ,  $0.625 \text{ km}^2$ ,  $1.25 \text{ km}^2$  i  $5 \text{ km}^2$  (sa leva na desno)

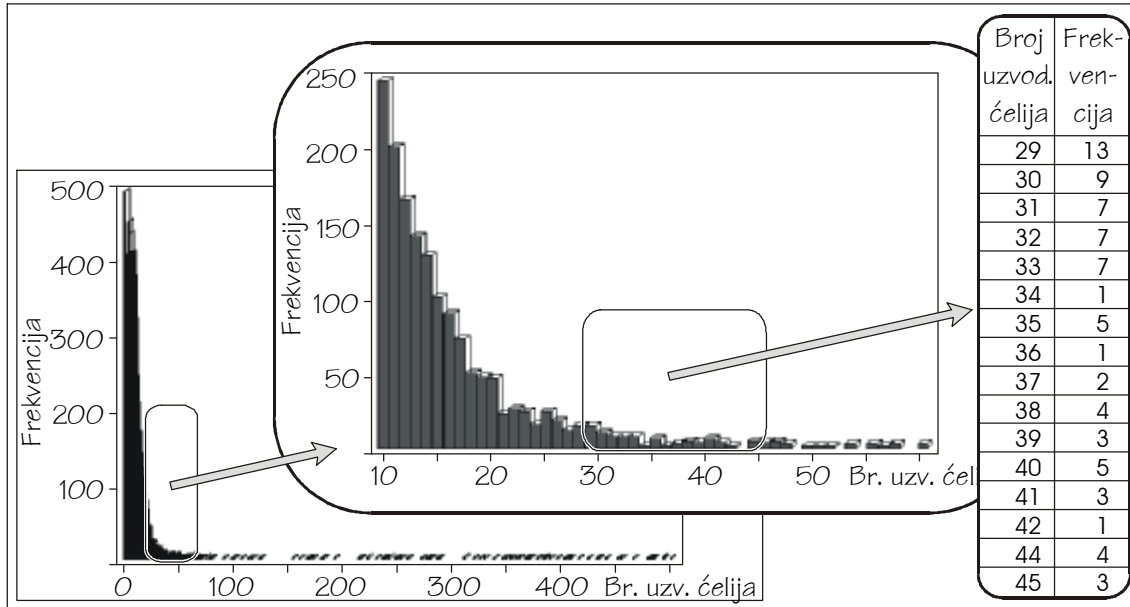
rakteristika sliva, analizira se histogram sloja sumarnih dotoka. Na slici 4.13 je dat histogram za sloj sumarnih dotoka sa slike 4.9. Na apscisi je broj uzvodnih ćelija, sa klasama širine 1, a na ordinati frekvencija, odnosno ukupan broj ćelija koje imaju  $N$  uzvodnih ćelija.

Analizom histograma, može se videti da broj ćelija koje imaju mali broj uzvodnih ćelija  $N$  (malu uzvodnu slivnu površinu) u zoni od  $1 \leq N \leq 30$  naglo pada, da bi se u zoni  $35 \leq N \leq 60$  ustalio. Na istoj slici je prikazan i uvećan deo histograma kao i odgovarajući numerički podaci. Kao granična vrednost broja uzvodnih ćelija, može se uzeti tačka prevoja histograma, mesto gde se nagib linije naglo smanjuje.

Na slici 4.14 levo, ponovljen je uvećani deo histograma, gde su prikazani sirovi podaci (puna linija) kao i osrednjeni (isprekidana linija). Na istoj slici, desno, dat je nagib linije histograma. Granični broj uzvodnih ćelija se određuje kao broj pri kome se nagib linije histograma smanjio za 99% od svoje maksimalne vrednosti. Za date podatke i koristeći fitovani deo nagiba histograma (siva linija), dobija se  $N_{GR} = 32$ .

Na osnovu histograma slike sumarnih dotoka sa jediničnom širinom klase (kao na slici 4.14 gde je  $N_{i+1} - N_i = 1$ ), određujući granični broj uzvodnih ćelija, praktično se odlučuje koji je teorijski maksimalan broj kategorija koji će biti zastupljeni u površinskoj mreži. Stvarni broj kategorija će biti jednak teorijskom samo ako sve ćelije imaju jedinstven izlaz iz sliva. Kod urbanih sistema, osnov za formiranje granice celokupnog sliva nije neporemećeni prirodni tok, pa po pravilu postoji više od jedne izlazne tačke (u primeru sa slike 4.9 postoje dva veća izlaza i više malih, sa slivnom površinom manjom od 5 ćelija).

Nakon izbora granične vrednosti broja uzvodnih ćelija, može se pristupiti reklasifikaciji slike sumarnih dotoka prema izrazu 4.4. Na gornjem delu slike 4.15 je prikazan rezultat primene reklasifikacije sa graničnom vrednošću  $N_{GR} = 100$ . Međutim, primena jednostavne reklasifikacije često dovodi do kreiranja jednog broja

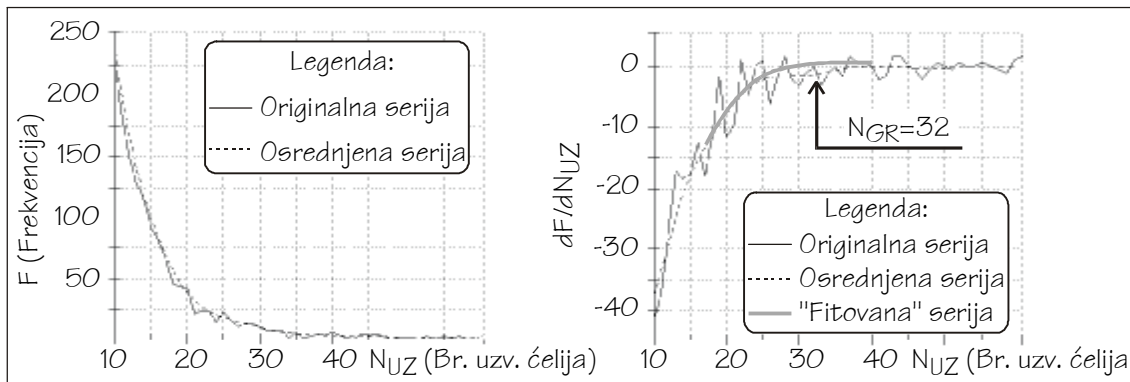


Slika 4.13: Histogram sloja sumarnih dotoka, datog na slici 4.9

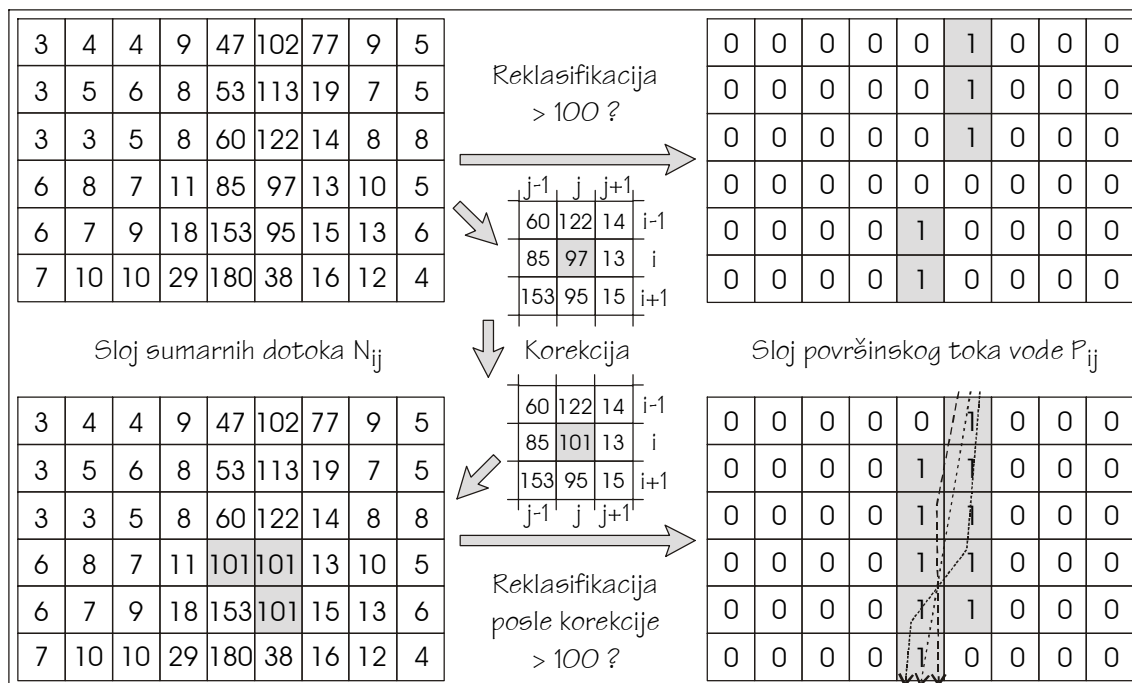
kraćih nepovezanih segmenata u uzvodnim delovima sliva. Razlog za to je primena vektorskog pristupa u proračunu slike sumarnih dotoka, gde je moguće da nizvodna ćelija ima manju slivnu površinu od njene uzvodne ćelije (videti sliku 4.10).

Da bi se smanjio broj nepovezanih uzvodnih segmenata, potrebno je pre reklasifikacije izvršiti korekciju slike sumarnih dotoka. Primenjuje se uslovni filter veličine  $3 \times 3$  na svaku ćeliju:

$$N_{i,j} = \begin{cases} N_{GR} + 1 & \text{za } 0.5 \times N_{GR} < N_{i,j} \leq N_{GR} \\ & \text{i } N_{GR} < \max(N_{i-1,j-1}, N_{i-1,j}, \dots, N_{i+1,j}, N_{i+1,j+1}) \leq 2 \times N_{GR} \\ N_{i,j} & \text{u svim ostalim slučajevima} \end{cases} \quad (4.6)$$



Slika 4.14: Uveličani deo histograma sloja sumarnih dotoka sa slike 4.13 (levo) i nagib dela histograma (desno)



Slika 4.15: Reklasifikacija sloja sumarnih dotoka datog na slici 4.10 bez  $i$  sa primenom lokalne korekcije

Na donjem delu slike 4.15 je prikazan rezultat korekcije kao i slika površinskog toka vode na osnovu reklasifikacija tako korigovanih podataka.

Do konačnog kreiranja kvalitetne slike površinskog toka, ostao je još jedan važan korak. Naime, posle reklasifikacije slike sumarnih dotoka, rasterska slika površinskog toka, mada vizuelno prihvatljiva, numerički ne daje jednoznačno rešenje za položaj čvorova (spojeva kanala) i samih kanala. Na slici 4.15 (desno dole) se može videti da postoji beskonačno puno mogućih položaja kanala u okviru ćelija koje su označene kao deo površinske mreže.

Slika površinskog toka vode daje jednoznačnu mrežu kanala ako svaka ćelija ima samo jednu nizvodnu ćeliju. Da bi se to postiglo, nakon reklasifikacije slike sumarnih dotoka, primenuje se postupak stanjivanja<sup>8</sup> (mršavljenja) linije do širine od jedne ćelije.

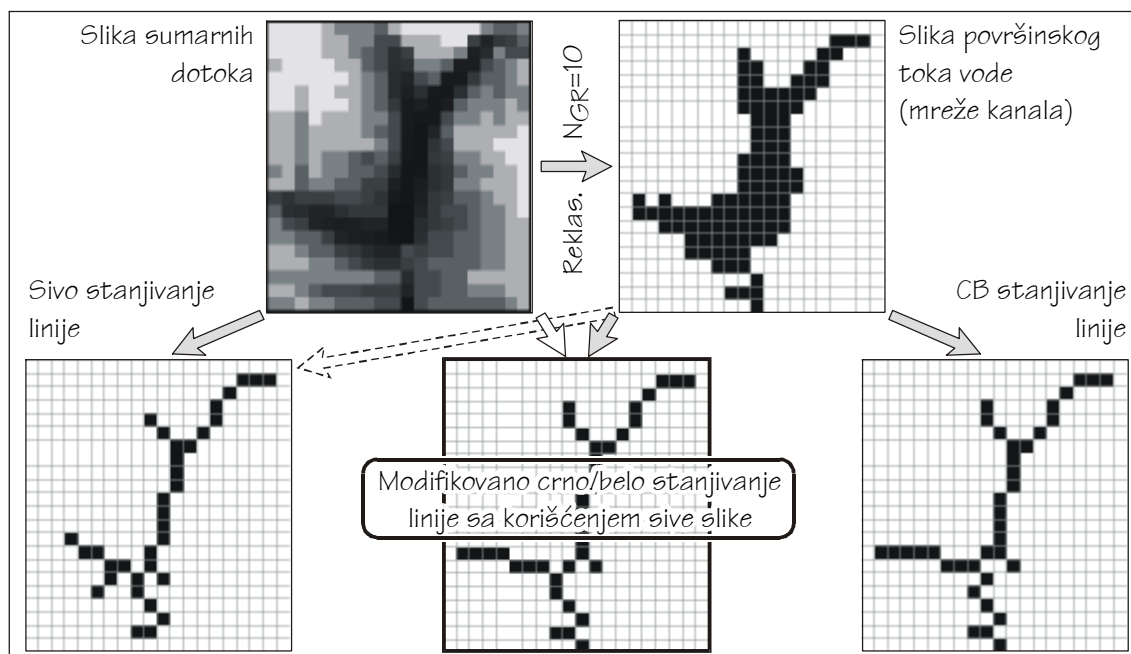
U prvoj verziji programa razvijenog za informatički model OUP-a, urađen je iterativni, lokalno-paralelni postupak sa prozorom  $3 \times 3$  [5]. Algoritam se primenjuje nad binarnom slikom, u kojoj je vrednost u svakoj ćeliji ili 1 (crna boja) ili 0 (bela boja).<sup>9</sup> U svakoj iteraciji, naizmenično se analizira slika sa severne, istočne, južne i zapadne strane i donosi se odluka da li se briše granična ćelija. Ćelija se briše (iz 1-ice se pretvara u 0) samo ako nije krajnja tačka na liniji i ako se ne prekida

<sup>8</sup>Na engleskom *line thinning*.

<sup>9</sup>Postupak stanjivanja linije u kome se posmatraju samo dve moguće vrednosti ćelije se obično naziva crno/beli postupak (CB).

kontinuitet linije. Na primer, za ćeliju na severnoj granici, provera za brisanje je ( $\bar{P}_{i,j}$  binarno inverzna vrednost od  $P_{i,j}$ ):

$$\begin{aligned}
 &P_{i,j-1} \bar{P}_{i+1,j} P_{i,j+1} + \bar{P}_{i,j-1} P_{i-1,j-1} \bar{P}_{i-1,j} + \\
 &+ \bar{P}_{i-1,j} P_{i-1,j+1} \bar{P}_{i,j+1} + \bar{P}_{i,j+1} P_{i+1,j+1} \bar{P}_{i+1,j} + \\
 &+ \bar{P}_{i+1,j} P_{i+1,j-1} \bar{P}_{i,j-1} = \begin{cases} 0 & \text{briši ćeliju } P_{i,j} \\ 1 & \text{ne briši ćeliju } P_{i,j} \end{cases} \quad (4.7)
 \end{aligned}$$



Slika 4.16: Rezultat primene različitih algoritama za stanjivanje linije u slici površinskog toka vode

Na slici 4.16 je dat primer stanjivanja prema opisanom algoritmu. Reklasifikacijom slike sumarnih dotoka, kreira se crno/bela slika površinskog toka vode, koja se zatim crno/belom procedurom stanjivanja prevodi u sliku sa jednoznačnom mrežom površinskih kanala (rezultat je u donjem desnom uglu slike).

Opisana procedura stanjivanja linije se može koristiti u uslovima dobre izdiferenciranosti mreže površinskih tokova, kada treba obrisati relativno mali broj ćelija. Na terenima sa malim padom, kao i u urbanizovanim područjima gde veštački objekti uslovljavaju put vode, često se nakon reklasifikacije slike sumarnih dotoka dobijaju veće skupine ćelija bez izraženog pravca toka. Crno/bela procedura brisanja ne favorizuje ni jednu tačku, pa će u takvim slučajevima uvek ostaviti srednju liniju kao finalno rešenje.

Da bi se poboljšao kvalitet rada procedure za stanjivanje, neophodno je uvesti težinske koeficijente  $W_{i,j}$  prilikom donošenja odluke koja tačka na granici treba da se

obriše. Ti koeficijenti mogu biti bazirani na informacijama iz slike sumarnih dotoka ili iz DMT-a.

Druga verzija programa za stanjivanje linija je bazirana na algoritmima primenjenim u obradi digitalnih fotografija za potrebe prepoznavanja slova i određenih oblika [16]. Slika površinskog toka vode (crno/bela) se koristi kao maska za stanjivanje linija iz slike sumarnih dotoka (siva slika, vrednosti u ćelijama nisu ograničene samo na 1 i 0) koja, sada, ima ulogu težinskih koeficijenata  $W_{i,j}$ . Primenjuje se iterativni lokalno adaptivni postupak, u kome se analizira slika sa sve četiri strane, koristeći prozor veličine  $3 \times 3$ . U svakom koraku se računaju statistički parametri za sve ćelije unutar prozora a korisnik treba da unese faktor redukcije  $R$  ( $0.0 < R < 1.0$ ) kojim se daje manja ili veća težina statističkim vrednostima.

Na slici 4.16 dole, levo, prikazan je jedan od rezultata rada programa za sivo stanjivanje linije, za faktor redukcije  $R = 0.91$ . Algoritam je osetljiv na faktor redukcije u oblastima slike gde su vrednosti bliske graničnim vrednostima, tako da primenom drugih vrednosti faktora redukcije se dobijaju različiti rezultati. Mada je sivo stanjivanje najbliže fizici problema definisanja površinske mreže kanala, zbog osetljivosti na izbor faktora redukcije nije usvojeno kao standardni deo procedura u informatičkom modelu OUP-a.

Treća verzija programa, koja je konačno usvojena kao standardna procedura, je kompilacija prethodne dve: klasičnoj crno/beloj proceduri provere za brisanje ćelije (jednačina 4.7) je dodata još jedna provera:

$$\text{Ako je } N_{i,j} > 0.9 \times \max(N_{i,j-1}, N_{i,j+1}, N_{i-1,j}, N_{i+1,j}) \text{ ne briši ćeliju} \quad (4.8)$$

gde su  $N_{i,j}$  vrednosti ćelija u slici sumarnih dotoka. Ovom proverom se obezbeđuje nesimetrično stanjivanje linije, brišući je sa one strane gde su manje vrednosti u slici sumarnih dotoka i, time, zadržavajući glavni pravac toka vode.

Postupak stanjivanja se sprovodi iterativno, poštujući ograničenja 4.7 i 4.8, kao i uslov da se ne brišu početne tačke, sve dok se ne postigne da je broj obrisanih tačaka za sve strane slike nula. Algoritam programa za reklasifikaciju slike sumarnih dotoka i stanjivanje mreže površinskih kanala je sledeći:

1. Učitaj sliku sumarnih dotoka.
2. Napravi histogram sa širinom klase 1. Na osnovu histograma, pounudi korisniku vrednost za  $N_{GR}$ . Za uneto  $N_{GR}$  reklasifikuj sliku sumarnih dotoka u sliku površinskog toka.
3. Uradi stanjivanje linija u slici sumarnih dotoka:
  - (a) Setuj varijablu  $NacinBrisanja=BWiSivo$  kao indikator da se koriste i slika površinskog toka i slika sumarnih dotoka.
  - (b) Setuj varijablu  $BrojObrisanihCelija=0$  kao indikator broja obrisanih ćelija u jednom ciklusu.
  - (c) Setuj varijablu  $SmerSeverJug=Jug$  kao smer na vertikalnom pravcu (ide se od severa ka jugu).

- i. Setuj varijablu SmerZapadIstok=Istok kao smer na horizontalnom pravcu (ide se od zapada ka istoku).
  - ii. Za sve ćelije u slikama, poštujući pravce SmerSeverJug i SmerZapadIstok, pomeraj prozor  $3 \times 3$  i proveravaj da li centralna ćelija treba da se briše (ispunjenost uslova iz jednačine 4.7 i, ako je NacinBrisanja==BWiSivo,<sup>10</sup> iz jednačine 4.8).
  - iii. Ako je varijabla SmerZapadIstok==Istok, promeni je u SmerZapadIstok=Zapad i idi na korak 3(c)i.
- (d) Ako je SmerSeverJug==Jug, promeni u SmerSeverJug=Sever i idi na korak 3c.
- (e) Ako je BrojObrisanihCelija > 0, idi na korak 3b.
- (f) Ako je NacinBrisanja==BWiSivo, promeni u NacinBrisanja=BW i idi na korak 3b.
4. Prođi kroz sliku površinskog toka i pronađi sve ćelije koje imaju više od tri suseda. Pokušaj da to rešiš lokalnim zadebljavanjem i još jednom iteracijom stanjivanja.
5. Kraj proračuna. Snimi u uzlaznu datoteku sliku površinskog toka vode i izlistaj ćelije sa više od tri suseda.

Zbog ograničenja 4.8 kreirana slika po pravilu nije najtanja moguća, pa je u algoritmu dodat korak 3f kojim se, nakon korišćenja sive slike sumarnih dotoka, nastavlja sa klasičnom crno/belom procedurom. Na slici 4.16, donja srednja slika je kreirana ovom modifikovanom "crno/belo stanjivanje sa korišćenjem sive slike" procedurom.

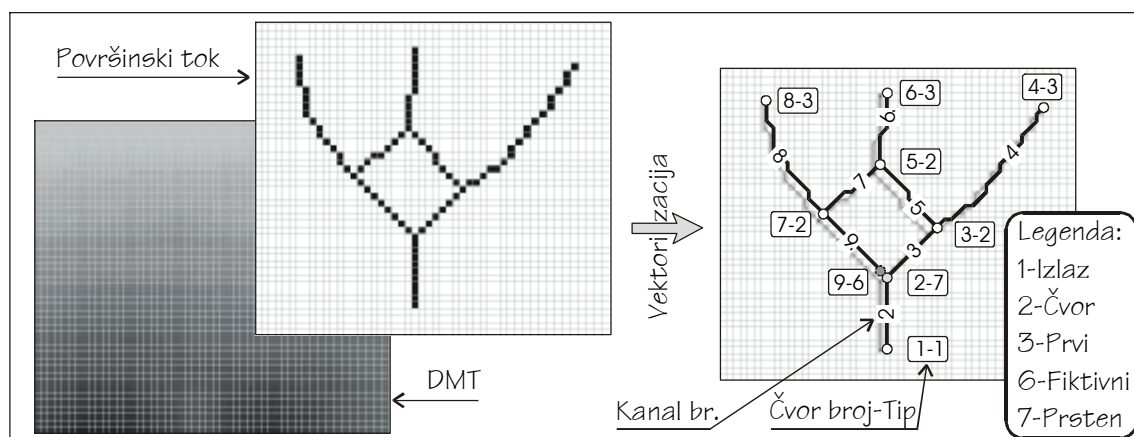
## 4.2.6 Vektorizacija slike površinskog toka

Rasterska slika površinskog toka (slike 4.11, 4.12 i 4.16) nosi u sebi samo vizuelnu informaciju, vrednost u svim ćelijama je ili 0 (ćelija ne pripada toku) ili 1 (ćelija je deo površinske mreže). Vektorizacijom takve slike, kreira se topološki uređena mreža površinskih kanala, sa koordinatama čvorova, brojevima kanala i njihovim uzvodnim i nizvodnim čvorovima, kotama i dužinama.

Algoritmi za vektorizaciju koji se standardno koriste, polaze od tri osnovne pretpostavke: površinska mreža kanala je granata (što je najčešće tačno za prirodne uslove), svaka nizvodna ćelija u slici sumarnih dotoka je veća od uzvodne (tačno za rasterski algoritam) i postoji jedan izlaz iz sliva. U razvijenom informatičkom modelu OUP-a nije ispunjen ni jedan od ta tri uslova: na urbanizovanim površinama, površinska mreža je često prstenastog tipa, zbog vektorskog pristupa u kreiranju slike sumarnih dotoka nizvodne ćelije nisu obavezno veće od uzvodnih, a i broj izlaza iz

<sup>10</sup>U prikazu algoritama znak == se koristi u skladu sa standardnom C konvencijom kao znak jednakosti, dok je znak = znak dodeljivanja vrednosti.

urbanog sliva je veći. Zbog ovih razloga, razvijen je u potpunosti nov algoritam za vektorizaciju, koji radi i za urbane i ruralne slivove i ne zahteva interakciju sa korisnikom u toku svog rada.



Slika 4.17: Primer vektorizacije slike površinskog toka za prstenastu mrežu

Kao test razvijenog programa, na slici 4.17 je data prosta granata mreža, na terenu koji konstantno pada sa severa ka jugu. Sa desne strane je prikazan rezultat vektorizacije: segmenti toka, ili kanali, razdvojeni čvorovima koji su označeni prema svom tipu (izlaz iz mreže, normalan čvor, prvi čvor, fiktivni čvor, itd.). Algoritam programa koji obavlja vektorizaciju je:

1. Učitaj sliku površinskog toka i DMT.
2. Ako postoje informacije o depresijama:
  - Učitaj sliku depresija.
  - Kreiraj listu depresija, sa rednim brojem depresije na osnovu slike, koordinatama čvora koji je izlaz iz depresije (iz svake depresije postoji samo jedan izlaz) i imenom čvora (za sada je to -32768).
  - Krostabulacijom slike depresija i slike površinskog toka, nađi sve ulaze u svaku od depresija. Formiraj podliste ulaznih čvorova, njihove koordinate i imena (sa vrednosšću -32768) i ‘zakači’ ih na listu depresija.
3. Kreni duž slike površinskog toka. Kada nađeš ćeliju==1, znači da postoji nevektorizovana mreža (u toku vektorizacije, sve ćelije koje pripadaju obrađenim kanalima dobijaju broj jednak broju uzvodnog čvora):
  - (a) Od razmatrane ćelije idi duž mreže kanala u nizvodnom pravcu do najniže tačke. To je izlaz za deo mreže koji se obrađuje.
  - (b) Napravi novu strukturu koja će čuvati podatke o čvorovima.



- (c) Nađi sledeći čvor idući duž mreže uzvodno od razmatranog čvora. U posebnoj listi čuvaj koordinate svih pređenih tačaka.
  - (d) Ako čvor nije stari fiktivni: sačuvaj ga u strukturi čvorova, zapiši u datoteku koordinate tačaka kroz koje si prošao (to je jedan kanal) i zameni koordinate početne i završne tačke.
  - (e) Ako je čvor fiktivni: po potrebi dodaj još jedan fiktivni čvor u strukturi, napravi vezu u strukturi čvorova sa starim normalnim čvorom, proglasi stari čvor za prsten, zapiši u datoteku podatke o fiktivnom čvoru i ako treba fiktivnom kanalu.
  - (f) Ako je čvor prvi u mreži (najuzvodniji) ili ako je fiktivni, idi u nazad po mreži dok ne nađeš neobrađen segment mreže. Ako postoji neobrađeni segment, idi na korak 3c.
4. Da li su obrađene sve ćelije u slici površinskog toka? Ako nisu, idi na korak 3.
  5. Kraj vektorizacije. Snimi koordinate čvorova i podatke o kanalima i sliku površinskog toka sa brojevima jednakim imenima kanala.
  6. Ako postoje podaci o depresijama, uspostavi vezu između površinske mreže i depresija. U strukturi čvorova promeni tip čvora iz ‘‘Prvi’’ u ‘‘IzlazIzDepresije’’ i tip ‘‘Izlaz’’ u ‘‘UlazUDepresiju’’ U listi depresija, popuni imena čvorova prema imenima iz strukture. Snimi podatke o vezi između čvorova i depresija.
  7. Snimi tipove čvorova.

Ukoliko ne postoje slojevi sa podacima o depresijama, rezultati programa za vektorizaciju su:

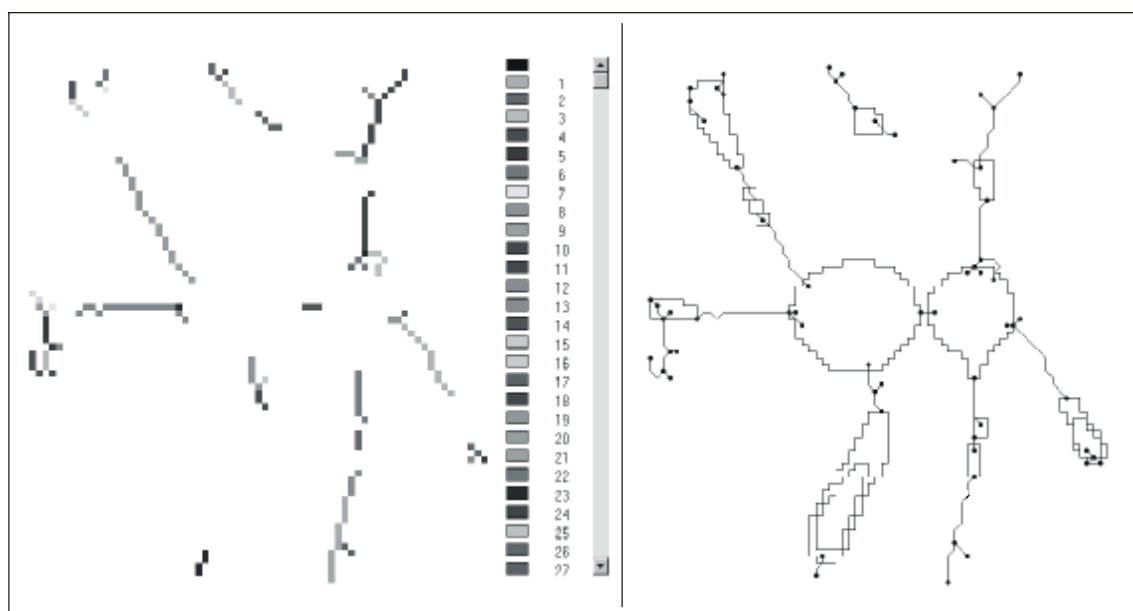
- Koordinate čvorova mreže. Vektorski sloj, tačke.
- Tip čvora. Tekstualna datoteka sa kodovima: 1) Izlaz iz jedne kontinualne mreže (može biti više nepovezanih mreža), 2) Normalan čvor, 3) Prvi čvor (uzvodni početak), 6) Fiktivni čvor (uveden zbog korektnog numerisanja prstenaste mreže, uvek isti po koordinati sa nekim čvorom tipa ‘‘Prsten’’), 7) Prsten (čvor kojim se zatvara jedan prsten u mreži).
- Koordinate kanala (grana mreže). Vektorski sloj, linija. Prva i zadnja koordinata na kanalu se poklapaju sa nizvodnim i uzvodnim čvorom. Redni broj kanala je jednak rednom broju uzvodnog čvora (kod kanala koji zatvara jedan prsten, koristi se redni broj fiktivnog čvora).
- Podaci o kanalima. Tekstualna datoteka sa sledećim sadržajem: 1) Redni broj kanala, 2) Redni broj uzvodnog čvora, 3) Redni broj nizvodnog čvora, 4) Kota terena u uzvodnom čvoru, 5) Kota terena u nizvodnom čvoru, 6) Dužina kanala. Kod rednog broja uzvodnog i nizvodnog čvora, koristi se broj stvarnog čvora (tip ‘‘Prsten’’) a ne fiktivnog. Kanal sa rednim brojem izlaznog

čvora ne postoji u mreži, pa su mu svi podaci osim dužine nula, a dužina je jednaka ukupnoj dužini svih kanala koji pripadaju jednom izlazu (koji čine jednu kontinualnu mrežu).

- Slika mreže kanala. Rasterski sloj. Vrednost u svakoj ćeliji je jednaka rednom broju kanala, ili 0.

Ako su dostupne i informacije o depresijama, formiraće se još dve datoteke:

- Veza između čvorova i depresija. Tekstualna datoteka. Svakom čvoru vektORIZOVANE mreže, pridružuje se redni broj depresije (ako je to ulazni ili izlazni čvor iz depresije) ili 0 (nema kontakta sa depresijom). Takođe, u već formiranoj datoteci tipa čvora, dodaju se još dva nova tipa: 4) Izlaz iz depresije i 5) Ulaz u depresiju.
- Veza između depresija i čvorova. Tekstualna datoteka. Za svaku depresiju daje se redni broj izlaznog čvora, ukupan broj ulaznih čvorova i redni brojevi ulaznih čvorova.



Slika 4.18: Primer vektorizacije za podatke sa slike 4.9: rasterski sloj slike površinskog toka, klasifikovan prema rednom broju kanala u mreži (levo) i vektorski sloj (desno)

Program za vektorizaciju kreira sve podatke potrebne za formiranje potpuno topološki određene mreže površinskih kanala. Na osnovu izlaznih datoteka, moguće je kreirati ulazne podatke za bilo koji program koji se bavi analizom tečenja u mreži kanala. Takođe, može se uspostaviti veza između čvorova i depresija, odakle se dobijaju karakteristike depresija.

Na slici 4.18 je prikazan rezultat vektorizacije slike površinskog toka test primera, sa slike 4.9. Na levom delu slike je dat rasterski sloj mreže površinskog toka vode, klasifikovan prema rednom broju kanala u mreži. Na desnom delu slike je prikazana vektorski definisana mreža sa depresijama i čvorovima.

Procedura za automatsku vektorizaciju u većini slučajeva korektno odredi sve čvorove i kanale. Procedura, međutim, često “pretera” sa brojem čvorova praveći ponekad male kanale (dužine dva-tri piksela) i nepotrebne male petlje. Takođe, za sada su kanali sastavljeni od kratkih segmenata, čije koordinate su jednake koordinatama svih centara ćelija kroz koje procedura vektorizacije prolazi. Za relativno gust raster koji se koristi u urbanim sistemima, postoji velika redundansa u podacima. U nekoj od sledećih revizija ovog programa, potrebno je dodati algoritam za generalizaciju mreže, čime bi se smanjio broj nepotrebnih detalja u mreži kao i predefinisanaost svakog kanala.<sup>11</sup>

---

<sup>11</sup>Sličan problem velikog broja kratkih segmenata u vektorskom zapisu linije se javlja u delu koji govori o delineaciji sliva na podslivove i automatskoj vektorizaciji granica podslivova. Zbog jednostavnijeg algoritma (tačke na granici tri podsliva su fiksne) i drastično većeg obima podataka, u program je već ugrađena opcija generalizacije linije.

## Glava 5

# Kreiranje sloja sa granicama podslivova (delineacija sliva na podslivove)

Prema usvojenom konceptu problema oticanja kišne vode sa urbanizovanih slivova, površina terena, odnosno sliva, se deli na podslivove na kojima se pala kiša transformiše u čist oticaj, a tu vodu prihvata (drenira) jedan element kanalizacione mreže<sup>1</sup> ili jedan kanal mreže površinskog toka.<sup>2</sup> Sam postupak određivanja granica podslivova, odnosno podele sliva na podslivove se naziva delineacija, a rezultat tog postupka je sloj sa vektorskim granicama podslivova i vezom sa kanalizacionom mrežom.

Delineacija sliva se može izvesti na dva načina: čisto geometrijski, ne uvažavajući karakteristike terena, ili na osnovu podataka o DMT-u i objektima na terenu, simulirajući tečenje vode po površini terena koristeći pravce maksimalnih nagiba. Prvi način je veoma brz, ne zahteva praktično nikakve druge podatke o slivu osim podataka o kanalizacionoj mreži i često se koristi kao prva iteracija u proveru funkcionisanja nekog kanalizacionog sistema. Delineacija prema DMT-u je dosta kompleksnija, pored podataka o kanalizacionoj mreži zahteva kvalitetne ulazne podatke o terenu i objektima na terenu, ali daje rezultate koji su fizički realniji. Za potrebe informatičkog modela OUP-a, razvijene su originalne procedure za delineaciju sliva na oba načina, specijalno prilagođene urbanim uslovima.

Pored usvojena dva načina, u literaturi se mogu naći i druge varijante delineacije sliva. Ako su na raspolaganju katastarski podaci u digitalnoj formi, uspostavljanjem relacija između tih podataka i podataka o kanalizaciji, dobija se varijanta geometrijske delineacije uz korišćenje granice parcela kao granice podsliva [86]. U delineaciji

---

<sup>1</sup>U zavisnosti od toga koji se simulacioni model transformacije kiše u oticaj koristi, kao osnova za proces delineacije se koriste cevi kanalizacionog sistema (smatra se da duž cevi postoje slivnici koji skupljaju vodu sa terena) ili samo šahtovi, računski čvorovi mreže.

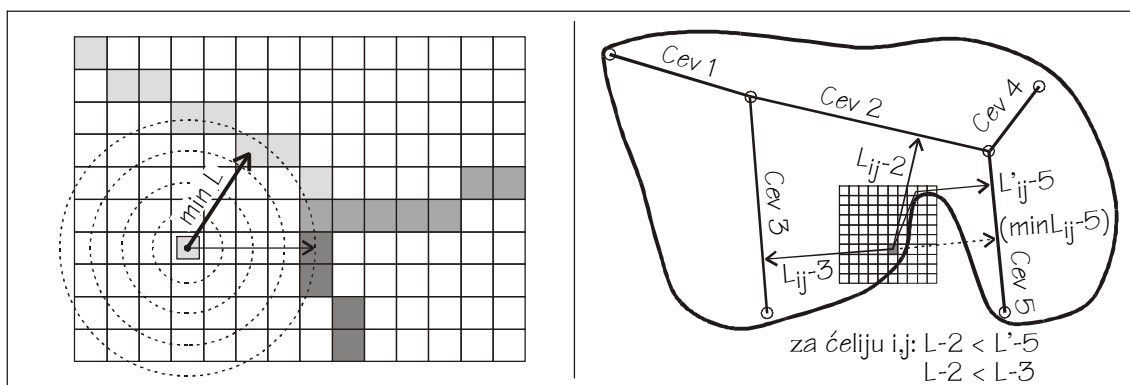
<sup>2</sup>U uslovima gde ne postoji kanalizacija, pa se tečenje formira prirodnim putem po terenu, ulazni podatak za proračun je mreža površinskih kanala.

prema DMT-u, uticaj objekata u analizi tečenja vode se može formulirati preko paketa heurističkih pravila [89]. Za potrebe detaljnijeg izučavanja manjih slivova, moguće je napraviti kompletan dvodimenzionalni model sa jednačinama za plitke tokove [10] ili sa svođenjem na linijski model uvođenjem strujnih cevi [62, 98].

Ulazni podaci za delinaciju sliva mogu biti u rasterskoj ili u vektorskoj (TIN) formi. Postoji dosta radova koji se bave delinacijom sliva koristeći TIN sistem [38, 64], ali opšti je zaključak da je procedura komplikovana i neprikladna za urbane slivove [17]. Sa druge strane, rasterski sistem, koji je i prihvaćen u informatičkom modelu OUP-a, dozvoljava jednostavnu delinaciju sliva [57] uzimajući u obzir i uticaj objekata na granice podslivova [79]. Korišćenjem relativno malih dimenzija grida, greške usled diskretizacije prostora postaju zanemarljivo male u odnosu na vektorski pristup, dok su značajni dobici u jednostavnosti postupka i boljoj simulaciji urbanih uslova. Da bi se održala konsistentnost baze podataka, po završenom proračunu delinacije sliva, rasterski rezultat se vektorizuje i formira vektorski sloj zatvorenih poligona, povezan sa kanalizacionom mrežom.

## 5.1 Geometrijska delinacija sliva

Najjednostavniji način podele sliva na podslivove je čisto geometrijski: svaka ćelija na slivu pripada najbližoj cevi, ne uvažavajući ni nagibe terena ni objekte na terenu. Postupak geometrijske delinacije je ustvari varijanta određivanja Thiessen-ovih poligona, sa tom razlikom, što kao osnov za podelu mogu biti pored čvorova (šahtova) kanalizacione mreže i linije (kanalizacione cevi).



Slika 5.1: Geometrijska delinacija: vrednost svake ćelije je jednaka broju najbliže cevi (levo), vodeći računa o granici sliva (desno)

Princip rada razvijenog programa je dat na slici 5.1. Za svaku slobodnu ćeliju na slivu, postepeno se širi oblast u kojoj se traži najbliža cev. Kada se nađe barem jedna cev u posmatranoj oblasti, proveravaju se razdaljine (prave linije) između ćelije i svih pronađenih cevi i ćeliji se dodeljuje onaj broj koji ima najbliža cevi. U proveru najkraćeg rastojanja, vodi se računa da najkraći put ne preseče granicu

sliva, kao na primer put  $L_{ij} - 5$ , na slici 5.1 desno. Ako se to dogodi, prava linija se menja sa linijom sastavljenom od više pravih segmenata. Algoritam programa je:

1. Prema raspoloživoj memoriji, odredi da li će se učitati ceo sloj sa kanalizacionom mrežom ili će se učitavati po trakama.<sup>3</sup>
2. Definiše se datoteka sa ulaznim podacima kao početna slika kanalizacije, ako je ovo prva iteracija, ili međurezultat delineacije sliva, ako je već kreiran. Inicijalizuju se promenljive i učitaju ulazni podaci.
3. Za celu sliku ili za polovinu učitane trake:
  - (a) Traži ćeliju koja nije dodeljena ni jednoj cevi (vrednost==0). Ako je nema, gotov je deo proračuna, idi na korak 4.
  - (b) Oko pronađene ćelije povećavaj postepeno kvadrat<sup>4</sup> sve dok:
    - ne izađeš iz okvira učitanih podataka. Razmatranu ćeliju označi kao FAR<sup>5</sup> i idi na korak 3a.
    - ne dodirneš neku cev. Dobijen je ‘‘unutrašnji’’ kvadrat, koji ima jednu ili više dodirnih cevi (zbog rasterskog algoritma). Nađi sve razdaljine od ćelije do cevi i odaberi najkraću.
  - (c) Da bi se proverile dijagonalne veze, formiraj ‘‘spoljni’’ kvadrat jednak minimalnoj razdaljini iz ‘‘unutrašnjeg’’ kvadrata. Da li su ‘‘spoljni’’ i ‘‘unutrašnji’’ kvadrati isti?
    - Da, najverovatnije je pronađena najbliža cev.
    - Ne, nađi najbližu cev iz oba kvadrata kao verovatno najbližu cev.
  - (d) Pripremi sve varijable za sledeću ćeliju u slici. Smanji veličinu ‘‘unutrašnjeg’’ kvadrata za 1.
  - (e) Proveri da li prava linija od ćelije do najbliže cevi preseca granicu sliva. Ako preseca, označi ćeliju kao HID.<sup>6</sup>
  - (f) Idi na korak 3a
4. Ako nije bila učitana cela slika, sačuvaj obrađenu traku, učitaj sledeću i idi na korak 3.

<sup>3</sup>Na engleskom jeziku *band, banding technique*. Način obrade velike količine podataka, kada se slika deli u trake, koje se sukcesivno obrađuju.

<sup>4</sup>Za traženje najbliže cevi od neke ćelije, trebalo bi da se koristi krug, čiji poluprečnik se postepeno povećava, dok se ne dodirne prva cev. Takav algoritam traži česta izračunavanja, što usporava proračun. S obzirom da su podaci u formi pravilnog rastera, kao zona u kojoj se traži najbliža cev koristi se kvadrat, uz proveru da li je nađena cev zaista i najbliža. Mada provera zahteva nekoliko dodatnih koraka, ukupno vreme izvršavanja programa se znatno skraćuje.

<sup>5</sup>Ćelija tipa FAR - daleka ćelija. U učitanoj setu podataka ne nalazi se najbliža cev.

<sup>6</sup>Ćelija tipa HIDDEN - skrivena ćelija. Najkraći put do cevi preseca granicu, treba naći neki drugi put.

5. Proveri da li ima HID i FAR ćelija. Ako ima, idi na korak 2 sve dok je (HID+FAR) u dve iteracije različito.
6. Kraj proračuna. Za (HID+FAR)>0, odštampaj broj HID i FAR ćelija.

Od ulaznih podataka, jedino se koristi slika kanalizacione mreže, odnosno čvorova (tačka 3.1.3 *Konverzija vektorskog zapisa u rasterski*), sa sledećim vrednostima ćelija  $CELL_{i,j}$ :

$$CELL_{i,j} = \begin{cases} -1 & \text{za ćelije van sliva} \\ 0 & \text{za ćelije unutar sliva koje treba obraditi} \\ k & 1 \leq k \leq N; \text{ gde je } k \text{ redni broj računskog čvora/cevi} \end{cases} \quad (5.1)$$

gde je  $N$  ukupan broj cevi (čvorova) na slivu. Kao izlaz, dobija se slika u kojoj su sve ćelije čija je vrednost bila 0, sada dodeljene nekoj od cevi. Na slici 5.2 je dat primer rezultata delinacije.

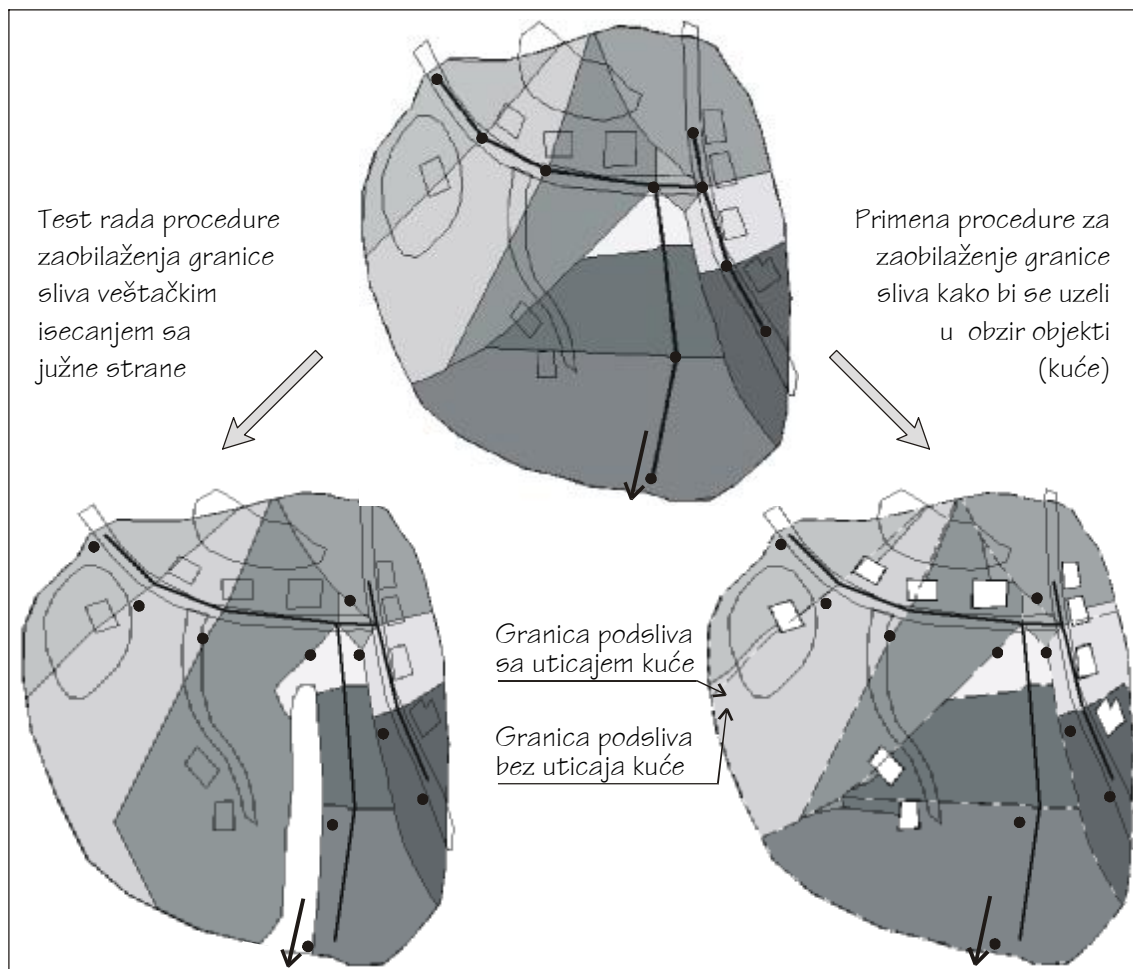
Na istoj slici (5.2 dole, levo) je prikazan i rezultat delovanja algoritma u slučaju otkrivanja skrivenih ćelija. Da bi se proverio rad programa, granica sliva je namerno promenjena na južnoj strani sliva i urađena je delinacija. Na slici se vidi kako su promenjene granice podslivova u centralnom i jugozapadnom delu, u skladu sa kriterijumom (datim na slici 5.1 desno) nepresecanja granice sliva.

Mada je geometrijska delinacija opisana kao najprostija delinacija koja ne uzima u obzir objekte na terenu, razvijeni algoritam omogućava određene intervencije. Pošto se ne dozvoljava prelazak linije najkraćeg puta preko granice sliva, moguće je iskoristiti podatke o nameni površine terena i objekte preko kojih voda sigurno ne može da pređe (kuće, na primer) proglašiti površinama van sliva (slika 5.2 dole, desno). Nakon procedure geometrijske delinacije, neophodno je površine pod objektima dodeliti najbližoj cevi (nije prikazano na slici).

Opisana procedura geometrijske delinacije daje rezultate na koje su projektanti sistema već navikli. Cela površina sliva će biti izdvojena na pravilne poligone, nema nedreniranih delova ni cevi sa veoma malom ili sa čudnom izduženom slivnom površinom. Velika prednost je što se ne zahtevaju obimni ulazni podaci, pa se često upravo geometrijska delinacija koristi u prvim procenama količina vode. Takođe, u uslovima potpune urbanizacije, na terenu koji je uglavnom horizontalan i gde ne postoje detaljni podaci o visinama, ovo je praktično jedino moguća procedura za delinaciju.

## 5.2 Delinacija sliva prema DMT-u

Zajedničko za sve ćelije na jednom podslivu je da će površinska voda biti drenirana istom kanalizacionom cevi (ili istim računskim čvorom). Procedura delinacije sliva na podslivove, koja uvažava DMT, treba da prati mogući površinski tok vode i da sve ćelije koje daju vodu u istu cev, označi rednim brojem te cevi. S obzirom da se radi o urbanim slivovima, procedura mora uzeti u obzir i veštačke objekte.



Slika 5.2: Rezultat geometrijske delineacije (gore), primer skrivenih ćelija na južozadanoj strani kada se promeni granica sliva (dole, levo) i način kako objekti mogu uticati na delineaciju – zgrade su klasifikovane kao područja izvan sliva (dole, desno)

Tečenje vode po površini terena je klasičan dinamički dvodimenzionalni problem koji bi trebalo rešavati primenom Navier-Stokes-ovih jednačina za plitke tokove [10]. Kao i kod programa za određivanje površinske mreže kanala, izostavlja se inercijalna komponenta toka i smatra se da je nagib terena dominantan u određivanju pravca toka vode.<sup>7</sup> Uticaj objekata na površini terena se unosi kroz visinsku korekciju DMT-a, kao i kroz promene uslova tečenja.

Osnovna razlika između programa koji analiziraju površinski tok i programa za delineaciju prema DMT-u je u smeru proračuna. Dok se u pravljenju slike sumarnih dotoka pratio nizvodni tok vode sa svake ćelije, u programu za delineaciju se kreće

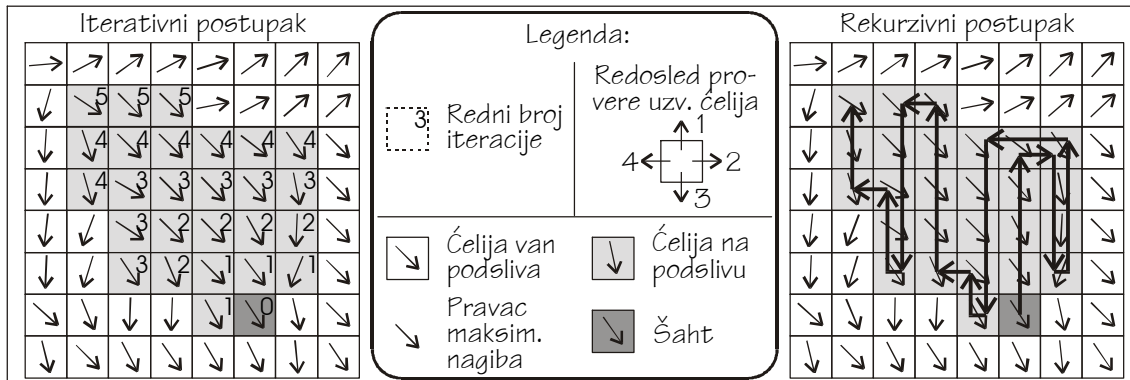
<sup>7</sup>Prema usvojenoj koncepciji modela OUP-a, detaljna analiza transformacije kiše u oticaj je zamenjena uprošćenom analizom na nivou podsliva, u okviru koga se vrši osrednjavanje. Za model OUP-a, potrebne su samo granice podslivova.



od svake cevi (čvora) uzvodno, skupljajući sve ćelije koje mogu dati vodu. Zbog uzvodnog smera proračuna, za razliku od proračuna površinske mreže kanala, ovde se usvaja rasterski način rada. Time se znatno uprošćava proračun i uzimanje u obzir veštačkih objekata, dok su prostorne greške relativno male jer su rastojanja u uzvodnom pravcu, od cevi do kraja sliva, znatno manja od rastojanja u nizvodnom pravcu (do kraja sliva).

### 5.2.1 Primenjeni algoritam

U literaturi se mogu naći dve osnovne verzije algoritama za delineaciju sliva prema DMT-u. Oba algoritma zahtevaju prvo proračun sloja pravaca maksimalnih nagiba, a zatim iterativnim ili rekursivnim putem polaze od ćelija u slici kanalizacione mreže (ili čvora), definisane izrazom 5.1, uzvodno do prve susedne ćelije, dajući joj broj jednak rednom broju cevi.



Slika 5.3: Primer iterativnog određivanja podslivova (levo) i rekursivnog (desno)

Na levoj strani slike 5.3 je prikazan iterativni postupak. U početnoj iteraciji, sve ćelije koje ne pripadaju cevima imaju oznaku 0. U svakoj narednoj iteraciji, za svaku od ćelija  $(i, j)$  u slici čija je oznaka  $N_{i,j} = k, k > 0$ , proveriti se pravac maksimalnog nagiba slobodnih susednih ćelija (onih kod kojih je oznaka 0). Ako je nagib susednih ćelija usmeren prema razmatranoj ćeliji  $N_{i,j}$ , menjaju oznaku iz 0 u broj  $k$ . Iz iteracije u iteraciju, sve slivne površine postepeno rastu.

Rekursivni postupak je prikazan na desnoj strani slike 5.3. U ovom postupku se ne obrađuju sve slivne površine odjednom, već jedna po jedna. Polazeći od najviše cevi (čvora) program proverava da li postoji slobodna ćelija na severu-zapadno-jugu-istoku<sup>8</sup> čiji nagib je usmeren prema razmatranoj. Ako ima, dodeli joj se broj razmatrane ćelije i ponavlja se procedura.

Nedostatak iterativnog postupka je izrazita sporost algoritma, zbog velikog broja ponavljanja operacija traženja slobodnih ćelija i provera pravaca maksimalni nagiba. Rekursivni postupak je efikasniji, ali još uvek relativno spor. Ako se implementira

<sup>8</sup>Jednostavnije verzije programa rade samo sa 4 susedne ćelije, dok je bolja varijanta ako se razmatra svih 8.

kroz rekurzivne pozive funkcija, postoji uvek određeno ograničenje u maksimalnom broju poziva, odnosno u dužini “puta” koji treba da se pređe.

Razvijeni algoritam za delineaciju prema DMT-u predstavlja modifikovanu varijantu rekurzivnog postupka [65, 68]. Osnovna ideja za znatno ubrzanje postupka je da se korak delineacije (“šetanja” po slici) odvoji od koraka analize mogućih pravaca toka vode. U jednom prolazu, prvo se kreira kompaktna privremena slika pravaca tokova, na osnovu analize nagiba ćelija kao i sadržaja sloja namene terena. Nakon toga se primenjuje linearizovana varijanta rekurzivnog rada, kojom se uklanja ograničenje u pogledu dužine “puta” i dodatno se ubrzava program. Slika pravaca tokova je tako pripremljena, da se za vreme delineacije ne koriste spore matematičke operacije.

1-no bajtna reč							
8-mi bit	7-mi bit	6-ti bit	5-ti bit	4-ti bit	3-ći bit	2-gi bit	1-vi bit
128	64	32	16	8	4	2	1
0x80	0x40	0x20	0x10	0x08	0x04	0x02	0x01
Sever	Severo- istok	Istok	Jugo- istok	Jug	Jugo- zapad	Zapad	Severo- zapad

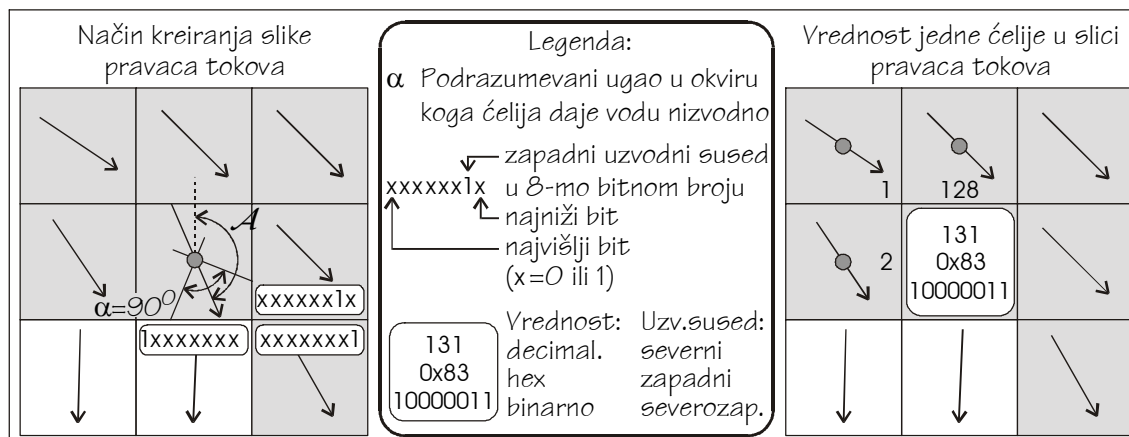
Tabela 5.1: Vrednost u jednoj ćeliji slike pravaca tokova koja pokazuje koje su sve ćelije uzvodne (sa kojih ćelija će doteći voda)

Postupak kreiranja slike pravaca tokova je lokalna procedura koja se zasniva na “prozoru” veličine  $3 \times 3$  ćelije. Za centralnu ćeliju u prozoru, odredi se, prema pravcu (azimutu  $\mathcal{A}$ ) maksimalnog nagiba i prema sloju namene površine terena, koje su sve susedne ćelije nizvodne. U svakoj od tih nizvodnih ćelija, setuje se odgovarajući bit za prisustvo jedne uzvodne ćelije (tabela 5.1 drugi red), odnosno sabira se odgovarajući decimalni broj (tabela 5.1 treći red). Pošto svaka ćelija može imati najviše do 8 uzvodnih ćelija, za kompletan opis slike pravaca tokova dovoljna je 1-no bajtna reč (8 bita, dekadni broj od 0 do 255).

U tabeli 5.1 su data objašnjenja za svih 8 bitova 1-no bajtne reči koja se koristi u slici pravaca tokova. Takođe, date su i decimalne kao i heksadecimalne vrednosti koje se sabiraju sa prethodnom vrednosti u ćeliji, da bi se određeni bit setovao (“upalio”). Na slici 5.4 je dat primer kreiranja slike pravaca tokova (levi deo slike). Ugao pod kojim voda iz centralne ćelije  $(i, j)$  u prozoru  $3 \times 3$  može da teče nizvodno je jednak pravcu maksimalnog nagiba  $\mathcal{A}_{i,j}$ , proširenom za ugao tečenja  $\alpha_{i,j}$ <sup>9 10</sup> [24], pod uslovom da je vrednost maksimalnog nagiba  $G_{i,j}$  veća od neke minimalne vrednosti

<sup>9</sup>Na engleskom jeziku *flow angle* ili, prema nekim autorima *angular region*.

<sup>10</sup>Proširenje ugla tečenja vode koja izlazi iz ćelije je posledica rasterskog načina rada i standardno se usvaja da je taj ugao  $\alpha = \pm 45^\circ = 90^\circ$ . On može biti konstantan, isti za sve ćelije, ili svaka ćelija može imati drugi vrednost  $\alpha_{i,j}$ .



Slika 5.4: Postupak kreiranja slike pravaca tokova (levo) i konačan rezultat dat za centralnu ćeliju (desno)

$G_{\text{MIN}}$ .<sup>11</sup> Nizvodne ćelije su one, čija je granica unutar uglova:

$$\mathcal{A}_{1i,j} = \mathcal{A}_{i,j} - \frac{\alpha_{i,j}}{2} \quad \text{i} \quad \mathcal{A}_{2i,j} = \mathcal{A}_{i,j} + \frac{\alpha_{i,j}}{2} \quad (5.2)$$

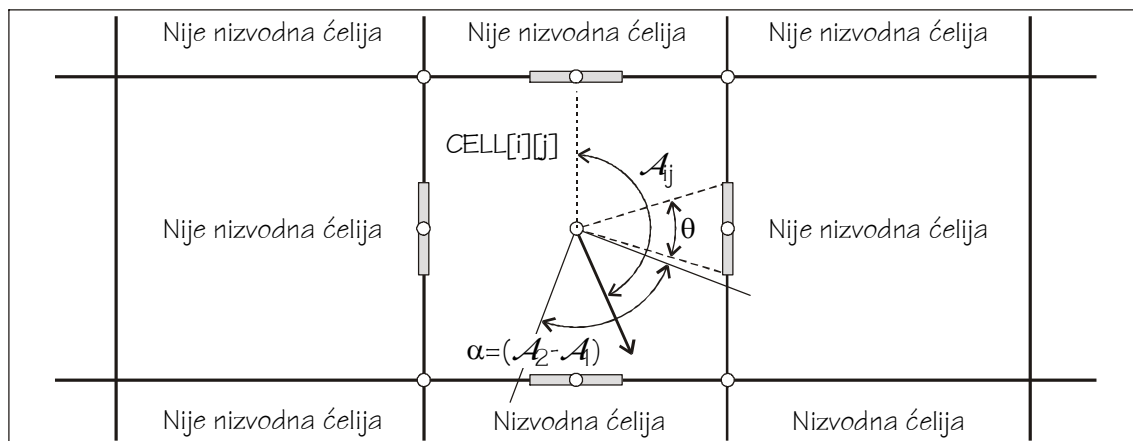
pa su za  $\alpha_{i,j} = 90^\circ$ , nizvodne istočna, jugoistočna i južna ćelija. U tim ćelijama, bit koji pokazuje da voda dolazi sa zapadne, odnosno severozapadne i severne strane se u slici pravaca tokova menja iz 0 u 1. Ako je  $G_{i,j} \leq G_{\text{MIN}}$ , smatra se da je ćelija horizontalna i da voda sa nje može da teče na svih 8 strana. Nakon analize uglova u centralnoj ćeliji, prozor  $3 \times 3$  se pomera za jedno mesto i procedura se ponavlja do kraja slike.

Na desnom delu slike 5.4 je prikazan finalni rezultat kreiranja slike pravaca tokova. Vrednost u centralnoj ćeliji nosi kompletnu informaciju o tome koje su sve ćelije uzvodne: dekadni broj 131 je dobijen kao zbir 128 (severna uzvodna ćelija) + 2 (zapadna) + 1 (severozapadna). U binarnom obliku, koji se inače koristi u primenjenom algoritmu, to se još jasnije vidi: 131=10000011, upaljeni su svi bitovi koji pokazuju na uzvodne ćelije.

U određivanju da li je neka ćelija nizvodna, kriterijum za izbor ćelija na dijagonalnim pravcima je jasan: ćelija je nizvodna ako je zajednički ugao obuhvaćen uglom tečenja  $\alpha_{i,j} = (\mathcal{A}_2 - \mathcal{A}_1)_{i,j}$ , izrazi 5.2. Kod ćelija na glavnom pravcu (sever, istok, jug, zapad) taj kriterijum nije potpuno određen, ćelija je nizvodna ako ugao  $\alpha$  preseca zajedničku granicu (jedna krajnost) ili ako je sredina granice obuhvaćena tim uglom (druga krajnost).

Da bi se ispitao uticaj tog kriterijuma na oblik granice koja se formira u delineaciji, algoritam sa slike 5.4 je modifikovan. Dodat je još ugao  $\theta$ , koji definiše koji deo granice treba biti obuhvaćen uglom  $\alpha_{i,j}$  da bi se smatralo da je ćelija na glavnom pravcu nizvodna (slika 5.5).

<sup>11</sup>Na engleskom jeziku *slope threshold*. Kao i ugao tečenja,  $G_{\text{MIN}}$  može biti konstantan ili različit za svaku ćeliju,  $G_{\text{MIN } i,j}$ .



Slika 5.5: Kriterijum provere okolnih ćelija da li su nizvodne

Analize su pokazale da algoritam za delineaciju pri uglu  $\theta = 90^0$  favorizuje glavne, dok pri  $\theta = 0^0$  favorizuje dijagonalne pravce. Na kraju je usvojen sledeći pristup: u prvoj iteraciji traženja nizvodnih ćelija, usvaja se ugao  $\theta = 5.7^0$  (što znači da se analizira sredina granice  $\pm 2.5\%$  oko te tačke), ako se desi da sa tom vrednošću ugla  $\theta$  ne postoji ni jedna nizvodna ćelija, onda se  $\theta$  samo za tu ćeliju postepeno povećava.

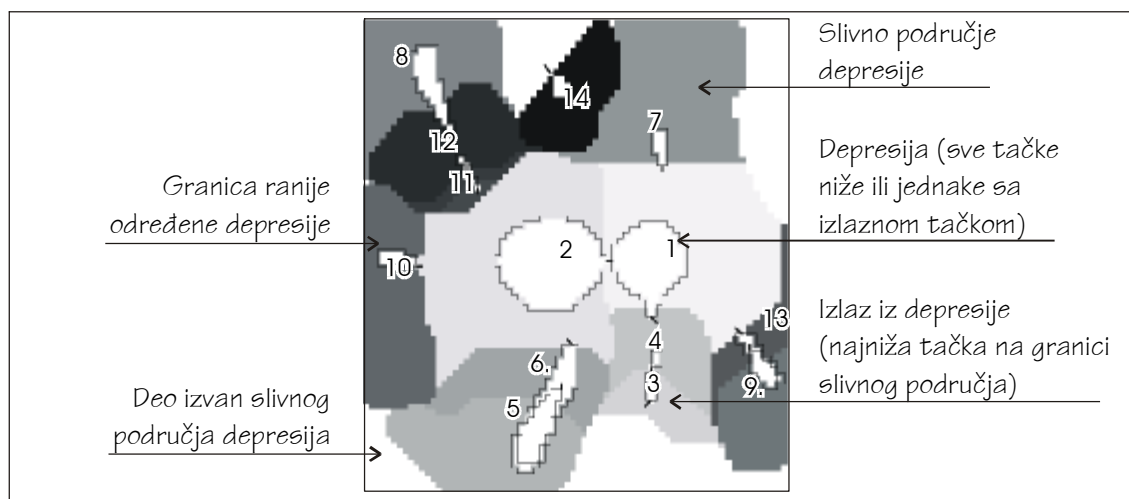
Deo programa za delineaciju sliva na podslivove, koji rekurzivno bira sve ćelije koje pripadaju istom podslivu, kao ulazne podatke koristi jedino kreiranu privremenu sliku pravaca tokova i podatke o kanalizacionoj mreži. Algoritam kompletnog programa je:

1. Pregledaj sliku cevi (čvorova). Svaka ćelija različita od 0 je potencijalni recipijent vode (čvor). Učitaj sve ćelije i sortiraj ih prema visini, koristeći nekorigovani DMT.
2. Kreiraj privremenu sliku pravaca tokova koristeći slike pravaca i ugla maksimalnog nagiba, kao i sliku namene površine terena.
3. Za svaki čvor, polazeći od najvišeg ka najnižem:
  - (a) Redni broj čvora je redni broj razmatranog podsliva. Ćelija čvora je razmatrana radna ćelija.
  - (b) Kreni od razmatrane ćelije u pravcu prvog upaljenog bita u slici pravaca tokova. Ugasi iskorišćeni bit (postavi na 0). U posebnoj listi zapiši upotrebljeni put.
  - (c) Da li je vrednost u slici pravaca tokova nove ćelije  $> 0$ ?
    - da, nova ćelija je razmatrana ćelija, idi na korak 3b.
    - ne, nova ćelija nema uzvodnih ćelija, stiglo se do kraja puta. Označi ćeliju kao deo razmatranog podsliva.
  - (d) Da li u spisku upotrebljenih puteva postoji prethodna ćelija?

- da, idi nazad u prethodnu ćeliju koja postaje nova razmatrana ćelija, idi na korak 3c.
  - ne, nema prethodne ćelije. Razmatrana ćelija je polazna ćelija čvora. Svim ćelijama koje se dreniraju preko razmatranog čvora je dodeljen isti broj.
4. Ako nisu obrađeni svi čvorovi idi na sledeći čvor pa na korak 3a.
  5. Da li je  $G_{MIN}$  različito od nule ili je zadato kao poseban sloj. Ako jeste, idi još jednom od tačke 2 koristeći te vrednosti samo za već ne obrađene ćelije.
  6. Kraj programa.

Rezultat programa je rasterski sloj sa podslivovima, gde je vrednost svake ćelije unutar sliva jednaka vrednosti cevi (čvora) koji drenira vodu sa te ćelije. Za razliku od geometrijske delineacije, gde je ceo sliv podeljen na podslivove, pa ni jedna ćelija nema vrednost 0 nakon proračuna, kod delineacije prema DMT-u se, u zavisnosti od položaja kanalizacione mreže, često događa da određeni delovi sliva ostanu nedrenirani. Ti delovi su velike depresije, koje će biti uključene u proces oticanja kad se napuni njihova zapremina ili delovi sliva koji nisu obuhvaćeni kanalizacionom mrežom i ne učestvuju u procesu oticanja.

Da bi se neki postupak primenio u redovnoj inženjerskoj praksi, on mora biti robustan i dovoljno brz. Primenjeni algoritam delineacije je dodatno ubrzan primenom komplikovane tehnike podela sliva u trake koje se u toku proračuna smanjuju ili povećavaju. Takođe, minimiziran je protok podataka čuvanjem samo onih podataka koji će najverovatnije zatrebati u narednim koracima proračuna.



Slika 5.6: Delineacija depresija primenom algoritma za delineaciju slivova (primer kao i na slici 4.3)

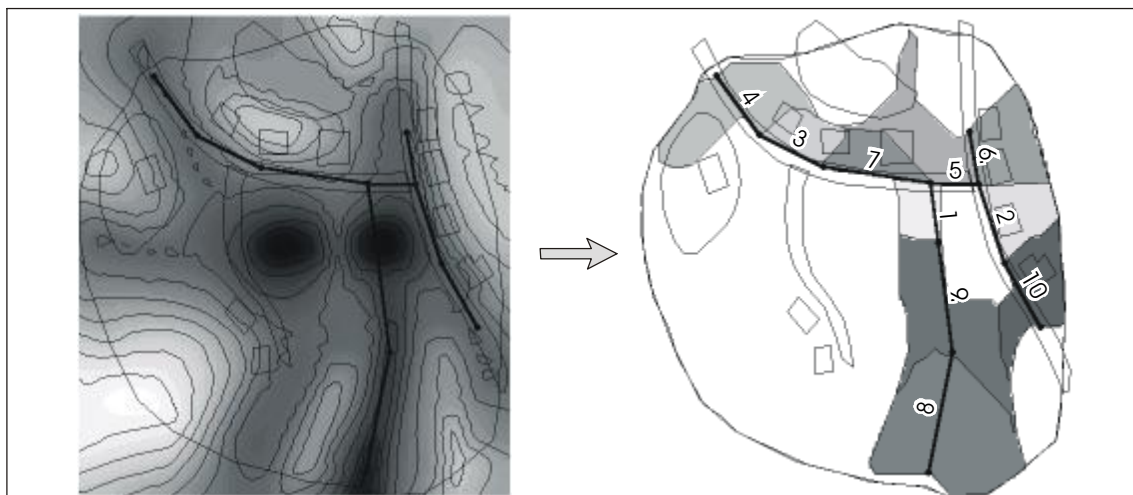
Interesantno je napomenuti, da se algoritam za delineaciju sliva na podslivove, može koristiti i za delineaciju depresija [57] (tačka 4.1.2 *Delineacija depresija u*

DMT-u). Ukoliko se umesto kanalizacione mreže program pusti da radi delineaciju prema najnižim tačkama depresija, dobiće se kao rezultat ukupna slivna površina svake depresije, kao na slici 5.6. Ako se krene duž granice depresije, najniža tačka na toj granici je izlaz iz depresije, a sve tačke u depresiji sa kotom manjom od kote najniže tačke čine depresiju.

Depresije određene primenom algoritma za delineaciju slivova su na slici 5.6 prikazane belom bojom. Da bi se rezultat uporedio sa ranije određenim depresijama, na istoj slici su nacrtane i vektorske granice depresija. Njihovo poklapanje je dokaz korektno programiranog algoritma za delineaciju slivova.<sup>12</sup>

### 5.2.2 Delineacija sliva prema DMT-u bez uzimanja u obzir sloja namene površina

Prvi i najjednostavniji način primene razvijenog algoritma delineacije sliva, je njegova primena na teren bez uzimanja u obzir sloja namene površina. Na osnovu originalnog DMT-a, odrede se pravci i uglovi maksimalnih nagiba, usvoji se standardna vrednost ugla tečenja  $\alpha = 90^0$  (izraz 5.2) i minimalna vrednost maksimalnog nagiba ćelije  $G_{MIN} = 0.00$  m/m (izraz 3.3), te se odrede podslivovi.



Slika 5.7: Delineacija sliva samo prema DMT-u (DMT dat na levoj strani slike je ponovljen sa slike 4.3, sloj namene površine je ucrtan samo zbog lakše orijentacije)

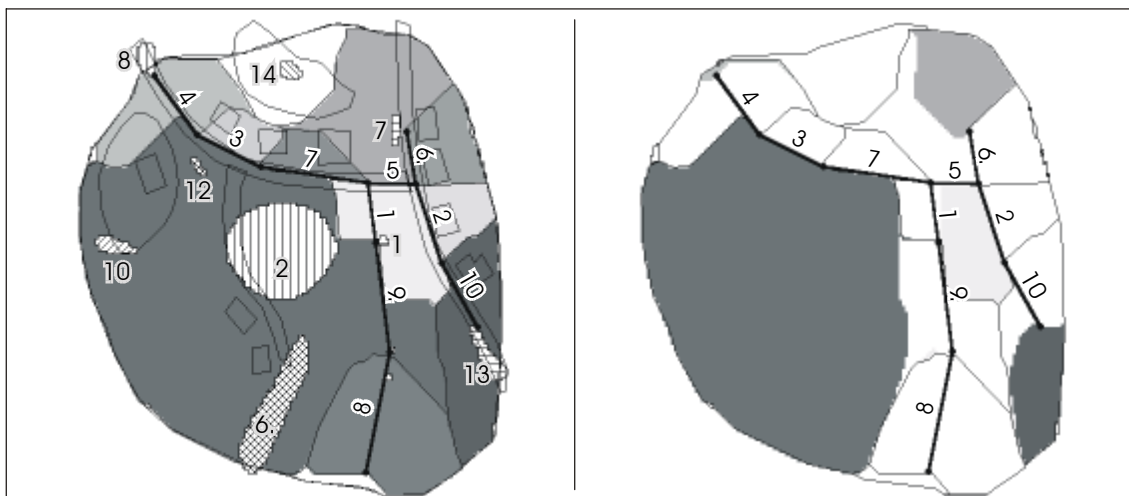
Na slici 5.7 je dat rezultat delineacije za usvojeni test sliv, pri čemu je veličina grida smanjena na 0.5 m. Na slici su prikazani i objekti na terenu, ulice, kuće i zelene površine, zbog lakše orijentacije. Sa leve strane slike, dat je DMT, a sa desne, granice podslivova. Svaki podsliv je obojen sivom nijansom prema rednom

<sup>12</sup>Oba algoritma koriste za svoj rad prozor veličine  $3 \times 3$ , s time što je program za delineaciju depresija brza verzija iterativnog postupka "rasta" depresije oko početne ćelije, a program za delineaciju slivova rekurzivni postupak "penjanja" uz uzvodne ćelije. Zbog istih fizičkih pretpostavki, razumljivo je da se u dva različita algoritma dobija isti rezultat.

broju cevi, dok bela površina predstavlja nedrenirani deo sliva. Ukupna površina sliva, odnosno površina koja učestvuje u oticaju je data kao suma svih ćelija koje pripadaju nekom podslivu:

$$A_{\text{SLIV}} = \sum_{i,j} (\Delta X \times \Delta Y) \quad \forall \text{CELL}_{i,j} > 0 \quad (5.3)$$

U ovom test primeru, granica celog slivnog područja je namerno postavljena da ne ide po prirodnim granicama sliva.<sup>13</sup> Granica obuhvata urbanizovani deo sliva (deo oko kanalizacione mreže), kao i deo sa jednom većom i dve manje depresije (jugozapadni deo sliva). Ukupna površina tako zadatog sliva iznosi  $A = 0.44312$  ha. Delineacijom sliva samo prema DMT-u, dobija se, međutim, da je  $A_{\text{SLIV}} = 0.1727$  ha, odnosno da se samo 39% terena drenira kanalizacionom mrežom, dok je preostalih 61% isključeno iz procesa oticanja.



Slika 5.8: Delineacija sliva samo prema DMT-u, nakon uklanjanja svih depresija (levo), razlika između slivnih površina bez i sa popunjenim depresijama (desno)

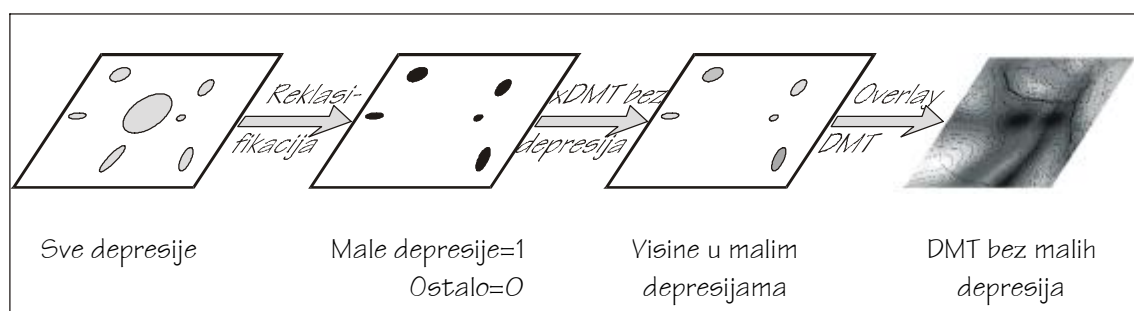
Prema literaturi [36], poželjno je pre delineacije sliva, otkloniti depresije korekcijom DMT-a. Na slici 5.8 je dat rezultat delineacije ako se uklone depresije, pri čemu je sada drenirana slivna površina 94% od ukupne površine sliva. Na istoj slici, sa desne strane, data je razlika između slivnih površina bez popunjenih depresija (slika 5.7) i sa popunjenim depresijama.

Da li se uklanjanjem svih depresija sa terena dobijaju realnije granice podslivova, ili se u težnji da se otklone neregularnosti u DMT-u povećala slivna površina znatno više nego što je to realno, u mnogome zavisi od stvarnih zapremina depresija (slika 4.3). Zapremina velike centralne depresije je  $V_2 = 115.7 \text{ m}^3$ , dok je prva sledeća depresija po veličini ona na jugu,  $V_5 + V_6 = 3.41 \text{ m}^3$ . Zapremine svih ostalih depresija su manje od  $0.1 \text{ m}^3$ . U procesu formiranja oticaja sa terena, površinska

<sup>13</sup>U određivanju granica sliva, projektant često, da bi bio na strani sigurnosti, uzima širu zonu nego što je to realno. Slična greška se i u ovom test primeru namerno simulira.

voda prvo popunjava depresije, a zatim se, ako je depresija “mala”, preliva i nastavlja da teče ka kanalizacionom sistemu. Kriterijum koja je depresija “mala” a koja “velika”, je očigledno vezan za pripadajuću slivnu površinu depresije (slika 5.6) kao i merodavnu kišu.

U test primeru, za proveru koje su depresije male, može se usvojiti kiša intenziteta  $I = 1 \text{ mm/min}$  i trajanja  $T_K = 20 \text{ min}$  (povratni period  $3 \sim 5$  godina). Za depresiju 2, kao i depresije 6, 10 i 12, koje se dreniraju u depresiju 2, slivna površina je  $A_2 = 2000 \text{ m}^2$ , pa je pala zapremina od kiše  $V_{bruto} = 2000 \times 0.02 = 40 \text{ m}^3$ . Kao gruba procena, može se uzeti da je u pretežno neurbanizovanom području koeficijent oticaja  $\eta = 0.40$  pa je ukupna zapremina vode koja dolazi do depresije 2 za vreme jedne kišne epizode  $V_{neto} = 0.40 \times 40 = 16 \text{ m}^3$ . Kako je zapremina depresije 2 znatno veća, može se zaključiti da njena slivna površina neće nikada učestvovati u procesu oticaja.<sup>14</sup>



Slika 5.9: Kreiranje DMT-a sa uklonjenim malim depresijama

Za sve male depresije (1, 3, 4, ...), sa zapreminom za red veličine manjom od neto zapremine vode od padavina, može se smatrati da su neinteresantne u procesu oticaja i na njihovom mestu se može umesto originalnog DMT-a koristiti DMT bez depresija. Na slici 5.9 je prikazan proces kreiranja DMT-a na kome su uklonjene samo male depresije. Primenjuju se standardne operacije GIS-a: prvo se reklasifikuje sloj sa depresijama, kako bi se napravila “maska” sa 1-cama na mestu gde treba korigovati DMT i 0-ma na ostalim delovima; množenjem maske i sloja DMT bez depresija, dobija se sloj sa 0-ma van malih depresija i kotama terena na mestu malih depresija; konačno, preklapanjem<sup>15</sup> takve slike sa originalnim DMT-om, dobija se DMT sa uklonjenim malim depresijama.

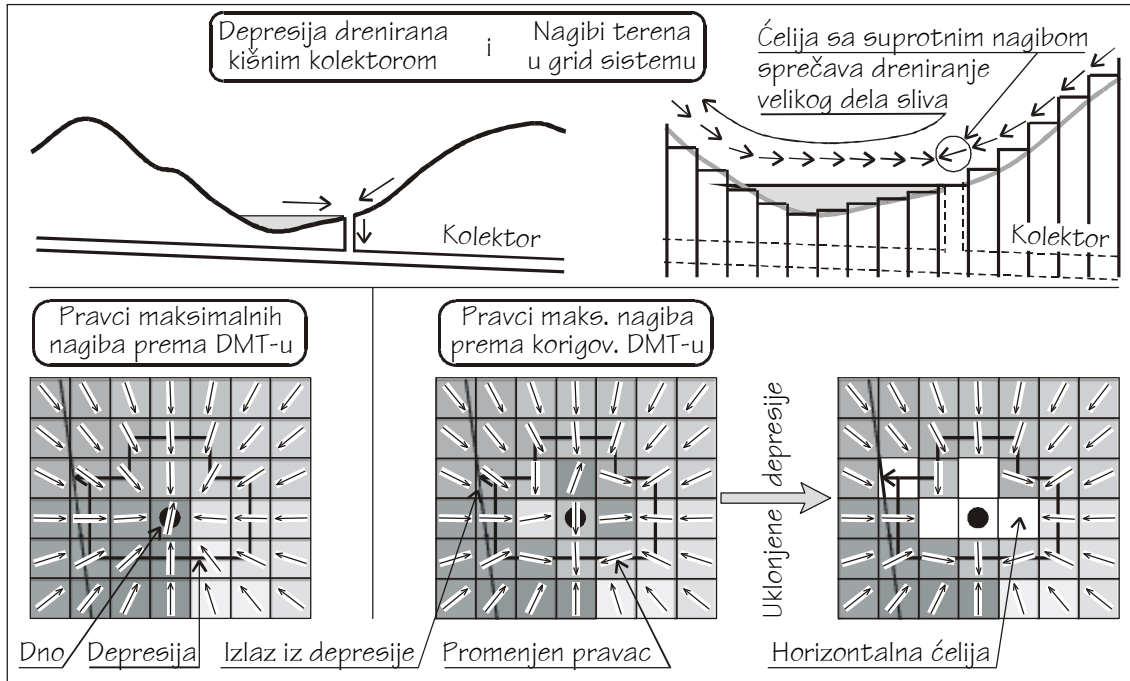
Dobijeni DMT bez malih depresija se može sada koristiti za postupak delineacije sliva. Prvi testovi su, međutim ukazali na još jedan problem: male depresije, koje se dreniraju direktno preko kanalizacione mreže (kao što su u datim primerima depresije

<sup>14</sup>Naravno, projektant može ovo da izmeni postavljanjem kolektora koji će doći do depresije na nekoj nižoj koti, čime se smanjuje korisna zapremina depresije. Jedan deo zapremine se prvo retenzira a zatim se ostatak vode sprovodi u kolektor. Ovaj problem će biti obrađen u poglavlju 7 *Koncepcija modela dvojnog odvodnjavanja urbanih površina*, tačka 7.3.2 *Veza kanalizacione mreže i površinskog toka*

<sup>15</sup>Na engleskom jeziku *overlay*.



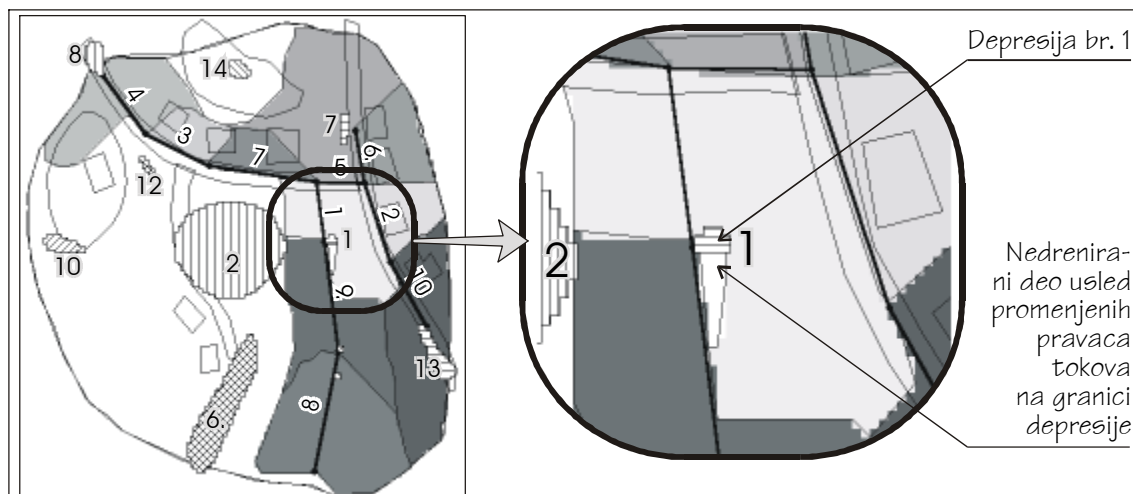
broj 1, 8 i 13), iako su u DMT-u zamjenjene horizontalnim površima, nisu obuhvaćene procesom delineacije i njihova slivna površina nije pripisana odgovarajućem kolektoru.



Slika 5.10: Pravci maksimalnih nagiba u okolini depresije koja se drenira preko kolektora

Na slici 5.10 je prikazan detalj jedne depresije, koja nema prirodni izliv već se drenira preko kolektora. Kod originalnog DMT-a, pre uklanjanja depresije, pravci maksimalnih nagiba su usmereni ka dnu depresije. Nakon uklanjanja depresije, sve ćelije unutar depresije, kao i ćelija koja predstavlja izlaz i koja je zajednička za depresiju i za kanalizacionu mrežu, su horizontalne. Zbog primenjenog algoritma za proračun nagiba terena, baziranog na  $3 \times 3$  prozoru, sve horizontalne ćelije na granici depresije, pa i izlazna ćelija, imaju nagib  $G > 0.0$ . Na slici 5.10 gore desno, krugom je označen pogrešan nagib ćelije, koji umesto da ide ka kolektoru, ima smer ka depresiji, sprečavajući dreniranje kompletne leve strane sliva. Na istoj slici dole u sredini (uveličan detalj iz test primera, okolina depresije broj 1), ćelija označena kao izlaz iz depresije, nakon korekcije DMT-a ima još uvek nagib ka slivu, sprečavajući kolektor da pokupi vodu iz depresije i sa njenog pripadajućeg sliva.

Da bi se uočeni problem rešio, potrebno je veštački promeniti nagibe u svim ćelijama koje pripadaju malim depresijama. Koristeći masku malih ćelija (međukorak prikazan na slici 5.9), stavlja se  $G = 0.0$  u sloju nagiba i  $A = -1.0$  u sloju pravaca maksimalnih nagiba (slika 5.10 dole desno). Sa tako izmenjenim slojem nagiba, urađena je delineacija na test slivu, slika 5.11. Jugozapadni deo sliva je ostao nedreniran, jer depresija 2 pokupi svu površinsku vodu. Takođe, manji deo na severnom delu sliva ima kontra nagib, prema severu, tako da nije obuhvaćen kanalizacionim sistemom. Ali, može se uočiti da je jedan manji deo sliva, koji bi po svoj



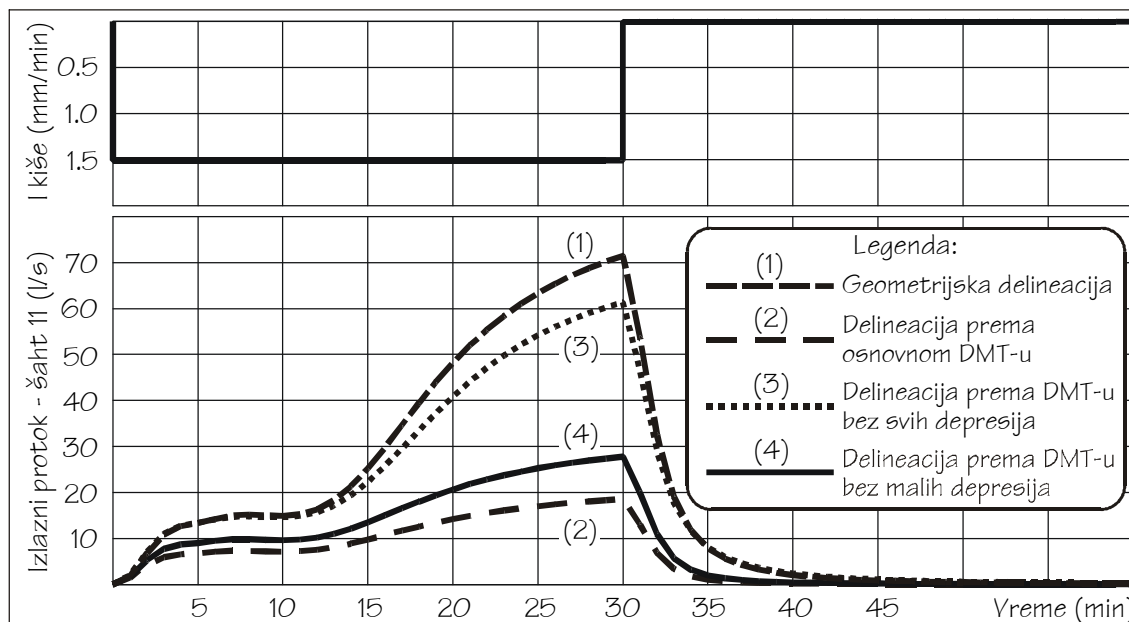
Slika 5.11: Delineacija sliva samo prema DMT-u, nakon uklanjanja malih depresija (levo) i detalj sa nedreniranom površinom uzvodno od depresije 1 (desno)

logici morao biti dreniran preko depresije 1 u kolektor 1, ostao nedreniran. Razlog za to se vidi na slici 5.10 dole, gde se na uveličanom delu test sliva vide pravci nagiba pre i posle korekcije DMT-a. Visine u ćelijama koje se nalaze na obodu depresije (vektorska granica depresije, crna linija, ide po sredinama ćelija na obodu depresije) nisu menjane, ali je pravac nagiba promenjen (opet zbog prozora  $3 \times 3$ ). U retkim slučajevima se može dogoditi da se pravac toliko promeni, da se na granici sa depresijom formira kontra nagib, koji će sprečiti dreniranje fizički uzvodnih površina (detalj na slici 5.11).

Primenom GIS operacija, moguće je zadržati originalne nagibe u ćelijama oko malih depresija. Potrebno je formirati sloj sa svim ćelijama=0 osim onih na obodu malih depresija=1. Koristeći takav sloj kao masku, mogu se preuzeti nagibi terena iz sloja originalnih nagiba i preklopiti sa slojem nagiba prema korigovanom DMT-u. Nakon ove korekcije, potrebno je uraditi već spomenutu korekciju vrednosti nagiba unutar malih depresija.

Broj potrebnih korekcija se može smanjiti, ukoliko se izbegne korišćenje DMT-a sa uklonjenim malim depresijama. Na osnovu originalnog DMT-a, kreira se, sa jedne strane, sloj sa depresijama i podacima o depresijama, a sa druge strane sloj nagiba i pravaca maksimalnih nagiba. Nakon reklasifikacije i uklanjanja velikih depresija, potrebno je GIS operacijama samo promeniti vrednosti u slojevima nagiba i pravaca nagiba, dok DMT može ostati nepromenjen. Sa tako pripremljenim podacima, procedura delineacije će dati rezultat istovetan sa onim na slici 5.11, s time što će i deo iza depresije 1 biti korektno dodeljen kolektoru broj 1. Finalni rezultat delineacije daje stvarnu ukupnu površinu sliva  $A_{SLIV} = 0.2276$  ha, odnosno, samo 51% površine zadatog sliva učestvuje u procesu oticanja kišnim kolektorom.

Da bi se pokazalo koliko različite oticaje daju pri simulaciji različite opcije u delineaciji sliva, na slici 5.12 su dati računski hidrografi na izlazu iz mreže test



Slika 5.12: Rezultati simulacije tečenja u kišnim kolektorima BEMUS programom, za korišćene test primere: (1) slika 5.2; (2) slika 5.7; (3) slika 5.8; (4) slika 5.11 (nakon obuhvatanja i malog nedreniranog dela podsliva 1)

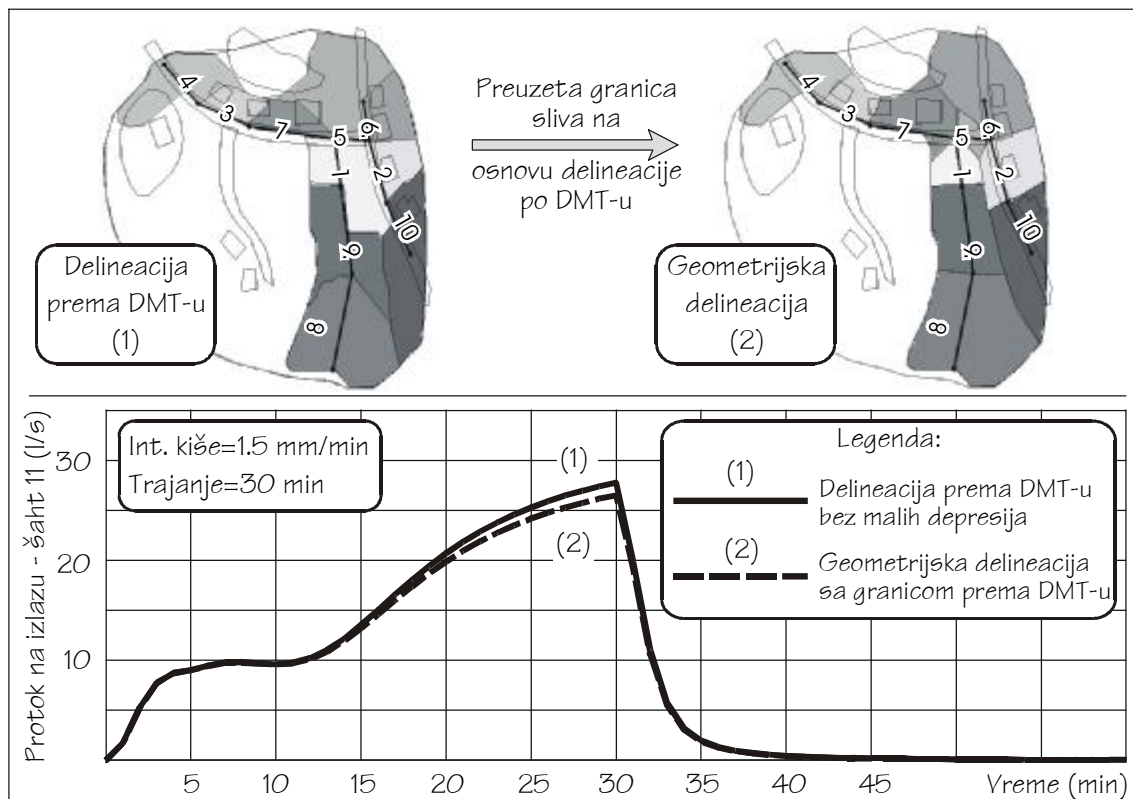
Broj na slici	$G_{SRED}$ (%)	$Q_{IZLAZ}$ (l/s)	$V_{IZLAZ}$ (m <sup>3</sup> )	$V_{INFILTR}$ (m <sup>3</sup> )	Prop. površ. (ha)	Neprop. površ. (ha)
1	15.0	71.5	72.2	0.4	0.39	0.06
2	16.9	18.6	21.8	0.4	0.15	0.02
3	15.3	61.4	64.1	0.4	0.36	0.06
4	16.3	27.7	31.6	0.4	0.19	0.03

Tabela 5.2: Osnovni pokazatelji rezultata simulacije na test slivu, datih na slici 5.12

primera, za kišu konstantnog intenziteta<sup>16</sup>, dok su u tabeli 5.2 dati odgovarajući numerički podaci. Na dobijenim hidrogramima, uočljiv je oticaj sa nepropusnih površina (prvih 10-tak minuta) a zatim oticaj sa propusnih. Dobijene razlike u protoku su direktna posledica razlika u ukupnoj slivnoj površini. Iz datog primera se može izvući zaključak da je *tačno poznavanje globalnih granica sliva od izuzetne važnosti za korektno modelovanje oticaja*. Takođe, preporuka iz literature, da se za delineaciju sliva koristi DMT bez depresija, ako se primeni nekritički, *daje po pravilu veću slivnu površinu nego što je realno, a samim tim i veće oticaje*.

Na slici 5.13 su dati rezultati poređenja delineacije prema terenu, nakon uklanjanja malih depresija i geometrijske delineacije, pri čemu je granica sliva određena

<sup>16</sup>Zbog jasnijeg prikaza rezultata simulacije i razlika između nekoliko načina delineacije sliva, simulacija je rađena za izuzetno jaku kišu, sa povratnim periodom od 100 godina. U analizi urbanih slivova, normalno se koriste kiše sa znatno manjim povratnim periodima.



Slika 5.13: Rezultati simulacije tečenja u cevima BEMUS programom, za korišćene test primere: (1) slika 5.2; (2) slika 5.7

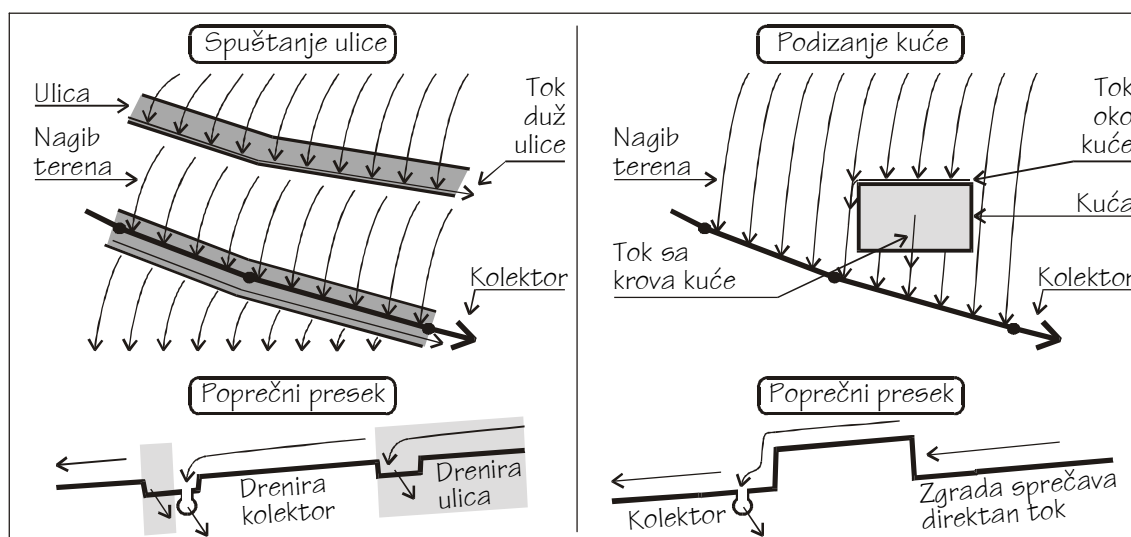
prema DMT-u (svim cevima kanalizacionog sistema se dodeli jedinstvena oznaka, pa se uradi delineacija sliva prema DMT-u: rezultat je ukupna slivna površ prema DMT-u). Svi zbirni parametri za model su isti (ukupna površina, prosečan nagib) ali se zbog različitih preraspodela parametara po kolektorima, kod geometrijske delineacije sporije formira oticaj, pa je izlazni protok na kraju kišne epizode nešto manji od protoka koji se dobija delineacijom prema DMT-u.<sup>17</sup>

Razvijeni informatički model dozvoljava projektantu da sam odlučuje o načinu određivanja granica podslivova. Preporuka je da se, u uslovima kada postoji kvalitetan DMT, prvo odrede sve depresije, napravi analiza koje su depresije male a koje velike, a zatim da se uradi delineacija sliva prema DMT-u sa uklonjenim malim depresijama. Da bi se postiglo da granica podsliva još bolje prati konfiguraciju terena ali i objekata na terenu (na primer, da ne preseca kuću, jer najčešće se krov manje zgrade drenira samo u jedan kolektor), neophodno je raspolagati sa kvalitetnim podacima o nameni površine terena i njih uključiti u proces delineacije. U naredne tri tačke ovog poglavlja, biće reči o načinima za napredniju kontrolu procesa delineacije prema DMT-u, baziranim na podacima o nameni površine terena.

<sup>17</sup>Za iste podatke i kišu veće dužine trajanja nego što je to pokazano na slici 5.13, oba hidrograma će težiti istoj vrednosti.

### 5.2.3 Uticaj sloja namene površina na delineaciju sliva – visinska korekcija DMT-a

Prva mogućnost uzimanja u obzir objekata na terenu u procesu delineacije sliva je kroz visinsku korekciju terena (tačka 4.2.1 *Uticaj objekata na površinski tok vode*) [65]. Ako se originalnom DMT-u, na mestu ulica i staza, doda negativna vrednost (spusti teren), sprečiće se odlivanje vode sa ulice, preko bankine. Takođe, na mestu kuća, zidova i drugih visokih objekata, na DMT se može dodati pozitivna vrednost, pa voda koja teče po terenu neće moći da se “popne” na zgradu.<sup>18</sup> Na slici 5.14 je šematski prikazan efekat takvih visinskih korekcija terena.

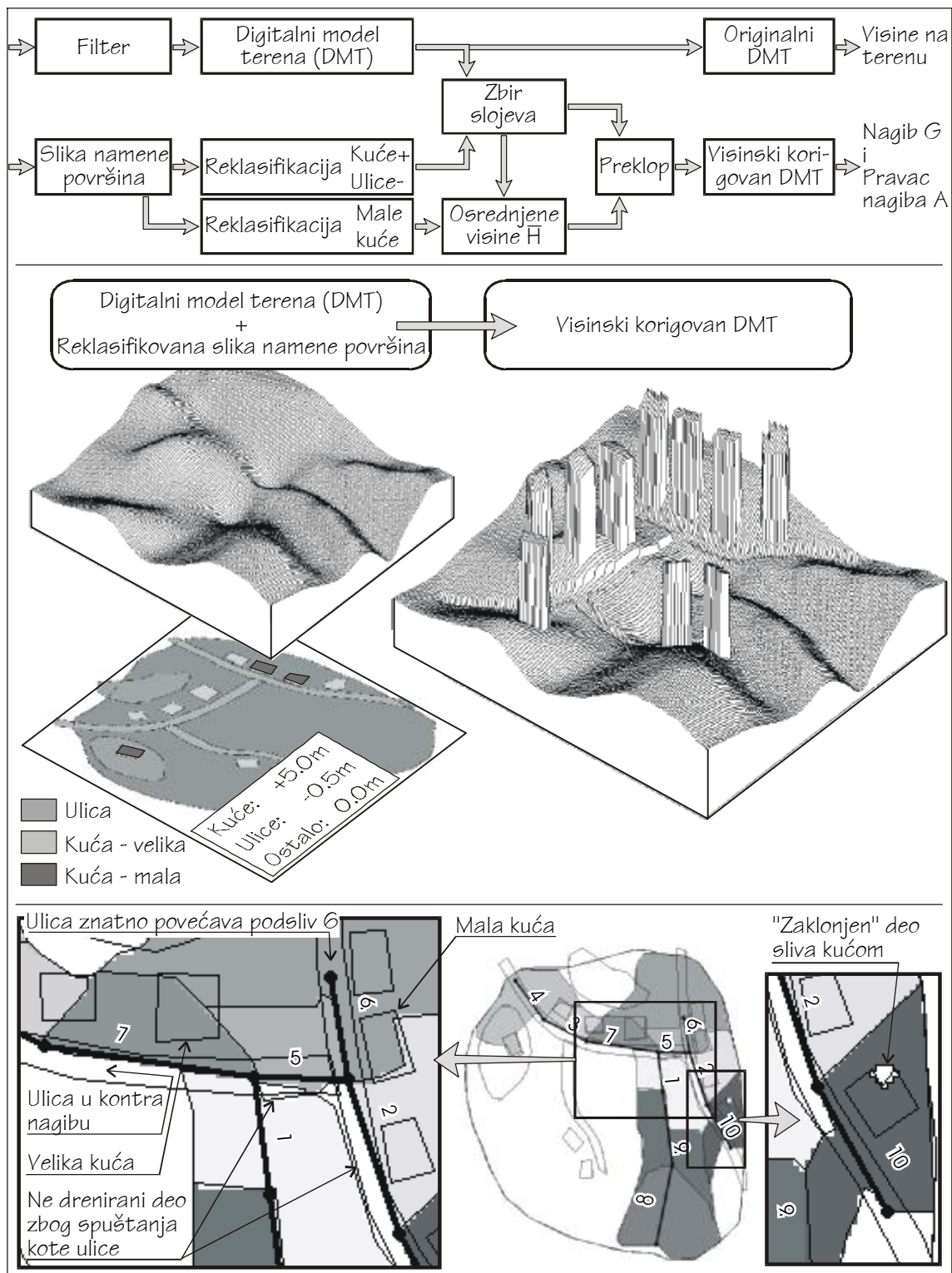


Slika 5.14: Efekat spuštanja terena na mestu ulice (levo) i podizanja na mestu kuća (desno) na određivanje slivnih površina

Sam algoritam za visinsku korekciju DMT-a je prikazan na slici 5.15 gore. Na osnovu sloja namene površina, reklasifikacijom se formira sloj koji sadrži pozitivne vrednosti na mestima gde su kuće, negativne na mestima gde su ulice i nule u ostalim ćelijama. Istovremeno se iz sloja namene površina izdvajaju male kuće, one čija je površina manja od neke granične vrednosti i za koje se opravdano može tvrditi da će celokupni krov biti dreniran u jedan kolektor. Velikim kućama se ostavlja mogućnost dreniranja i preko dva ili više kolektora, u zavisnosti od nagiba terena. Za male kuće, visina u korigovanom DMT-u će biti konstantna i jednaka srednjoj vrednosti već korigovanog DMT-a.

Nakon korekcije DMT-a, kreiraju se slojevi nagiba i pravaca nagiba. Male kuće imaju nagib 0 (ćelije unutar granice kuće) pa će celokupna horizontalna površina njihovog krova biti obuhvaćena prvim nizvodnim podslivom. Krovovi velikih kuća,

<sup>18</sup> Ako je DMT urađen u TIN sistemu, sličan efekat kao visinska korekcija grid DMT-a se postiže proglašavanjem granica objekata za linije prekida. Problem u takvom pristupu je potreba za velikom količinom podataka, koja drastično prelazi obim standardnih projekata OUP-a.



Slika 5.15: Visinska korekcija DMT-a: prikaz algoritma za korekciju (gore), rezultat korekcije sa razdvajanjem malih od velikih kuća (sredina) i rezultat delineacije sliva sa uveličanim detaljima (dole)

međutim, imaju nagib i pravac nagiba istovetan kao i DMT pre korekcije, čime se dozvoljava da granica podsliva preseče kuću, ako je to potrebno, na više delova.

Na slici 5.15 sredina, prikazani su ulazni slojevi i DMT nakon korekcije. Kao male kuće, selektovane su dve kuće na istočnoj strani sliva i jedna na zapadnoj. U rezultujućem korigovanom DMT-u, jasno se vidi horizontalna površina na mestu tih kuća, dok kod ostalih kuća visina krova prati osnovne nagibe terena.

Za dobru visinsku korekciju DMT-a, neophodno je raspolagati sa kvalitetnim slojem namene površina terena. Sloj koji je kreiran automatskom obradom skeniranih karti ili snimaka (satelitskih, aerofotogrametrijskih) sadrži puno “šuma”<sup>19</sup> i nedefinisanih granica, pa njegovo korišćenje za korekciju DMT-a može samo pogoršati celokupni proces delineacije sliva. Na slici 5.15 dole, dat je rezultat delineacije test sliva nakon visinske korekcije DMT-a sa koga su uklonjene male depresije. Ugao tečenja je konstantan za sve ćelije,  $\alpha_{i,j} = 90^0$  a granična vrednost nagiba  $G_{\text{MIN}} = 0.00$  m/m. Ukupna slivna površina, data sumom u izrazu 5.3 je  $A_{\text{SLIV}} = 0.21097$  ha.

U odnosu na rezultat delineacije samo prema DMT-u ( $A_{\text{SLIV}} = 0.2276$ , strana 105 i slika 5.13 levo na strani 107), ukupna površina sliva je neznatno manja. Podsliv 10 je izgubio deo površine, a i delovi ulica su ostali nedrenirani zbog njihovog spuštavanja. Na zapadnoj strani sliva, podsliv 4 je uključio i “malu” kuću, a došlo je i do značajnije preraspodele površina između podslivova 5 i 6, jer sada ulica veći deo vode dovodi do kolektora 6.

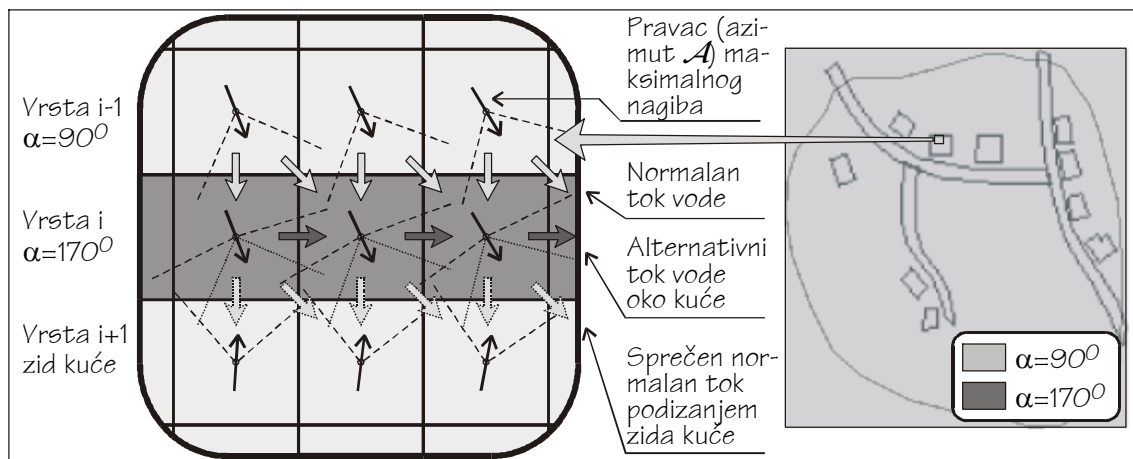
Visinskom korekcijom je postignut “logičniji” put vode po terenu, ali su se istovremeno otvorili i novi problemi. Voda uzvodno od gornje ulice neće formirati depresiju u ulici, već će teći niz ulicu do nekog nizvodnog čvora, ako postoji (slike 5.14 levo, i 5.15 dole levo). Takođe, voda uzvodno od zgrade će teći oko zgrade, ako to dozvoljava prirodni nagib terena, a neće se nagomilavati, kao što je to prikazano na slikama 5.14 desno, i 5.15 dole desno. Da bi se ovi problemi rešili, neophodno je uneti dodatne kontrole nad procesom delineacije sliva.

#### 5.2.4 Uticaj sloja namene površina na delineaciju sliva – promenljivi ugao tečenja i granična vrednost nagiba

U dosadašnjim analizama, ugao tečenja  $\alpha$  je bio uvek konstantan, isti za sve ćelije na slici. Da bi se omogućilo vodi da pokuša da obiđe prepreke nastale nakon visinske korekcije DMT-a (slika 5.15 dole), može se uvesti varijabilna vrednost ugla tečenja.

Na slici 5.16 levo, prikazan je veoma uveličan detalj uzvodno od kuće, nakon visinske korekcije DMT-a. Ako je  $\alpha_{i,j} = \text{Const.} = 90^0$ , voda iz  $(i - 1)$ -ve i  $i$ -te vrste neće biti drenirana. Ako se ugao  $\alpha$ , međutim, poveća samo na granici objekta (vrsta  $i$ ) na  $\alpha \approx 170^0$ , voda će krenuti oko kuće, u smeru nagiba terena.

<sup>19</sup>Na engleskom jeziku *noise*. Pod šumom se smatraju neklasifikovane ćelije, pogrešno klasifikovane ćelije ili čak i korektno klasifikovani objekti čija je površina izuzetno mala, od 2 do 4 ćelije.



Slika 5.16: Detalj uzvodno od kuće, nakon visinske korekcije DMT-a: pomoću promjenjenog ugla tečenja  $\alpha$  postiže se dreniranje “skrivenih” ćelija

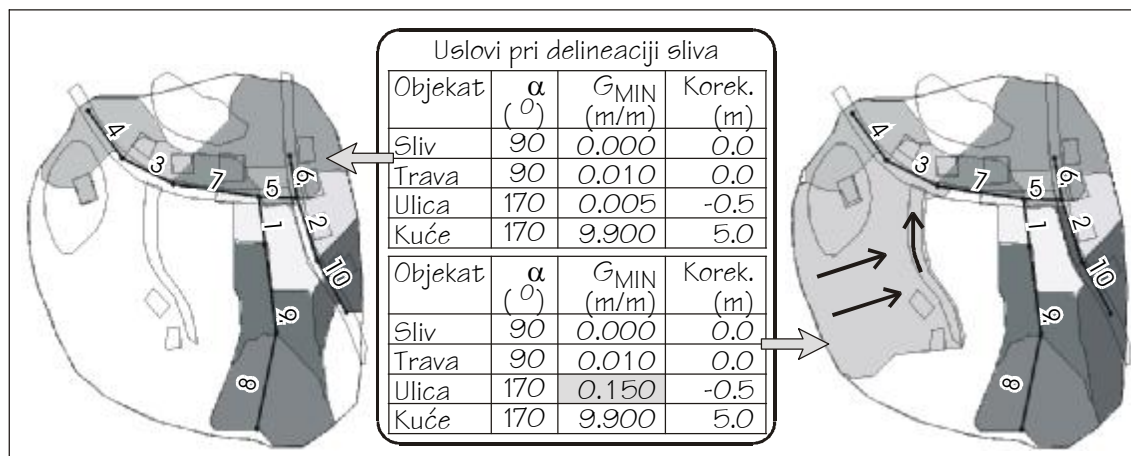
Primenom GIS operacija, reklasifikacije vektorskog sloja namene površina i rasterizacijom poligona (objekata) kao zatvorenih linija, moguće je formirati sloj uglova tečenja, koji će u svakoj ćeliji imati vrednost odgovarajućeg ugla  $\alpha$ . Na slici 5.16 desno, dat je sloj uglova tečenja za korišćeni test primer.

Pored promenljivog ugla tečenja i minimalna vrednost nagiba ćelije se može iskoristiti za bolju kontrolu delineacije sliva. U objašnjenju korišćenog algoritma delineacije (strana 98), rečeno je da se smatra da voda teče iz ćelije  $(i, j)$  pod uglom  $\alpha_{i,j} = (\mathcal{A}_2 - \mathcal{A}_1)_{i,j}$  ako je nagib ćelije  $G_{i,j}$  veći od nekog minimalnog nagiba  $G_{\text{MIN } i,j}$ , dok u suprotnom voda može teći na sve strane (kao da je ćelija horizontalna). Program za delineaciju prvo odredi granice podslivova, stavljajući da je  $G_{\text{MIN}} = \text{Const.} = 0.00$ . Druga iteracija programa sa izvodi samo ako je zadata vrednost  $G_{\text{MIN}} = \text{Const.} > 0.00$  ili ako je  $G_{\text{MIN } i,j}$  zadato preko posebnog sloja, odvojeno za svaku ćeliju  $(i, j)$ . U drugoj iteraciji, delineacija se obavlja samo nad ćelijama koje već nisu dodeljene nekom od podslivova.

Svi dosadašnji primeri delineacije su rađeni za konstantnu vrednost minimalnog nagiba  $G_{\text{MIN}} = 0.00$  m/m. Kako algoritam dozvoljava promenu minimalne vrednosti nagiba nezavisno za svaku ćeliju, može se kreirati sloj koji će biti u skladu sa slojem namene površina i tako simulirati različite uslove tečenja. Na primer, propusne površine se mogu reklasifikovati u nešto veće vrednosti  $G_{\text{MIN}}$  nego nepropusne, dok se za krovove kuća može staviti fiktivna, velika vrednost, čime će se postići da sve ćelije na velikom krovu, koje su ostale neklasifikovane (ako ih ima), pripadnu najnižem od okolnih kolektora.

U izboru vrednosti za  $G_{\text{MIN}}$  treba biti obazriv i konsultovati sloj maksimalnih nagiba terena (strana 52, tačka 3.2.4.1) kako se ne bi dobile potpuno nerealne granice podslivova. Na slici 5.17 levo, dat je rezultat delineacije sa korektnim vrednostima za  $G_{\text{MIN}}$ . Površina sliva je  $A_{\text{SLIV}} = 0.21417$  ha. Vidi se da su sada uklonjene neklasifikovane ćelije iza zgrade na istočnoj strani sliva (slika 5.15 dole desno), kao





Slika 5.17: Primeri delinacije sliva: sa korektnim parametrima za kontrolu delinacije (levo) i sa nerealno velikom minimalnom vrednošću nagiba ulice (desno)

i da su podslivovi 1 i 5 “pokupili” jedan deo vode sa ulica (slika 5.15 dole levo). Takođe, deo ulice iza kolektora 2 je ostao nedreniran zbog velikog poprečnog kao i kontra podužnog nagiba ulice. Na istoj slici desno, prikazan je rezultat delinacije sa namerno zadatom nerealno velikom vrednosti minimalnog nagiba za sve ulice. Dugačka ulica u srednjem delu sliva, sa kontra nagibom, sada može da sprovede vodu do kolektora 3 (na slici prikazano strelicama). Sva površina koja bi se, inače, drenirala u veliku centralnu depresiju, sada učestvuje u procesu oticanja. Ukupna slivna površina je povećana za 60% i iznosi  $A_{SLIV} = 0.34262$  ha.

Primena različitih vrednosti minimalnog nagiba kao način da se utiče na rezultat delinacije je nezavisan od ostalih korekcija. On se može primeniti na visinski korigovan ili nekorigovan DMT, sa konstantnim ili varijabilnim uglom tečenja  $\alpha$ . Takođe, podaci o nameni površina terena ne moraju biti u vektorskom formatu a algoritam za delinaciju nije posebno osetljiv na njihov kvalitet.

### 5.2.5 Unošenje inercijalne komponente u proces delinacije sliva

Na samom početku poglavlja 5.2 *Delinacija sliva prema DMT-u*, rečeno je da se u analizi toka vode po površini zanemaruje inercijalna komponenta, odnosno, da pravac maksimalnog nagiba  $A$  određuje pravac toka vode. Pravac maksimalnog nagiba je proširen uvođenjem ugla tečenja  $\alpha$ , uglavnom zbog potrebe prilagođavanja rasterskom načinu rada. Takođe, ugao tečenja  $\alpha$  je postao i funkcija sloja namene površina, kako bi se lakše drenirale zaklonjene površine nakon visinske korekcije DMT-a.

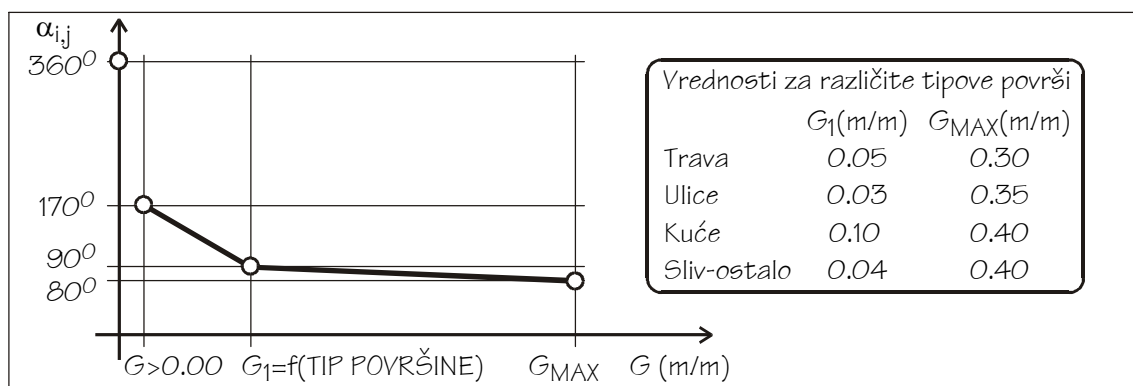
Da bi se unela određena doza inercije u proces delinacije sliva, potrebno je ugao tečenja  $\alpha$  učiniti i funkcijom nagiba terena  $G$  kao i količine vode koja prelazi preko ćelije (odnosno, broja uzvodnih ćelija). Osnovna ideja je jednostavna: što je nagib

terena veći i što je veći broj uzvodnih ćelija (odnosno, što je veća količina vode koja prolazi kroz ćeliju) to je ugao tečenja manji. Odnos brzine smanjenja ugla  $\alpha$  i povećanja nagiba terena, odnosno približavanja kolektoru, nije konstantan, već zavisi od vrste terena date u sloju namene površina.

Implementacija promene ugla  $\alpha$  u funkciji nagiba terena  $G$  je relativno jednostavna. Potrebno je za svaki tip objekta u sloju namene površina, definisati zavisnost  $\alpha = f(G)$ . To može biti jednostavna linearna funkcija ili segmentna kriva zadana nizom parova vrednosti  $(\alpha_i, G_i)$ . U izboru vrednosti  $G_i$  treba konsultovati sliku maksimalnih nagiba i izračunati statističke parametre nagiba za sve klase iz sloja namene površina.

	Trava	Ulice	Kuće	Sliv-ostalo
Površina (m <sup>2</sup> )	388.25	381.75	184.50	3524.00
% od sliva (4478.5 m <sup>2</sup> )	8.7	8.5	4.1	78.7
$\bar{G}$ (m/m)	0.1090	0.1164	0.2099	0.1534
$G_{\text{MIN}}/G_{\text{MAX}}$ (m/m)	0.002/0.245	0.001/0.287	0.022/0.330	0.001/0.351
$\sigma_G$ (m/m)	0.0672	0.0632	0.0712	0.0766

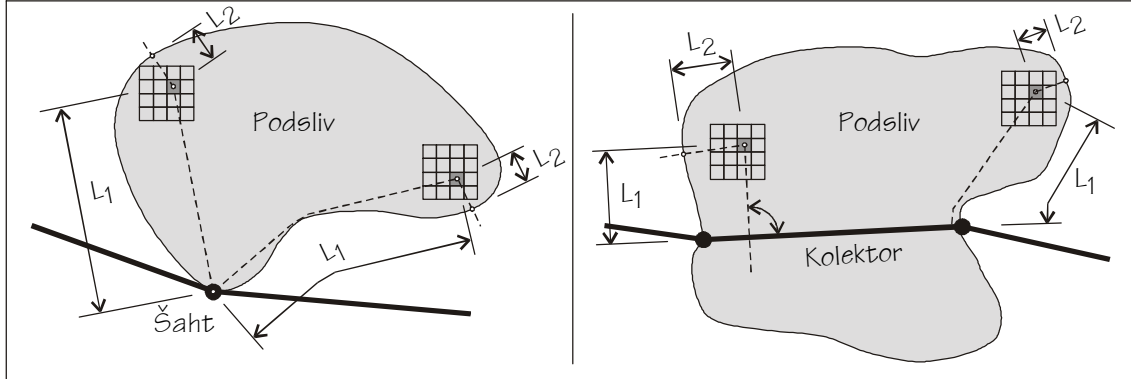
Tabela 5.3: Statistički pokazatelji nagiba terena prema klasama tipova površine



Slika 5.18: Zavisnost ugla  $\alpha$  od nagiba terena  $G$  za različite tipove površina

U tabeli 5.3 je dat rezultat analize nagiba terena za korišćeni test primer. Za potrebe delineacije, usvojena je zavisnost ugla  $\alpha$  od nagiba  $G$  sa dva prava segmenta i jednom singularnom tačkom (slika 5.18). Za svaki od tipova površine, usvojena je odgovarajuća vrednost tačke pregiba,  $G_1$ . Za  $G = 0.00$  m/m, algoritam delineacije se ne menja, ta ćelija može dati vodu na sve strane ( $\alpha = 360^\circ$ ). Minimalna vrednost ugla tečenja je ista za sve površine i iznosi  $\alpha = 45^\circ$ , mada će sam program korektno raditi za sve vrednosti ugla  $\alpha \geq 0.0^\circ$  zbog iterativnog određivanja nizvodnih ćelija (strana 99, prilagođavanje ugla  $\theta$ ).

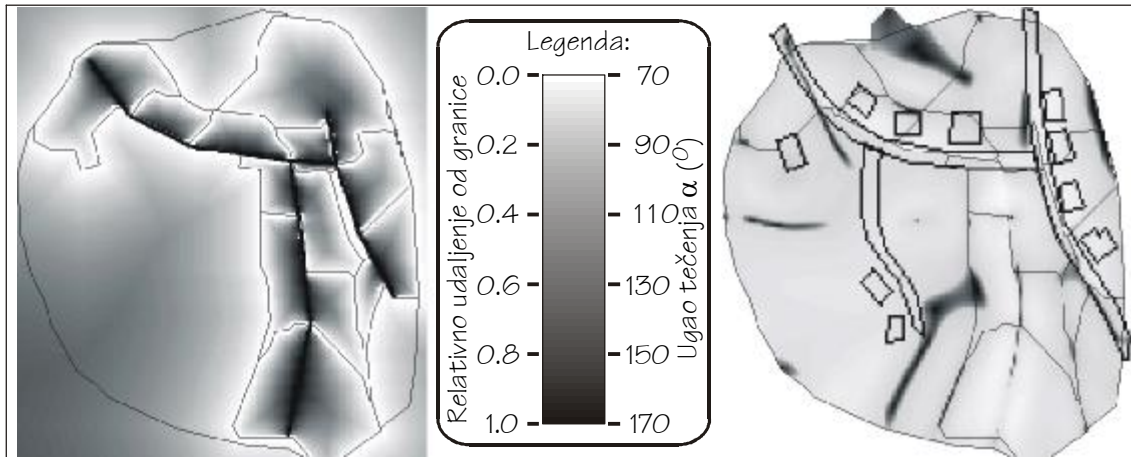
Zavisnost ugla tečenja  $\alpha$  od broja uzvodnih ćelija je nešto komplikovanije implementirati. Određivanje granice podsliva kreće od kolektora (čvora) u uzvodnom



Slika 5.19: Određivanje relativnog udaljenja od uzvodne granice sliva, za delineaciju prema čvoru (levo) i prema kolektoru (desno)

smeru, tako da se za  $(i, j)$  ćeliju ne može unapred znati koliko ima uzvodnih ćelija. Rešenje je u iterativnom postupku: prvo se odrede granice podslivova bez uzimanja u obzir korekcije ugla  $\alpha$  od broja uzvodnih ćelija. Nakon toga, kreira se sloj potrebnih korekcija  $\alpha$ , tako što se za svaku ćeliju unutar podsliva, odredi relativno rastojanje ćelije od uzvodne granice podsliva, u odnosu na rastojanje od kolektora do granice podsliva (slika 5.19):

$$L_{REL\ i,j} = \frac{L_{2\ i,j}}{L_{1\ i,j} + L_{2\ i,j}} \quad (5.4)$$



Slika 5.20: Slika relativnih udaljenja od granice sliva (levo) i finalna slika uglova tečenja, nakon prve iteracije delinacije test sliva (desno)

Na osnovu sloja relativnih rastojanja  $L_{REL\ i,j}$  (slika 5.20 levo), linearnom vezom se dolazi do faktora korekcije ugla  $\alpha$  za svaku ćeliju:

$$\alpha_{KOR\ i,j} = 1 + \alpha_{KOR,MAX} - 2\alpha_{KOR,MAX} \times L_{REL\ i,j} \quad (5.5)$$

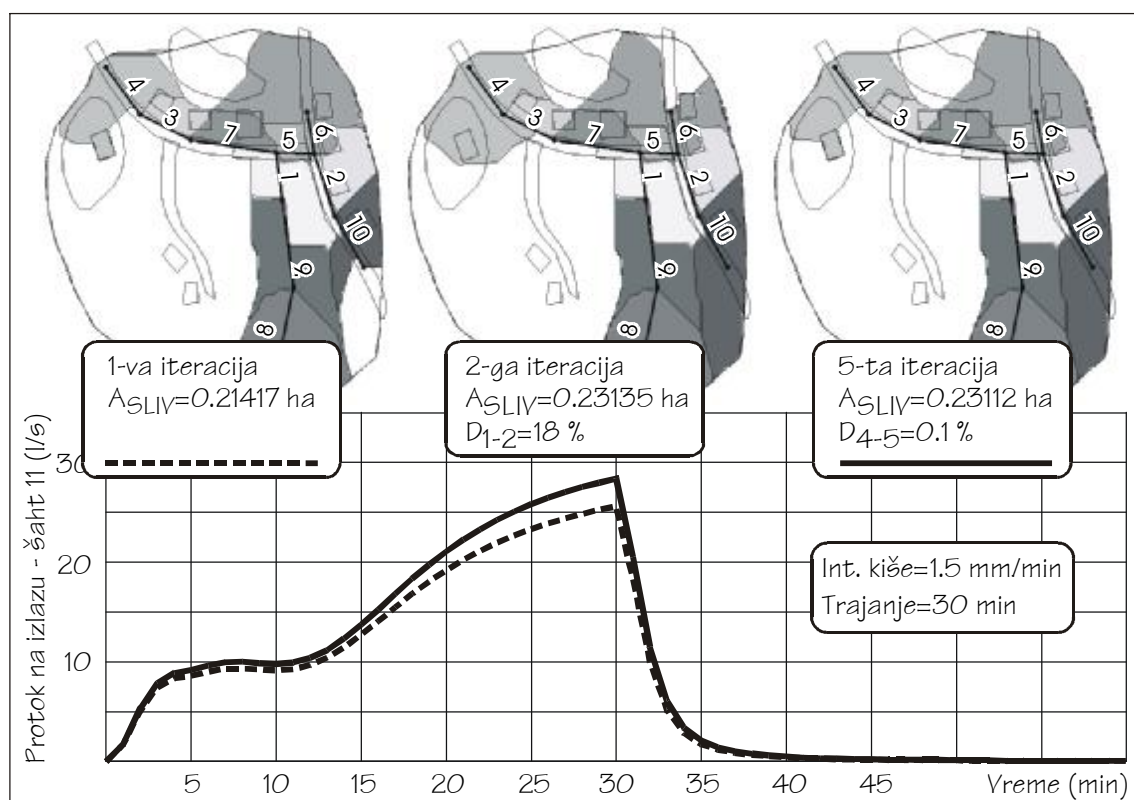
gde je  $\alpha_{KOR\ i,j}$  faktor korekcije ( $1 - \alpha_{KOR,MAX} \leq \alpha_{KOR\ i,j} \leq 1 + \alpha_{KOR,MAX}$ ), a  $\alpha_{KOR,MAX}$  maksimalna vrednost korekcije ugla i ima vrednost  $\alpha_{KOR,MAX} > 0.0$ . Za

$L_{REL\ i,j} = 0.0$  korekcija je  $\alpha_{KOR\ i,j} = 1 + \alpha_{KOR,MAX}$  a za  $L_{REL\ i,j} = 1.0$  korekcija je  $\alpha_{KOR\ i,j} = 1 - \alpha_{KOR,MAX}$ .

U drugoj iteraciji se korišćeni sloj uglova tečenja množi sa slojem korekcija i odrede se nove granice podslivova. Oduzimanjem slojeva druge i prve iteracije, odnosno  $(i + 1)$ -ve i  $i$ -te, sabiranjem površina svih ćelija čija je vrednost različita od nule i deljenjem sa ukupnom površinom sliva, dobija se pokazatelj konvergencije iterativnog postupka:

$$\Delta(\%) = \frac{\sum_{i,j} \Delta X \times \Delta Y}{A_{SLIV}} \times 100 \quad \forall \text{CELL}_{i,j} \neq 0 \quad (5.6)$$

S obzirom da se ugao tečenja  $\alpha$  koriguje usled tri različita uticaja, važan je redosled kojim se to čini. Sloj uglova  $\alpha$  se prvo kreira u odnosu na nagib terena  $G$  (slika 5.18). Zatim se taj sloj pomnoži sa slojem korekcija  $\alpha_{KOR\ i,j}$ , ako postoji (u drugoj i narednim iteracijama). Na kraju se, rasterizacijom promeni ugao tečenja na granicama ulica i kuća (tačka 5.2.4). Na slici 5.20 desno, prikazan je sloj sa uglovima tečenja za test primer, posle prve iteracije delineacije sliva.



Slika 5.21: Rezultati delineacije u prvoj, početnoj iteraciji (levo gore), drugoj (sredina gore) i završnoj, 5-toj iteraciji (desno gore) sa hidrogramom oticaja sa sliva za početnu i završnu iteraciju (dole)

Na slici 5.21 gore levo, prikazan je rezultat prve iteracije određivanja granica podslivova, sa  $\alpha_{KOR} = \text{Const.} = 1.0$  i bez uzimanja u obzir promene ugla tečenja

u funkciji nagiba terena (isti rezultat je prikazan i na slici 5.17 levo). Na sredini slike je dat rezultat u drugoj iteraciji, dok je na desnoj strani dat i finalni rezultat nakon 5 iteracija. Korišćena vrednost za  $\alpha_{\text{KOR,MAX}} = 0.05$  dok je zavisnost ugla  $\alpha$  od nagiba terena data na slici 5.18. Na slici 5.21 su dati i osnovni podaci o rezultatima delineacije, površina aktivnog sliva kao i razlika između dve susedne iteracije (izraz 5.6).

Sa slike se može videti da je, zbog varijabilnog ugla tečenja, već u drugoj iteraciji uključena i površina prekrivena malom depresijom 13 (slika 5.11) koja je bila “nepravедno” isključena usled korekcije DMT-a (spuštanje ulice, slika 5.15 dole). Na taj način je podsliv 10 ponovo dobio odgovarajuće granice. Od većih promena, vidi se da su podslivovi 4 i 6 naglo promenili površine kada je uključen u proračun varijabilni ugao tečenja, ali je već kroz par iteracija ta promena stabilizovana veoma blizu početnim vrednostima.

Na donjem delu slike 5.21 su prikazani hidrogrami na izlazu sa sliva. Dat je rezultat za granice sliva određene bez unošenja dodatnih korekcija u ugao tečenja  $\alpha$  (prva, odnosno početna, iteracija delineacije) i za finalno određene granice. Kao i u prethodnim komentarima rezultata simulacije tečenja na test slivu, razlike u protoku su, najvećim delom posledica različitih ukupnih slivnih površina.

## 5.2.6 Osetljivost algoritma na loše ulazne podatke

Delineacija sliva prema DMT-u je složen postupak, koji polazi od toga da su ulazni podaci, a to su DMT, sloj kanalizacione mreže i sloj namene površina, u maksimalno mogućoj meri tačni. U tačkama 3.2.3.7 *Realni izvori podataka za DMT u okviru projekta OUP* i 3.2.3.8 *Kontrola interpolovanog DMT-a* su detaljno obrađeni mogući problemi u kreiranju DMT-a i kako se oni uočavaju. Takođe, u tačkama 3.3.1.2 *Realni izvori podataka u okviru projekta OUP* i 3.3.1.4 *Kontrola kreiranog sloja namene površina* su obrađeni načini kreiranja sloja namene površina terena, kao i predlog da se, ukoliko budžet projekta ne dozvoljava detaljan unos svih objekata sa terena, sloj namene površina razdvoji na deo koji nosi informacije bitne za proračun zastupljenosti pojedinih tipova površina i na deo sa minimalnim brojem digitalizovanih najvažnijih objekata, koji će se koristiti za visinsku korekciju DMT-a.

Ukoliko zbog ograničenog budžeta projekta ili zbog kratkih rokova, nije moguće kreirati dovoljno pouzdane ulazne slojeve, preporučuje se korišćenje geometrijske delineacije sliva. Eventualno, ako postoji neproveren DMT, može se, radi upoznavanja terena, proći kroz postupak analize tečenja vode po terenu i kreiranja granice celog sliva, pa te rezultate iskoristiti radi što tačnijeg definisanja granice sliva za geometrijsku delineaciju (slika 5.13). Sa slika 5.12 i 5.21, jasno se vidi da je daleko najveći uticaj na formiranje oticaja (rezultat simulacije) tačno poznavanje granica sliva kao i učesće pojedinih tipova površina unutar sliva. Za istu slivnu površinu, unutrašnja preraspodela podslivova daje znatno manje razlike u hidrogramu (slika 5.13) i to se uglavnom odnosi na dinamiku hidrograma a ne na ukupno oteklu zapreminu.

Razvijeni postupci za delineaciju sliva su u manjoj ili većoj meri samo simulacija stvarnosti. Da li će, i koliko će, rezultati simulacije biti tačni, u najvećoj meri zavisi od ispunjenja brojnih polaznih pretpostavki. Inženjerski pristup problemu je da se za isti set podataka, koristeći sve komponente informatičkog modela kao alat, proveri nekoliko scenarija uz kompletnu simulaciju tečenja u kanalizacionoj mreži i bolje upozna sliv kao sistem. Na projektantu je da na osnovu ustanovljene osetljivosti sliva na moguće greške u ulaznim podacima donese odluku o računskim parametrima koje će koristiti u dimenzionisanju sistema.

### 5.3 Prikaz rezultata delineacije

Rezultat postupka delineacije sliva, bilo geometrijske ili prema DMT-u, je raster-ski sloj, u kome su sve ćelije koje pripadaju istom podslivu grupisane i imaju jedinstven broj:

$$\text{CELL}_{i,j} = \begin{cases} -1 & \text{van sliva, prema unapred zadatoj granici sliva} \\ 0 & \text{unutar sliva, ali ne pripadaju ni jednom podslivu} \\ k & 1 \leq k \leq N ; k \text{ redni broj čvora/cevi koji drenira podsliv} \end{cases} \quad (5.7)$$

gde broj  $k$  odgovara rednom broju čvora (ili kolektora, kao u test primerima) koji drenira podsliv (veza između rednog broja  $k$  i stvarnog imena šahta/cevi u bazi podataka se uspostavlja u toku rasterizacije kanalizacione mreže, tačka 3.1.3 *Konverzija vektorskog zapisa u rasterski*). Ćelije koje imaju vrednost 0, pripadaju ukupnoj slivnoj površini (odnosno pripadaju granici sliva koju je odredio sam korisnik), ali sa njih voda neće biti drenirana, tako da one ne učestvuju u formiranju oticaja. Ukupna aktivna slivna površina je:

$$A_{\text{SLIV}} = \sum_{i,j} (\Delta X \times \Delta Y) \quad \forall \text{CELL}_{i,j} > 0 \quad (5.8)$$

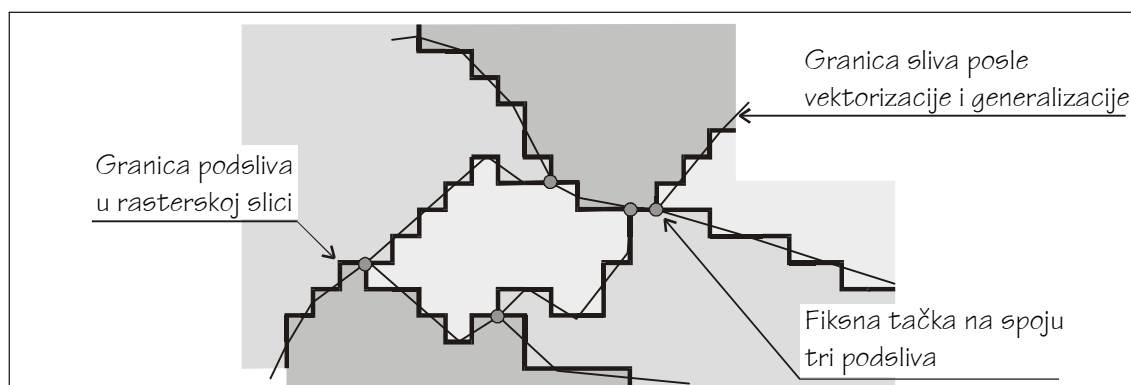
dok je odnos između površine sliva koja je unapred određena od strane projektanta i aktivne slivne površine:

$$n = \frac{A_{\text{UKUP}} - A_{\text{SLIV}}}{A_{\text{UKUP}}} = \frac{\sum_{i,j} (\text{CELL}_{i,j} == 0)}{\sum_{i,j} (\text{CELL}_{i,j} >= 0)} \leq 1.00 \quad (5.9)$$

Rasterski rezultat delineacije se teško integriše sa vektorski orijentisanim GIS i CAD sistemima, tako da je razvijen program za vektorizaciju granica sliva i kreiranje topološki uređenih poligona. Takođe, direktan prikaz sloja sa podslivovima je često neadekvatan, jer treba prikazati  $N$  poligona, gde je  $N$  često veće od 1000. Mada su savremeni sistemi za grafički izlaz sposobni da prikažu znatno više boja, zbog jednostavnijeg i jasnijeg prikaza, razvijen je program koji reklasifikuje sloj podslivova iz  $N$  različitih poligona u minimalni broj poligona sa brojevima koji se ponavljaju uz uslov da nikada dva poligona sa istim brojem ne dele zajedničku granicu.

### 5.3.1 Vektorizacija granica podslivova

U razvoju izloženog informatičkog modela za OUP, pošlo se od toga da se ravnopravno koriste rasterski i vektorski slojevi sa podacima. Razvijeni postupak delineacije sliva kao rezultat daje rasterski sloj. Da bi se održao integritet između vektorskih i rasterskih podataka kao i zbog mogućnosti prikaza i čuvanja podataka o podslivovima u isključivo vektorski orijentisanim GIS sistemima, napravljen je program za vektorizaciju granica podslivova.



Slika 5.22: Konverzija granica podslivova iz rasterskog u vektorski oblik

Na slici 5.22 je prikazan jako uveličan detalj iz rasterske slike podslivova. Prva verzija programa za vektorizaciju je jednostavno sledila granicu između dva podsliva, čime su se dobijali poligoni identični sa rasterskom slikom, ali sa mnogo kratkih pravolinijskih segmenata. Program dozvoljava postojanje više poligona sa istom oznakom, poligona sa oznakom 0 kao i manjih poligona unutar većih (razlikuju se pozitivno i negativno orijentisani poligoni). Algoritam programa je:

1. Inicijalizuj promenljive. Proveri raspoloživ prostor u memoriji i rasporedi ga između bloka za sliku podslivova i bloka za vektorizovanu granicu.<sup>20</sup>
2. Vrsta koja se razmatra se definiše kao prva vrsta u slici.
3. Za svaku ćeliju u razmatranoj vrsti, proveriti da li je  $N > 0$ ? Takva ćelija pripada  $N$ -tom podslivu. Da li je taj podsliv već obrađen u razmatranoj vrsti?
  - Da, nastavi da pretražuješ vrstu. Idi na korak 3.
  - Ne, početak vektorizacije novog podsliva. Označi razmatrani podsliv  $N$  kao obrađen i idi na korak 5
4. Da li je obrađena zadnja vrsta?

<sup>20</sup>Dok se obrađuje jedan podsliv, svi podaci treba da budu u memoriji. U programu nije predviđena dinamička realokacija u toku rada zbog dodatnog usporenja, već je predviđeno da, u slučaju kad se pojavi neki podsliv veći od alociranog bloka, program javi kolika je potrebna nova veličina bloka i da se ponovo pozove program sa tom veličinom kao dodatnim argumentom.

- Da, kraj programa.
  - Ne, pređi na sledeću vrstu i idi na korak 3.
5. Za svaku vrstu počev od razmatrane, traži sve ćelije sa brojem  $N$  koje se graniče sa nekom drugom ćelijom. Čuvaj koordinate segmenata graničnih linija. Ponavljaj sve dok u jednoj vrsti ima barem jedna ćelija sa brojem  $N$ .
  6. Poveži sve segmente, tražeći parove istih koordinata. Moguće je da postoji više zatvorenih nepovezanih poligona sa istim brojem.
  7. Odredi smer poligona, pozitivan je u smeru kazaljke na satu.
  8. Proveri da li se neki od poligona dodiruju? Ako se dodiruju spoji ih, a koordinate dodirnih tačaka razmakni za 5% veličine grida.
  9. Izbaci sve segmente koji leže na pravoj liniji.
  10. Zapiši vektorizovane poligone, prvo pozitivne pa zatim negativne.
  11. Nastavi sa ostalim ćelijama u razmatranoj vrsti, idi na korak 3.

Razvijeni program daje korektno vektorizovane i topološki uređene poligone, podslivove. Pokazalo se da su ti poligoni, međutim, za svakodnevnu primenu, predefinisani: mnogo malih kratkih segmenata daje veliku redundansu i predstavlja nepotrebno opterećenje za bazu podataka. Da bi se smanjio broj pravolinijskih segmenata u granici poligona, razvijena je procedura koja nakon vektorizacije granice podsliva i uklanjanja segmenata koji leže na pravoj liniji (korak 9), obavi njeno filtriranje (generalizaciju).

U proceduri za generalizaciju, prvo se odrede tačke koje čine granicu tri podsliva i koje moraju ostati fiksne. Zatim se između dve fiksne tačke provlači prava linija, čiji je početak fiksiran a kraj se postepeno pomera od jednog do drugog segmenta. Za svaki novi korak, proverava se da li generalisana prava linija zadovoljava postavljeni kriterijum, granicu dozvoljenog odstupanja od originalne, izlomljene linije (*ToleranceBand*):

$$\left( \sum_{N_k}^{N_{k+m}} \frac{d_{ij}}{m} < \text{ToleranceBand} \right) = \begin{cases} 1 & m = m + 1 & \text{idi na sledeći segment} \\ 0 & m = m - 1 & \text{kraj linije je na prethodnom segmentu, počni novu liniju} \end{cases} \quad (5.10)$$

gde je  $d_{ij}$  rastojanje između prave linije koja spaja segmente  $N_k$  i  $N_{k+m}$  i zamenjenih segmenata  $(i, j)$ .

Na slici 5.22 su prikazane granice podslivova nakon generalizacije. Koliko će nove granice verno slediti rastersku granicu, zavisi od samog korisnika, koji može da menja parametar *ToleranceBand* iz izraza 5.10.

### 5.3.2 Reklasifikacija i prikaz podslivova

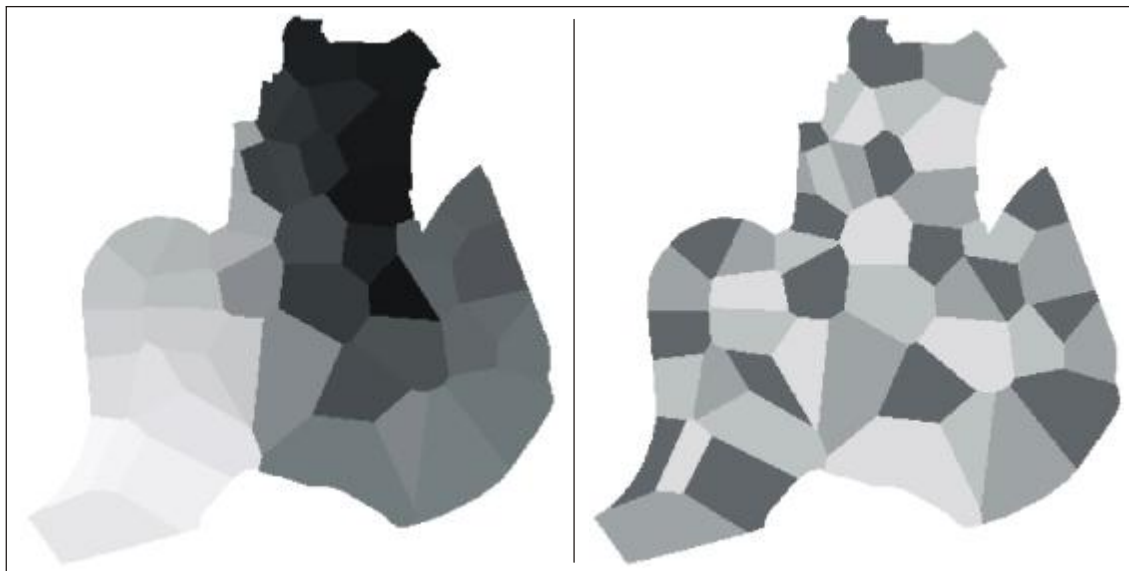
Sloj podslivova čine zatvoreni poligoni, sa rednim brojevima od  $-1$  (za oblast van sliva) do  $N$  (ukupan broj cevi ili čvorova). Za jasan prikaz svih  $(N+2)$  poligona,



potrebno je na izlaznom uređaju (ekranu i štampaču/ploteru) obojiti sve te površine jedinstvenim bojama, tako da se svaka površina jasno razlikuje od susedne. Za mali broj podslivova, kao što je to bio slučaj u korišćenom test primeru, postojeći izlazni uređaji ispunjavaju taj kriterijum. Za sliv sa više od 20-tak podslivova, međutim, direktan prikaz postaje neadekvatan i potrebno je reklasifikovati (promeniti redne brojeve) poligona u opseg brojeva od 1 do  $M_{\text{MIN}} \leq 6$ , uz uslov da ni jedan poligon ne deli granicu sa drugim poligonom istog broja.

Praktično, problem reklasifikacije se svodi na zadatak bojenja  $N + 2$  poligona sa minimumom (odnosno sa  $M$ ) različitih boja. Razvijeni program prvo kreira listu svih susednih poligona za svaki on  $N + 2$  poligona, a zatim u iterativnom postupku, menja boje (redni broj) poligona, vodeći računa da dva susedna poligona nemaju istu boju (broj). Menjajući početne rasporede poligona, program traži kombinaciju koja daje minimalni broj upotrebljenih boja  $M$ .

Za slučaj kada se reklasifikacija radi za podslivove, zgodno je na određeni način izdvojiti poligon koji predstavlja površinu van sliva (sa rednim brojem  $-1$ ) i sve poligone sa površinama koje se ne dreniraju (sa rednim brojem  $0$ ). U programu je zbog toga uvedena opcija fiksiranja određenih kombinacija koje će i nakon reklasifikacije ostati neizmenjene.



Slika 5.23: Reklasifikacija podslivova zbog jasnijeg prikaza: standardna slika sa sivim bojama koje odgovaraju rednom broju sliva, sa 52 različite boje (levo) i reklasifikovana u minimalni broj sivih boja (4+1 za deo van granice sliva) (desno). Primer sa eksperimentalnog sliva Miljakovac II, sa uprošćenom mrežom

U korišćenom test primeru, sa samo 10 cevi, odnosno  $10+2$  poligona, korišćeno je direktno bojenje podslivova prema svom rednom broju: što je bio veći broj, to je bila tamnija površina. Za veći broj slivova, kao što je to pokazano na slici 5.23 levo, zbog limitiranih mogućnosti štamparske tehnike, takav način prikaza je neade-

kvatan, pa je praktično nemoguće razlikovati susedne poligone. Na istoj slici, sa desne strane, je prikazan isti sliv sa svega 4 nijanse sive i belom bojom za područje van sliva. Svaki pojedinačni podsliv se sada jasno vidi, bez obzira na primenjenu štamparsku tehniku. Za stvarne primere iz prakse, sa preko 1000 podslivova, ova tehnika (ilustrovana na slici 5.23) bi dala još drastičnije razlike.

Prikazan sloj podslivova, na slici 5.23 desno, sme da se koristi, naravno, samo za vizualizaciju. U rasterskom sistemu, GIS upit sadržaja slike na određenoj  $X, Y$  lokaciji, daće samo redni broj korišćene boje. Da bi se dobili podaci o stvarnom podslivu, potrebno je povezati ovaj sloj sa stvarnim slojem podslivova preko zajedničkog koordinatnog sistema. Sa druge strane, u vektorskom GIS sistemu, prilikom preuzimanja vektorskih granica podslivova, kreiranih programom za vektorizaciju, potrebno je preuzeti i redni broj boje podsliva kao i stvarno ime cevi (šahta), iz konverziona tabele (poglavlje 3.1.3, slika 3.3 na strani 28), kreirane prilikom preuzimanja podataka iz spoljne baze i rasterizacije cevi, kako bi se uspostavile korektne relacije.

Kada se uspostavi veza između sloja podslivova i baze podataka u nekom od korišćenih standardnih GIS/CAD sistema, postoje razne mogućnosti za njihov prikaz. Pored razvijene reklasifikacije sa kriterijumom o upotrebi minimalnog broja boja, moguće je podslivove prikazati prema njihovoj površini, nagibu, obliku itd. Te mogućnosti za prikaz su sastavni deo GIS sistema i nisu posebno razvijane u informatičkom modelu za potrebe OUP-a.<sup>21</sup>

---

<sup>21</sup>Razvijeni program za reklasifikaciju prema minimalnom broju boja spada u grupu opštih analitičkih GIS modula i, u stvari, izlazi iz okvira informatičkog modela za projekte OUP-a. Program je razvijen jer praktično ni jedan standardni GIS paket, u trenutku razvoja ovog informatičkog modela, nije imao sličan modul.



## Glava 6

# Proračun parametara za “klasične” modele OUP-a

Analizom uslova tečenja vode po površini terena, kao i određivanjem granica podslivova za svaki računski čvor (ili cev), kreirani su svi slojevi potrebni za proračun parametara potrebnih za rad matematičkih modela za simulaciju OUP-a. Sa stanovišta modula koji na osnovu sloja podslivova računa te parametre, svejedno je da li su podslivovi određeni “ručno”, digitalizacijom svih poligona, ili automatski prema DMT-u, ili geometrijski. U sistemu integrisanom sa GIPS bazom, na primer, predviđeno je da nakon automatskog određivanja granica podslivova korisnik može sam da menja pojedine delove granica, nakon čega pristupa proračunu parametara. Zbog ove opcije postoji realna mogućnost da rasterski sloj podslivova na ovom koraku nije ni kreiran, ili da ne odgovara vektorskom sloju granica u korisničkoj bazi. U razvijenom informatičkom modelu predviđena je procedura koja proverava ovakve slučajeve i, po potrebi, preuzima granice slivova iz baze i rasterizuje ih, održavajući stalni integritet vektorskih i rasterskih slojeva.

Parametri za rad modela se nakon proračuna vraćaju u bazu podataka, u predviđena mesta (slika 3.1, strana 26). Pre poziva matematičkog modela, korisniku se ostavlja mogućnost da, još jednom, pregleda sve parametre i po potrebi ih promeni. Naravno, sračunati parametri su nezavisni od rezultata simulacije i određuju se jednom, pre početka simulacije.

## 6.1 Površina i oblik podsliva

Površina  $k$ -tog podsliva se računa kao površina zatvorenog poligona, definisanog sa  $N$  parova tačaka u vektorskom sistemu:<sup>1</sup>

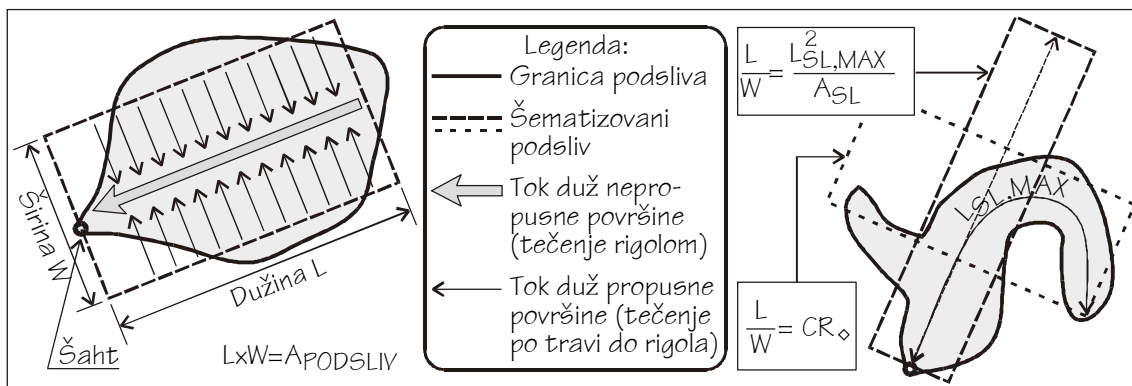
$$A_k = 0.5 \times \sum_{i=1}^{i=N} (X_i Y_{i+1} - X_{i+1} Y_i) \quad \text{gde je} \quad (X, Y)_{N+1} = (X, Y)_1 \quad (6.1)$$

pod uslovom da unutar poligona ne postoje drugi poligoni (nedrenirane površine ili drugi podslivovi). U suprotnom, treba od površine  $A_k$  odbiti sve unutrašnje poligone. U rasterskom sistemu, računanje površine podsliva se svodi na jednostavno prebrojavanje ćelija čija je vrednost jednaka rednom broju podsliva, bez obzira na postojanje unutrašnjih poligona:

$$A_k = \sum_{i,j} (\Delta X \times \Delta Y) \quad \forall \text{ CELL}_{i,j} == k \quad (6.2)$$

Oblik podsliva je parametar preko koga se vrši uprošćavanje realnog tečenja po terenu nepravilnog oblika, tečenjem po terenu pravougaonog oblika, sa jasno razdvojenom komponentom poprečnog tečenja po propusnoj (travi) i podužnog po nepropusnoj površini (ulici) [30, 83, 102]. Kako je oblik podsliva parametar koji u zavisnosti od korišćenog simulacionog matematičkog modela ima različite definicije, razvijeni su odvojeni moduli koji ga generišu na bazi postojećih slojeva u informatičkom modelu.

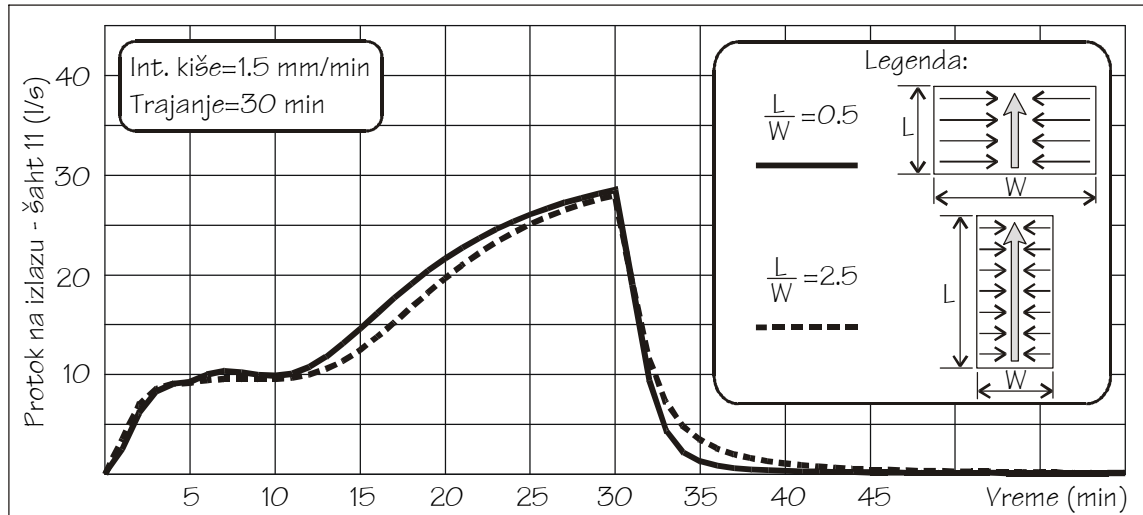
### 6.1.1 Oblik podsliva za BEMUS model



Slika 6.1: Šematizacija tečenja po površini sliva, primenjena kod BEMUS modela

<sup>1</sup>  $A_k > 0$  za poligone orijentisane u smeru kazaljke na satu, a  $A_k < 0$  za poligone suprotnog smera. Izraz ne daje korektnu površinu kod "uvrnutih" poligona (za potpuno simetričan uvrnuti poligon,  $A = 0.0$ ).

U BEMUS modelu, u modulu koji simulira površinsko tečenje, podsliv se menja pravougaonikom iste površine i odnosa stranica  $L/W$  (slika 6.1). Kod ručne pripreme podataka, parametar  $L/W$  se uglavnom nije unosio, već se ostavljao konstantnim za sve podslivove.<sup>2</sup> Na slici 6.1 je na levoj strani nacrtan podsliv koji je relativno lako zameniti pravougaonikom, dok je na desnoj strani dat realan primer kod koga je znatno teže odrediti  $L/W$  parametar.



Slika 6.2: Primer uticaja oblika sliva u simulacionom modelu BEMUS, na oticaj (odnos  $L/W$  za sve podslivove je konstantan)

Na slici 6.2 je prikazan uticaj oblika podsliva na izlazni hidrogram, na korišćenom test primeru, slika 5.21, strana 115. Primenjene su dve vrednosti  $L/W$ , konstantne za sve podslivove, dok su svi ostali parametri ostali nepromenjeni. Pri vrednosti  $L/W = 0.5$ , oticaj se brže generiše u drugom delu hidrograma, gde je dominantan oticaj sa propusnih površina, dok je, za  $L/W = 2.5$  nešto brži porast hidrograma u prvom delu, uz sporije ceđenje vode sa sliva, po završetku padavina.

U GIS programskim paketima, kao mera razuđenosti ćelija koje čine jednu kontinualnu grupu, koristi se indeks kompaktnosti  $CR$ ,<sup>3</sup> kvadratni koren odnosa površina grupe ( $A_G$ ) i kruga sa istim obimom kao i obim grupe ( $O_G$ ):

$$CR_o = \sqrt{\frac{A_G}{A_o}} = \sqrt{\frac{4\pi A_G}{O_G^2}} \quad CR_o \leq 1.00 \quad (6.3)$$

Za grupu oblika kruga, taj indeks je  $CR_o = 1.00$  a za kvadrat  $CR_o = 0.886$ . Ako se definicija indeksa kompaktnosti modifikuje, u kvadratni koren odnosa površine podsliva  $k$  i kvadrata sa istim obimom kao podsliv:

$$CR_{o,k} = \sqrt{\frac{A_k}{A_o}} = \sqrt{\frac{16A_k}{O_k^2}} \quad CR_o \leq 1.128 \quad (6.4)$$

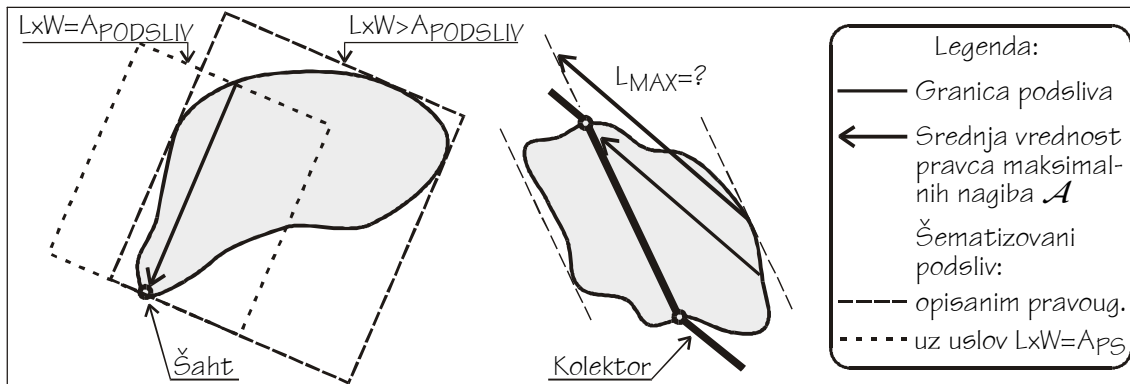
<sup>2</sup>Parametar  $L/W$  se često koristi za fino doterivanje modela prema rezultatima merenja, ako postoje za neki sliv (kalibracija modela), bez veće korelacije sa stvarnim oblicima podslivova.

<sup>3</sup>Na engleskom jeziku *compactness ratio*.

dobija se vrednost koja bi mogla da se upotrebi kao  $L/W$  parametar. Problem u ovakvoj definiciji parametra je, međutim, što nosi samo informaciju o odnosu oblika podsliva prema obliku kvadrata, dok se ne zna da li je podsliv duži ili širi (slika 6.1 desno).

U toku proračuna korekcije ugla tečenja  $\alpha$  od relativnog udaljenja od granice podsliva, u poglavlju 5.2.5 *Unošenje inercijalne komponente u proces delineacije sliva*, kao jedan od međurezultata, kreiran je sloj udaljenja od svake ćelije do pripadajućeg kolektora (čvora)  $L_1$ , slika 5.19, na strani 114. Ako se iz sloja udaljenja od kolektora, za svaki podsliv preuzme maksimalna vrednost, dobija se maksimalna dužina sliva  $L_{max}$  (slika 6.1 desno). U prihvaćenoj šematizaciji u BEMUS programu, to bi bila dužina pravougaonog sliva, dok je odnos  $L/W$  za podsliv  $k$  dat sa:

$$\left(\frac{L}{W}\right)_k = \frac{L_{k,max}^2}{A_k} \quad 0.00 < \left(\frac{L}{W}\right)_k < \infty \quad (6.5)$$



Slika 6.3: Šematizacija tečenja po površini sliva, prema srednjoj vrednosti pravca maksimalnih nagiba (dužina sliva  $L$  je u pravcu srednje vrednosti maksimalnih nagiba)

Odnos  $L/W$ , dat jednačinom 6.5, daje dobre rezultate, koji se za većinu podslivova poklapaju sa standardnim inženjerskim procenama. Kako je šematizacija podsliva pravougaonikom nastala uprošćavanjem površinskog toka, u informatičkom modelu je isproban i način proračuna  $L/W$  parametra u funkciji pravca nagiba sliva [14]. Za svaki podsliv  $k$ , iz sloja pravaca maksimalnih nagiba, odredi se srednja vrednost pravca maksimalnog nagiba  $\overline{\mathcal{A}}_k$ . Taj pravac se uzima za pravac dužine podsliva (dominantan pravac toka), dok se odnos  $L/W$  dobija kao odnos stranica pravougaonika, postavljenog pod uglom  $\overline{\mathcal{A}}_k$ , koji opisuje podsliv, slika 6.3 levo, pravougaonik dat punom linijom.

Ovako definisan odnos  $L/W$  često daje pogrešne rezultate, jer u znatnoj meri zavisi od ekstremnih delova na granici podsliva. U informatičkom modelu je isprobana i modifikovana verzija predloženog postupka: dužina pravougaonika  $L_k$  je jednaka maksimalnoj dužini sliva u pravcu srednjeg nagiba  $\overline{\mathcal{A}}_k$ , dok se širina računa

na osnovu ukupne površine podsliva, slika 6.3 levo, pravougaonik sa isprekidanom linijom. Dobijeni rezultati sada pokazuju veću konsistentnost, ali problem ostaje u proračunu dužine pravougaonika kada se podsliv drenira preko kolektora (slika 6.3 desno). U test primeru, čiji se rezultat daje u tabeli 6.1, to udaljenje je računato kao maksimum rastojanja svih ćelija od kolektora, korišćenjem pravca  $\bar{A}$ .

Podsliv	Površina (m <sup>2</sup> )	Obim (m)	$CR_o$	$CR_\diamond$	$L_{max}$ (m)	$L/W-1$	$\bar{A}$ ( <sup>o</sup> )	$L/W-2$
-			-	-		-		-
1	200.50	87.0	0.577	0.651	12.0	0.718	214.7	0.571
2	137.25	66.0	0.629	0.710	11.5	0.964	249.8	0.710
3	77.50	48.0	0.650	0.734	7.0	0.632	222.4	0.905
4	279.25	107.0	0.554	0.625	15.5	0.860	164.6	0.763
5	62.00	42.0	0.665	0.750	6.0	0.581	162.6	
6	441.00	126.0	0.591	0.667	19.5	0.862	182.3	0.800
7	105.00	56.0	0.649	0.732	6.5	0.402	149.8	
8	396.00	99.0	0.713	0.804	15.0	0.568	201.9	0.927
9	268.25	110.0	0.528	0.596	12.5	0.582	159.7	
10	343.50	111.0	0.592	0.668	23.0	1.540	147.3	1.182

Tabela 6.1: Površina, obim, kompaktnost, dužina i oblik podslivova računat na dva načina, za test primer sa slike 5.21 desno

U tabeli 6.1 su dati osnovni parametri za finalni rezultat delineacije test sliva prema DMT-u, prikazanog na slici 5.21 desno, strana 115. Pored površine i obima podslivova, dati su i indeksi kompaktnosti prema krugu ( $CR_o$ ) i prema kvadratu ( $CR_\diamond$ ). U koloni  $L/W-1$  je dat oblik podsliva prema  $L_{max}$ , maksimalnom udaljenju od kolektora, dok je u koloni  $L/W-2$  oblik podsliva prema srednjem pravcu maksimalnih nagiba  $\bar{A}$ .

Prema rezultatima iz tabele 6.1, za podslivove 5, 7 i 9, može se uočiti da algoritam koji uzima u obzir prosečan pravac nagiba, daje drastično lošiji rezultat od očekivanog. Razlog za to je što su ti slivovi izrazito “duguljastog” oblika, locirani duž kolektora. Takvi slivovi u šematizaciji treba da imaju veću širinu nego dužinu ( $L/W < 1.0$ ).

Na osnovu analiza algoritama za proračun oblika sliva ( $L/W-1$  kao čisto geometrijski i  $L/W-2$  sa uticajem pravca nagiba) na test primeru kao i na nekoliko drugih slivnih površina, odlučeno je da se u informatičkom modelu zadrži geometrijska varijanta (jednačina 6.5). Dobijeni rezultati su bolji nego rezultati drugog algoritma, za proračun se koriste već postojeći slojevi informatičkog modela, a algoritam podjednako dobro radi kako za mreže sa čvorom kao osnovom delineacije tako i za mreže sa kolektorom.



### 6.1.2 Oblik podsliva za MOUSE model

Slično kao i kod BEMUS modela, u MOUSE programu postoji opcija da korisnik za svaki podsliv zada njegovu dužinu, u metrima. Nakon analiza koje su sprovedene za BEMUS model, za MOUSE model je usvojeno korišćenje maksimalne dužine od računskog čvora (ili kolektora) do granice sliva  $L_{k,max}$ , kao dužine podsliva  $k$  (jednačina 6.5).

### 6.1.3 Oblik podsliva za Hystem-Extran model

U simulacionom modelu Hystem-Extran, podsliv se aproksimuje pravougaonikom i kolektorom, koji je postavljen sa jedne strane pravougaonika (nesimetrično) ili po sredini (simetrično). U oba slučaja, u obzir se uzima i udaljenje centra težišta nepropusnih površina od kolektora.



Slika 6.4: Parametri podslivova  $C_W$  i  $C_S$  za Hystem-Extran model [30]

Koristeći parametre  $C_W$  i  $C_S$ , obuhvaćeno je 20 mogućih slučajeva odnosa položaja kolektora u slivu i nepropusnih površina (slika 6.4). Da li je sliv simetričan ili ne, proverava se određivanjem odvojeno leve  $A_L$  i desne  $A_R$  površine sliva (orientacija je prema usvojenom pravcu kolektora, od uzvodnog ka nizvodnom čvoru) i njihovim upoređivanjem: ako je  $A_L \gg A_R$  ili  $A_L \ll A_R$  (oko 10 puta), radi se o nesimetričnom slivu, pa je  $C_W = 1$ .

Dalji proračun parametara  $C_W$  i  $C_S$  zavisi od toga da li je korisnik uneo podatke o nameni površine terena, odnosno, da li postoji informacija o nepropusnim površinama ili ne. U slučaju kada postoji sloj namene površina, ako je podsliv nesimetričan ( $C_W = 1$ ), parametar  $C_S$  je:

$$C_S = \begin{cases} 1, & L_{CG}/L < 3/8 \\ 2, & 3/8 \leq L_{CG}/L < 5/8 \\ 3, & 5/8 \leq L_{CG}/L < 7/8 \\ 4, & 7/8 \leq L_{CG}/L \end{cases} \quad \text{ili ako je } A_{IMP} = 0.0 \quad (6.6)$$

Ako je ustanovljeno da je podsliv simetričan, potrebno je odrediti oba parametra prema sledećim izrazima:

$$C_W = \begin{cases} 2, & L_{CG,R}/L < 3/8 \\ 3, & 3/8 \leq L_{CG,R}/L < 5/8 \\ 4, & 5/8 \leq L_{CG,R}/L < 7/8 \\ 5, & 7/8 \leq L_{CG,R}/L \end{cases} \quad \text{ili ako je } A_{IMP,R} = 0.0 \quad (6.7)$$

$$C_S = \begin{cases} 1, & L_{CG,L}/L < 3/8 \\ 2, & 3/8 \leq L_{CG,L}/L < 5/8 \\ 3, & 5/8 \leq L_{CG,L}/L < 7/8 \\ 4, & 7/8 \leq L_{CG,L}/L \end{cases} \quad \text{ili ako je } A_{IMP,L} = 0.0 \quad (6.8)$$

gde je  $L$  dužina kolektora,  $L_{CG}$  najkraće rastojanje između centra težišta nepropusnih površina uključujući krovove na celom slivu i kolektora,  $L_{CG,L}$  i  $L_{CG,R}$  kao i  $L_{CG}$  ali samo za površine sa leve odnosno sa desne strane kolektora,  $A_{IMP}$  nepropusne površine na slivu,  $A_{IMP,L}$  i  $A_{IMP,R}$  nepropusne površine na levoj i desnoj strani sliva.

U informatičkom modelu je napravljena verzija programa koja će i u uslovima nepostojanja sloja namene površina, odrediti ("proceniti") parametre  $C_W$  i  $C_S$ . Za nesimetričan sliv  $C_S$  se računa prema:

$$C_S = \begin{cases} 1, & A/L^2 < 0.3 \\ 2, & 0.3 \leq A/L^2 < 1.0 \\ 3, & 1.0 \leq A/L^2 \end{cases} \quad (6.9)$$

Za simetričan sliv, parametri  $C_W$  i  $C_S$  se računaju prema:

$$C_W = \begin{cases} 2, & A_R/L^2 < 0.3 \\ 3, & 0.3 \leq A_R/L^2 < 1.0 \\ 4, & 1.0 \leq A_R/L^2 \end{cases} \quad (6.10)$$

$$C_S = \begin{cases} 1, & A_L/L^2 < 0.5 \\ 2, & 0.5 \leq A_L/L^2 < 1.0 \\ 3, & 1.0 \leq A_L/L^2 \end{cases} \quad (6.11)$$

gde je  $L$  dužina kolektora,  $A$  ukupna površina podsliva,  $A_L$  površina podsliva sa leve strane kolektora, a  $A_R$  površina podsliva sa desne strane. Vrednosti za  $A/L^2$  su određene eksperimentalno: na nekoliko urbanih slivova, gde je postojao sloj namene površina, određivani su parametri  $C_W$  i  $C_S$  sa i bez tog sloja. Na kraju su usvojene ovde date granične vrednosti, 0.3, 0.5 i 1.0.

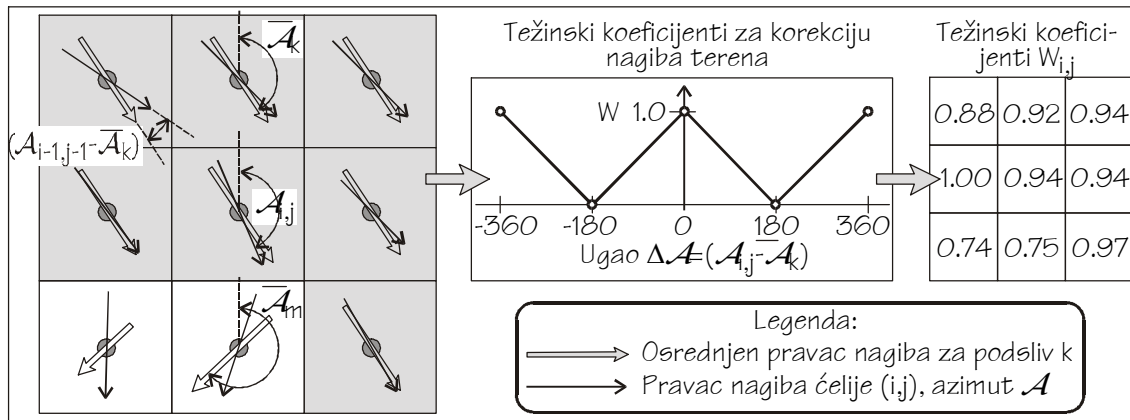
## 6.2 Nagib podsliva

Nagib  $k$ -tog podsliva,  $\overline{G}_k$  je srednja vrednost maksimalnih nagiba  $G_{i,j}$  svih ćelija koje pripadaju tom podslivu. U zavisnosti od modela, nagib se izražava u procentima

(BEMUS), promilima (MOUSE) ili korišćenjem klasa nagiba,  $S_C$  (Hystem-Extran):

$$S_C = \begin{cases} 0, & \text{ako ne postoji sloj sa maksimalnim nagibima} \\ 1, & \overline{G_k} < 1\% \\ 2, & 1\% \leq \overline{G_k} < 4\% \\ 3, & 4\% \leq \overline{G_k} < 10\% \\ 4, & 10\% \leq \overline{G_k} < 14\% \\ 5, & 14\% \leq \overline{G_k} \end{cases} \quad (6.12)$$

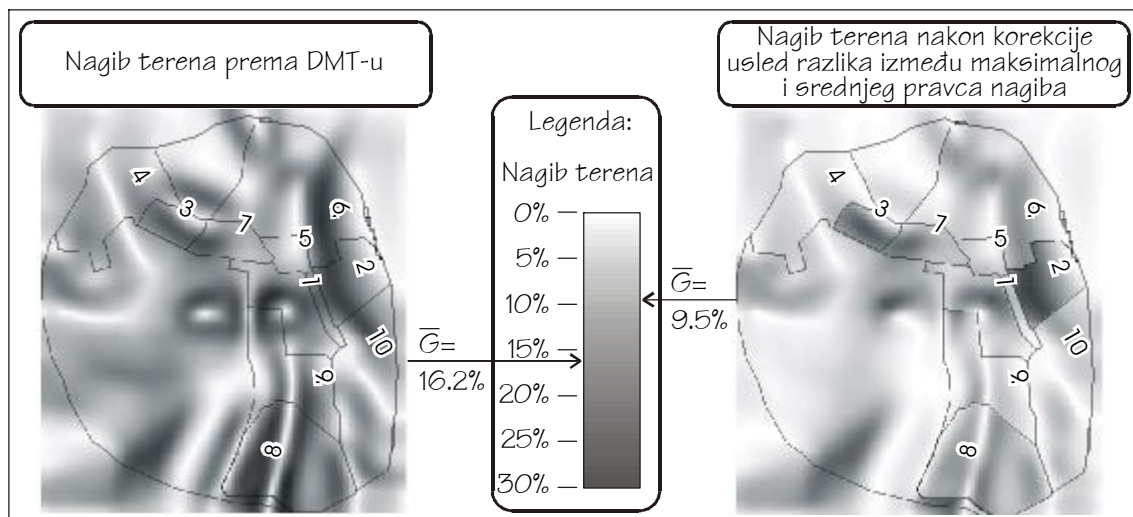
Nagib podsliva je parametar koji u simulacionom modelu određuje vreme potrebno da voda sa površine terena stigne do računskog čvora (šahta sa slivnikom). Pored već date definicije nagiba podsliva, u kojoj sve ćelije podjednako učestvuju u osrednjavanju, moguće je uvesti i težinske koeficijente za svaku ćeliju,  $W_{i,j}$ , u rasponu od 1.0 do 0.0. Težinski koeficijenti treba da budu funkcija doprinosa svake ćelije formiranju površinskog toka.



Slika 6.5: Određivanje težinskih koeficijenata za proračun srednjeg nagiba podsliva

Na slici 6.5 je dat jako uvećan detalj iz sloja podslivova, gde 7 ćelija pripada podslivu  $k$  a 2 ćelije podslivu  $m$ . Za podslivove  $k$  i  $m$  su određene srednje vrednosti pravaca maksimalnih nagiba,  $\overline{\mathcal{A}}_k$  i  $\overline{\mathcal{A}}_m$ . Za svaku ćeliju, računa se ugao koji predstavlja razliku između pravca maksimalnog nagiba  $\mathcal{A}_{i,j}$  i srednje vrednosti pravca maksimalnog nagiba za podsliv kome pripada ćelija  $(i,j)$ . Na osnovu tako određenih uglova, linearnom transformacijom uz uslove  $W = 1.0$  za  $\Delta\mathcal{A} = 0.0^\circ$ ,  $W = 0.5$  za  $\Delta\mathcal{A} = \pm 90^\circ$  i  $W = 0.0$  za  $\Delta\mathcal{A} = \pm 180^\circ$ , slika 6.5 srednji deo, dobija se matrica, odnosno sloj, težinskih koeficijenata  $W_{i,j}$  (desni deo slike).

Na slici 6.6 je dat sloj maksimalnih vrednosti nagiba, za test primer (sa leve strane) kao i nagibi nakon korekcije primenom težinskih koeficijenata. Prosečna vrednost nagiba za ceo sliv je pala sa 16.19% na 9.54% (smanjila se za 41.1%), najmanja promena je na podslivu 2 (nagib se smanjio za 2.5%) a najveća na podslivu 9 (za 60.2%). U okviru informatičkog modela za projekte OUP-a, podržana su oba načina proračuna prosečnih nagiba podslivova, mada se, u uslovima kada ne postoje rezultati osmotrenih padavina i oticaja, preporučuje drugi način.



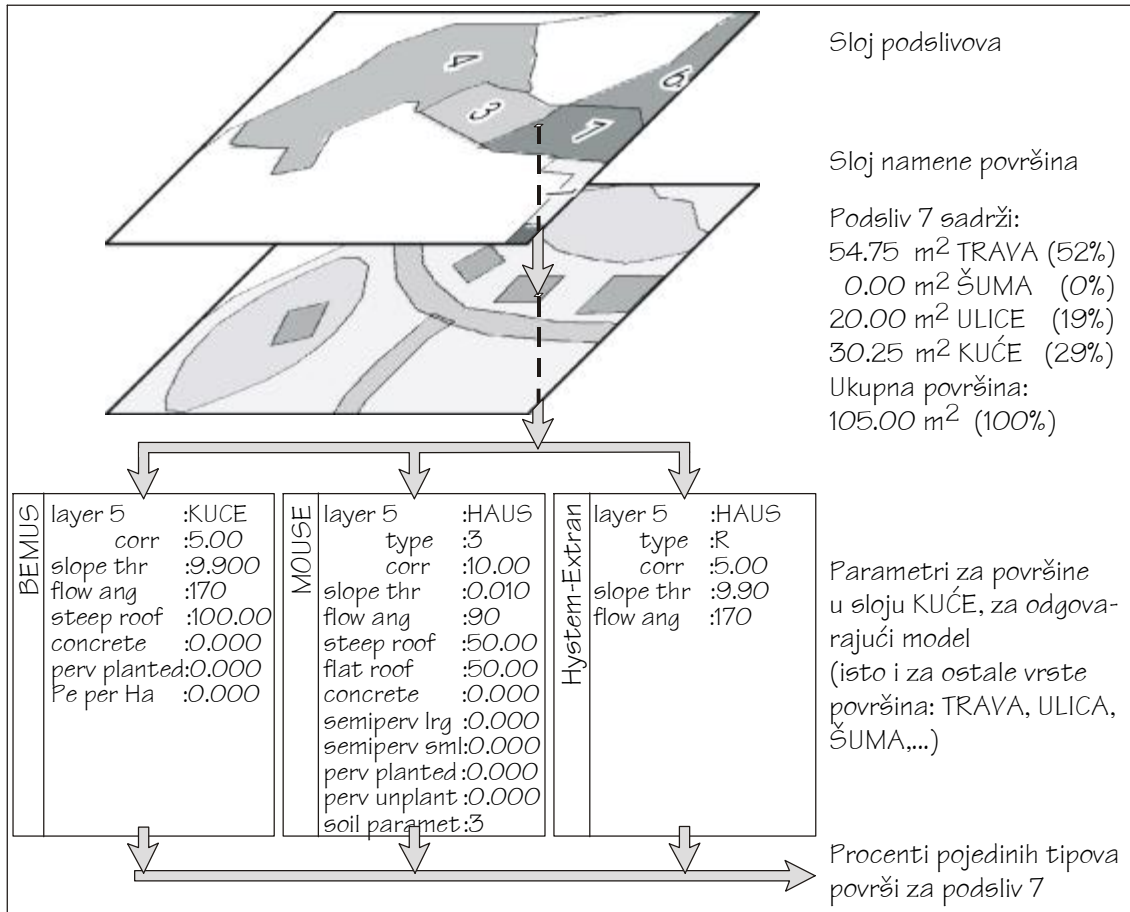
Slika 6.6: Nagib terena u test primeru, prema DMT-u (levo) i nagib korigovan nakon primene težinskih koeficijenata prema podslivovima

### 6.3 Zastupljenost različitih tipova površine

Ako je korisnik u toku pripreme podataka za projekat OUP-a uneo, na neki od načina, i podatke o nameni površine terena, nakon delinacije sliva je moguće izračunati procentualnu zastupljenost svakog od tipova površine za sve podslivove. Na osnovu procentualne zastupljenosti tipova površine u okviru jednog podsliva, kao i na osnovu karakteristika svakog od tipa površine koju je korisnik uneo u bazu podataka računaju se hidraulički parametri bitni za proces transformacije neto kiše u čist oticaj.

Na slici 6.7 je prikazan postupak proračuna: za svaku ćeliju u sloju podslivova, pogleda se sadržaj u sloju namene površina. Taj sadržaj je ključ za pristup bazi podataka, odakle se preuzimaju parametri za datu površinu, različiti za svaki od standardnih simulacionih modela OUP-a. Nakon sabiranja po svim ćelijama podsliva, računaju se procentualne zastupljenosti u odnosu na ukupnu površinu (na primer, za BEMUS model se računaju procenti strmih krovova, betonskih nepropusnih i propusnih površina, kao i specifično opterećenje upotrebljenim vodama).

U poglavlju 3.3 *Podaci o nameni površine terena*, tački 3.3.1.2 *Realni izvori podataka u okviru projekta OUP*, strana 57, rečeno je da se u uslovima ograničenog budžeta projekta, sloj namene površina može razdvojiti na dva dela: jedan koji sadrži minimalni broj vektorski definisanih krupnijih objekata, i drugi, koji može sadržati samo globalne tipove površina. Taj drugi sloj može biti i samo u rasterskom formatu, nastao kao rezultat automatske reklasifikacije avio ili satelitskih snimaka urbanog područja, ili ručnim unošenjem pojedinih zona sa specifičnim parametrima. Bitno je samo da informatički model, u toku obrade sloja podslivova i sloja namene površina, može naći u pratećoj bazi podataka za svaki od specificiranih tipova površina potrebne parametre za odgovarajući simulacioni model. Da bi ceo sistem



Slika 6.7: Zastupljenost različitih tipova površine u okviru podsliva

bio maksimalno operativan, za sve tipove površina u sloju namene površina, koji nisu određeni, kao i za slučaj kada ne postoji sloj namene površina, koriste se unapred pripremljeni, podrazumevani<sup>4</sup> parametri.

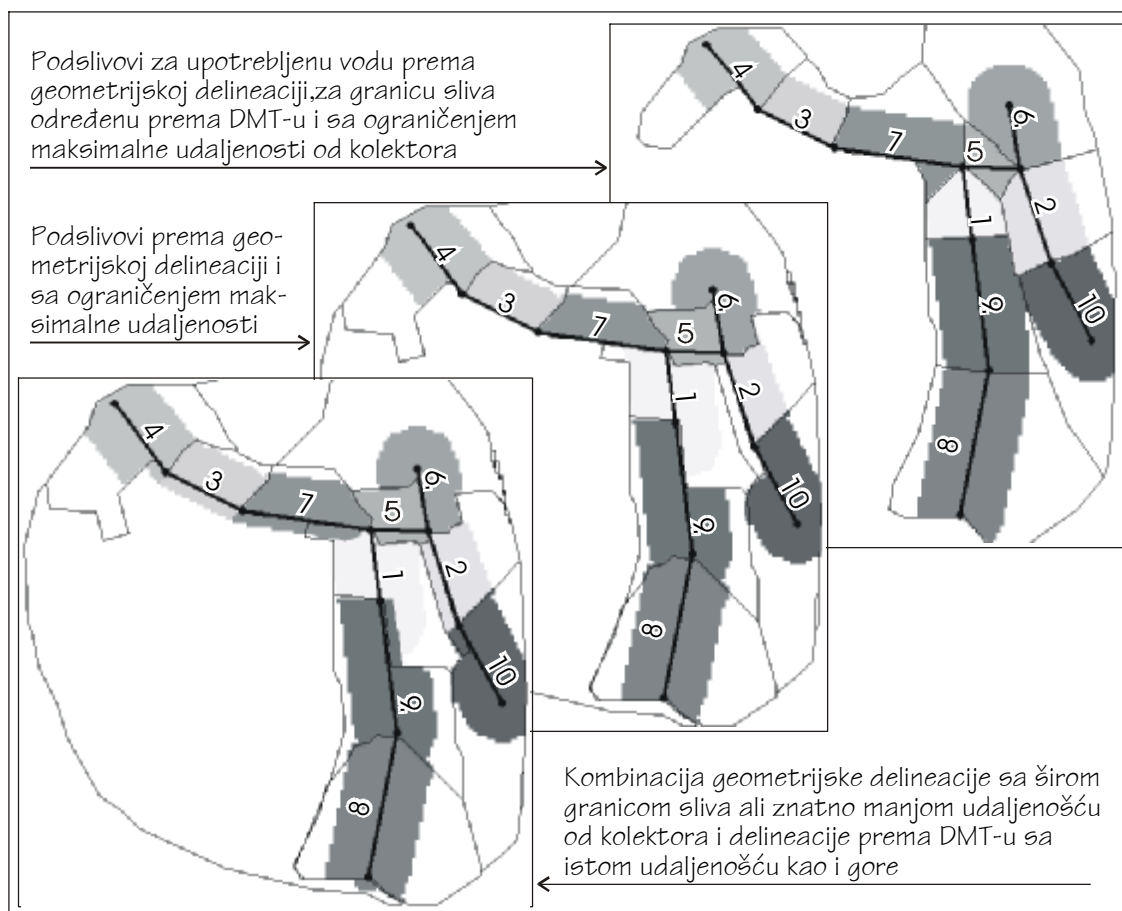
Razvijeni informatički model OUP-a ne razmatra podatke o površinskom sloju tla (poglavlje 3.4 *Podaci o površinskom sloju tla*). Ako takvi podaci postoje i ako su potrebni simulacionom modelu, sličnim postupkom kao što se dobijaju parametri slivnih površina, moguće je dobiti i parametre tla. Svaki podsliv u vektorskom sloju ima definisanu granicu kao zatvoreni poligon. Tu granicu, uz razvoj odgovarajućeg interfejsa, moguće je iskoristiti kao kriterijum za prostorno "isecanje" podataka iz baze podataka o tlu, a zatim odrediti potrebne prosečne, ili druge, parametre.

## 6.4 Procena količina upotrebene vode

Sve razvijene procedure za delinaciju sliva su upotrebne i u domenu upotrebjenih voda. Ako se kanalizaciona mreža kreira samo od cevi koje čine fekalni i

<sup>4</sup>Na engleskom jeziku *default*.

mešoviti sistem, moguće je odrediti pripadajuće delove sliva tim cevima i na osnovu sloja namene površina, u kojoj korisnik treba da unese podatak o ekvivalentnom broju stanovnika po hektaru, sabrati ukupan dotok upotrebjenih voda za svaki kolektor.



Slika 6.8: Tri načina delineacije sliva za određivanje količina upotrebjenih voda

Delineacija sliva se može uraditi, kao i kod kišnog sistema, geometrijski ili prema DMT-u. Kod geometrijske delineacije, moguće je koristiti granicu sliva određenu na osnovu DMT-a (kao na slici 6.8 gore desno) ili postaviti novu granicu, prilagođenu samo kanalizaciji za upotrebjene vode. Geometrijsku delineaciju sa korigovanom granicom ima smisla raditi kod naselja na izrazito ravnom terenu, gde je logično da su izvori upotrebjenih voda spojeni na najbliži kolektor. Sa druge strane, na delovima naselja sa izrazito nagnutim terenom, logičnije je raditi delineaciju prema DMT-u: veća je šansa da priključci na kanizacioni sistem prate nagibe terena nego da su izvedeni u kontranagibu.

Bez obzira da li se delineacija radi geometrijski ili prema DMT-u, u pojedinim slučajevima je dobro uvesti ograničenja u pogledu maksimalnih dužina priključaka na kanalizaciju. Naime, u slabo urbanizovanim područjima, gde kanalizacija za

upotrebljene vode nije razgranata, delineacijom sliva se mogu dobiti podslivovi velike površine i dužine. Pošto je malo verovatno da će se objekti koji su dalji od neke određene dužine (na primer 100 m) priključivati na kanalizaciju, potrebno je to ograničenje uneti u rezultat delineacije. Primer primene takvog ograničenja je dat na slici 6.8, gde se odstojanje od kolektora računa kao dužina  $L_1$ , sa slike 5.19 (strana 114).

U uslovima kada je teren sa velikim nagibima, treba koristiti delineaciju prema DMT-u (slika 6.8 sredina). Međutim, dobijenom rezultatu se može uputiti dosta realna zamerka: mada kućni priključci prate nagib terena, malo je verovatno da se neko ko je svega par metara od kolektora, i pored kontra nagiba, neće priključiti na taj kolektor. Zbog toga je uvedena izmena u standardnu proceduru delineacije sliva prema DMT-u: prvo se uradi geometrijska delineacija uz "oštrije" ograničenje maksimalne dužine priključka (na primer od 10-tak metara) a zatim se nad preostalim delom sliva uradi delineacija prema DMT-u sa većom dužinom ograničenja.

Rezultat korigovane delineacije prema DMT-u je prikazan na slici 6.8 dole levo. Na slici se vidi da su podslivovi 2, 3 i 7 dobili manje površine na terenu koji je u kontra nagibu. Takođe, površina sa leve strane kolektora 9, koja je ranije drenirana preko kolektora 1 (zbog nagiba terena) je sada pripala kolektoru 9 (isto važi za kolektore 7 i 1).

## Glava 7

# Koncepcija modela dvojnog odvodnjavanja urbanih površina

Svi do sada razvijeni alati i postupci su imali za cilj informatičku podršku postojećim, fizički baziranim modelima simulacije odvodnjavanja urbanih voda. U prvoj fazi, alati su spoljne aplikacije koje preuzimaju potrebne podatke iz postojećih baza podataka i, nakon njihove analize, vraćaju nove informacije u baze. U drugoj fazi, koja je već delimično ostvarena, planira se integracija informatičkih alata sa postojećim simulacionim paketima<sup>1</sup> čime će se projektantima sistema za odvodnjavanje znatno olakšati rad.

Integracija prikazanih hidroinformatičkih alata sa postojećim matematičkim modelima je, međutim, samo prvi korak. Da bi se postigla potpuna integracija, odnosno da bi se iskoristili u potpunosti razvijeni alati, potrebno je promeniti i postojeće matematičke modele.<sup>2</sup> Još na nivou koncepta rešenja problema urbanih voda, prikazanom na slici 2.1 na strani 8, potrebno je hidroinformatičku komponentu aktivno uključiti u proces, čime će ona postati sastavni deo globalnog matematičkog modela. Tek tada će razvijeni alati prestati sa pasivnom ulogom “jednosmernog” pripremanja informacija za OUP model, već će aktivno, preko “dvosmerne” veze učestovati u procesu modelovanja.

U nastavku ovog poglavlja, prvo će se definisati jedan od trenutno najaktuelnijih problema koji je teško rešiv (ili nerešiv) sa postojećim standardnim simulacionim modelima OUP-a. Posle kratkog prikaza savremenih trendova u razvoju modela OUP-a, predlaže se model dvojnog odvodnjavanja koji je dovoljno brz i robustan za inženjersku primenu. U ovom radu se daje samo koncept rešenja modela, sa opisom potrebnih parametara koji se mogu odrediti korišćenjem razvijenih alata. Takođe,

---

<sup>1</sup>“Paket” je širi pojam koji obuhvata grafičku podršku za unos podataka, bazu podataka i simulacioni model.

<sup>2</sup>Proces u kome razvoj informatičkih alata, prvobitno razvijenih da služe matematičkim modelima, utiče informatičkom povratnom spregom na te iste matematičke modele, se događa i u drugim sferama računске hidraulike. Primer je model LES (Large Eddy Simulation) koji je nastao kao rezultat razvoja informatičkih mogućnosti podele prostora na male zapremine u okviru kojih se modeluje turbulencija dok se veći vrtlozi direktno računaju.

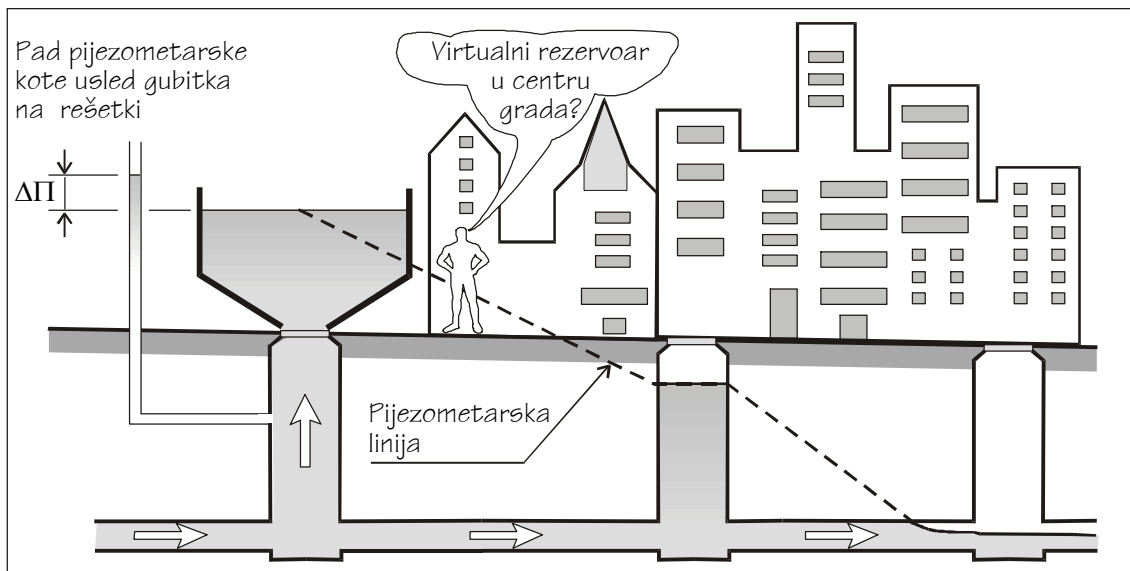


predlaže se i način implementacije modela korišćenjem programskih agenata.

Naravno, ovde data rešenja i predlozi modela su samo prvi korak u kreiranju funkcionalnog programa. Neki preliminarni radovi ukazuju na izrazite probleme u sferi numeričke nestabilnosti pri interakciji dve mreže (površinske i podzemne) kao i znatno većoj osetljivosti na kvalitet ulaznih podataka. Takođe, potrebno je pored rada na razvoju programa, učiniti određene napore da se dođe i do kvalitetnih eksperimentalnih podataka u kontrolisanoj sredini (laboratoriji i na terenskim eksperimentalnim slivovima). Za sada je fond raspoloživih podataka o izlivanjima na teren veoma siromašan.

## 7.1 Definisane probleme u urbanom odvodnjavanju

Postojeći fizički bazirani modeli OUP-a, uz pažljivu kalibraciju manjeg broja parametara, pouzdano simuliraju rad sistema u redovnim uslovima: sva kiša koja preostane nakon infiltracije i popunjavanja depresija na terenu biva drenirana kanalizacionim sistemom, koji je opet tako dimenzionisan da prihvata sve površinske i upotrebene vode. Slučaj kada kanalizacioni sistem dolazi pod pritisak, ali se voda još uvek ne izliva na teren, unosi nešto više komplikacija u proračun, ali je takođe standardno obuhvaćen modelima.



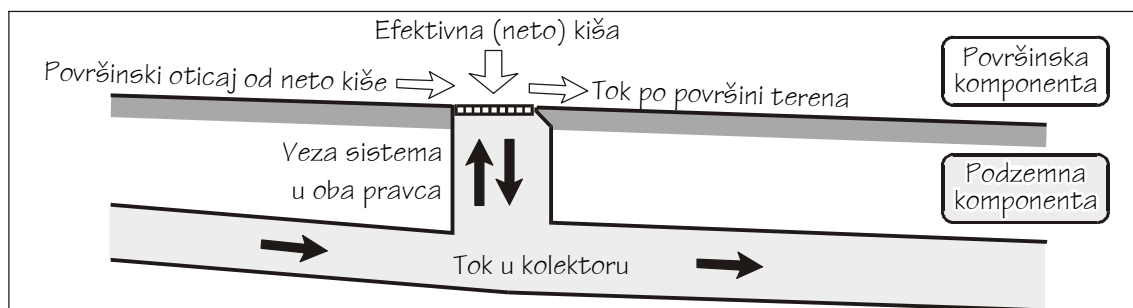
Slika 7.1: Način kako savremeni simulacioni modeli tretiraju vodu koja izlazi iz kanalizacionog sistema korišćenjem “virtualnih rezervoara”

Prilikom jačih kišnih epizoda, normalno je da kanalizacioni sistem dođe pod pritisak, pri čemu pijezometarska kota izlazi izvan kote terena. Voda tada “izvire” iz slivnika na teren, teče po terenu i vraća se u sistem negde nizvodno, gde mreža

više nije pod pritiskom. Ovaj režim rada kanalizacionog sistema nije standardno obuhvaćen postojećim modelima OUP-a, pa se koriste razna uprošćenja. Na slici 7.1 je prikazano često korišćeno rešenje, gde je izlivanje vode na površinu terena dozvoljeno samo u računskom čvoru (šahtu), a zapremina koja izlazi iz čvora se prikuplja u fiktivnom (virtualnom) rezervoaru u periodu dok je sistem pod pritiskom, a vraća se u isti čvor kada pijezomerska kota padne ispod kote terena. U periodu izlivanja vode na teren, ne dolazi ni do kakvih promena u načinu obračuna transformacije kiše u čist oticaj.

Prihvaćeno uprošćenje izlivanja vode na teren ima za cilj da omogući simulacionom modelu da, kako tako, obračuna oticaj u uslovima ekstremnih padavina. S obzirom da se radi o ekstremnom slučaju, smanjena tačnost nije od presudnog značaja za dimenzionisanje kanalizacionog sistema koje se radi prema standardnim uslovima funkcionisanja. Međutim, promenama u društvu kojima se vrednost čovekove sredine kotira sve više, kao i porastom vrednosti objekata na terenu, sve su češći zahtevi za proverom rada postojećih sistema u uslovima izlivanja vode na teren i plavljenja. Očigledno je da postojeći modeli ne mogu kvalitetno da odgovore takvim zahtevima, jer u startu nisu pravljeni da prate kompletan tok vode i po terenu.

## 7.2 Savremeni pristup proračunu urbanog odvodnjavanja



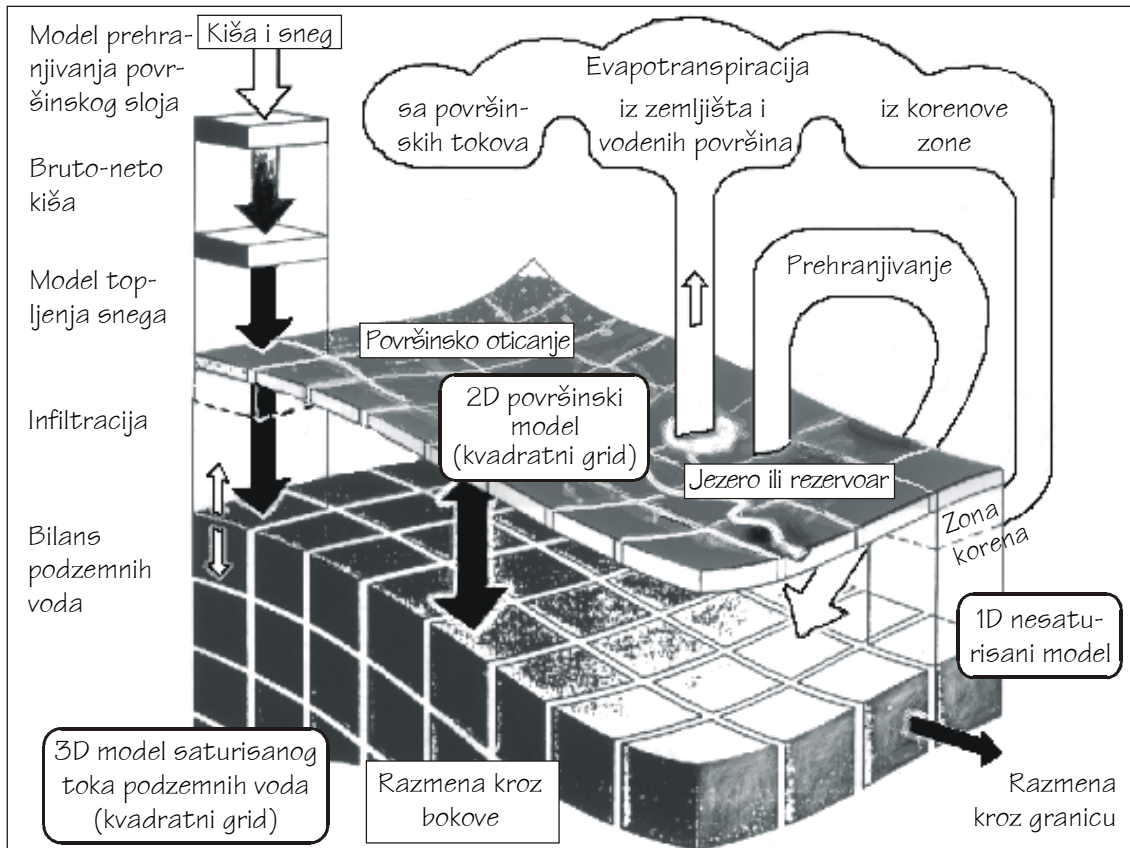
Slika 7.2: Dvosmerni vertikalni bilans voda između površinske i podzemne komponente simulacionog modela

Problem koji simulacioni model treba da reši je da, pored dosadašnjih obračuna transformacije kiše u oticaj i proračuna tečenja u kanalizaciji, doda potpunu interakciju površinskog i podzemnog sloja, slika 7.2. U svakom čvoru mreže  $K$ , standardnoj jednačini kontinuiteta koja vodi računa o protocima u kolektoru i promeni nivoa vode u šahtu, treba dodati i jednačinu kontinuiteta koja obuhvata sve članove toka po površini:

$$\frac{dV_K}{dt} = Q_{K \text{ Dot } K_{is}}(Z) + \sum Q_{K \text{ Dot } K_{oms}}(Z) \pm Q_{K \text{ Saht}} - \sum Q_{K \text{ Prel}}(Z) \quad (7.1)$$

gde je  $V_K = f(t)$  zapremina vode koja u  $i$ -tom koraku ostaje na podslivu  $K$ ,  $Q_{K\text{Dot}Kis}(Z)$  je dotok od kiše, koji osim od parametara podsliva sada zavisi i od kote vode na terenu, na podslivu  $K$ ,  $\sum Q_{K\text{Dot}Koms}(Z)$  dotok od susednih podslivova kroz zajedničku granicu,  $Q_{K\text{Saht}}$  je protok kroz šaht sa slivnikom, koji može biti pozitivan (voda izlazi kroz šaht na teren) ili negativan (voda ulazi u šaht) i  $\sum Q_{K\text{Prel}}(Z)$  je ukupan protok koji se iz  $K$ -tog podsliva preliva preko terena u nizvodne podslivove.

Jedan od mogućih puteva u rešavanju hidroloških problema, pa i problema urbanih slivova, je da osnovna "obračunska" jedinica više ne bude sliv (odnosno podsliv), već znatno manji elemenat: jedna ćelija grida. Krajem osamdesetih godina i početkom devedesetih, ovaj koncept je dobio snažnu podršku razvojem računara sa velikom operativnom memorijom. Tipičan hidrološki sliv sa desetak do sto podslivova je sada moguće predstaviti mrežom od nekoliko desetina do stotina hiljada ćelija, pri čemu se u okviru svake ćelije prati kompletan vertikalni a između ćelija horizontalni bilans voda.



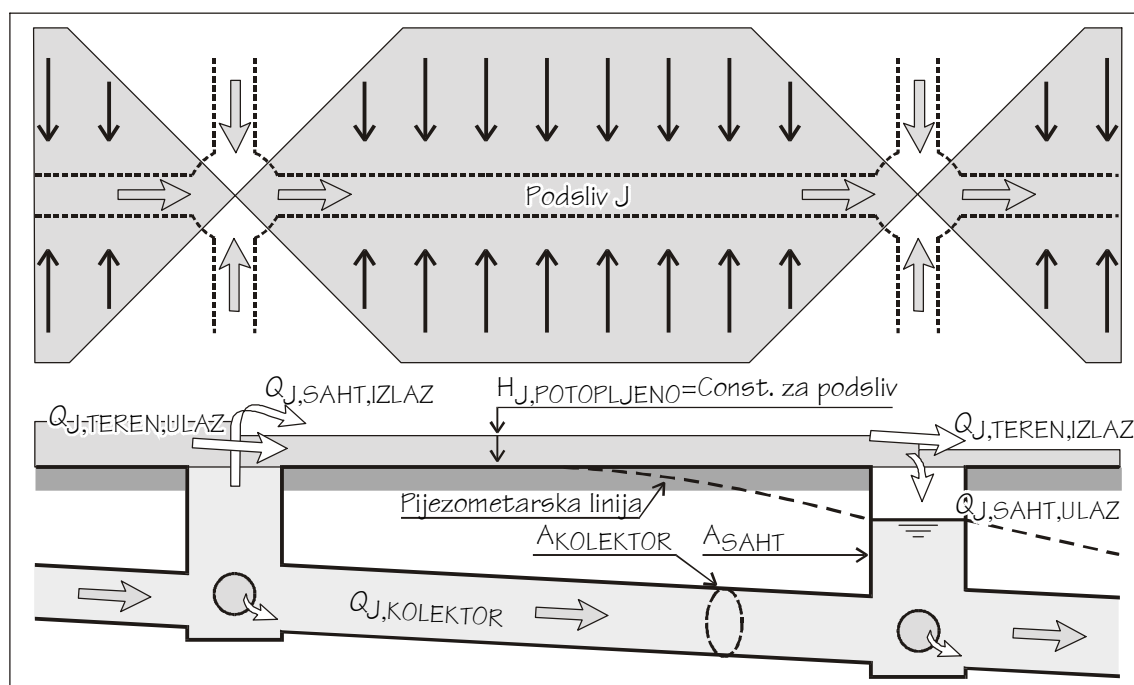
Slika 7.3: Šematizacija u fizički baziranom prostorno distribuiranom hidrološkom modelu SHE [1]

Na slici 7.3 je prikazan hidrološki model SHE, razvijen od strane Abbotta i saradnika [1, 2]. Finom diskretizacijom prostora i praćenjem svih veličina kroz vreme uz minimalnu konceptualizaciju, napravljen je veoma složen model koji pored količina

verno simulira i procese promene kvaliteta voda. Naravno, pojava SHE i sličnih fizički baziranih prostornih modela je izazvala dosta polemika među hidrolozima [88] uz glavnu zamerku da se ne radi o novim modelima već o jednostavnoj primeni klasičnih konceptualnih modela koji su postupkom smanjenja razmatrane površine svedeni na nivo male ćelije, dok su svi problemi osrednjavanja prostora (doduše sada mnogo manjeg prostora) ostali i dalje unutar modela.

Modeli poput SHE nisu direktno upotrebljivi u urbanim sistemima. Slične, prostorno distribuirane ali dosta uprosćenije modele su neki autori u svojim radovima primenjivali na urbane slivove [4, 90, 91]. Zbog još uvek prevelike složenosti, prostorna diskretizacija je bila na granici upotrebljive u urbanim uslovima (veličina ćelije grida, na primer,  $20 \times 20$  m). Mada usvojena šematizacija dozvoljava istovremeno praćenje transformacije kiše u površinski oticaj, kretanje vode po terenu i toka u kolektoru, puni model gradskog sliva, u realnim projektantskim uslovima, bi bio previše složen. Sa veličinom ćelije od  $1 \times 1$  m (ili najviše  $2 \times 2$  m), vreme simulacije i sa kišama malog intenziteta, koje ne izazivaju izlivanje na ulice, bi bilo neprihvatljivo dugačko.

Drugi način rešavanja problema interakcije površinskog i podzemnog tečenja se bazira na primeni postojećih modela, dograđenih sa modelom površinskog toka. U procesu oticanja, dok kanalizaciona mreža nije pod pritiskom, koristi se klasični model OUP-a. Kada dođe do izlivanja na teren usled malog kapaciteta kanalizacione mreže ili usled nedovoljnog kapaciteta slivničkih rešetki, u proračun se uključuje i model površinskog tečenja.



Slika 7.4: Interakcija toka između podzemnog kolektora i terena [43]

U novijoj literaturi se može naći nekoliko radova koji problem urbanog odvodnjavanja tretiraju na ovaj način. Zajedničko za sve te radove je da fazu površinskog tečenja tretiraju jako uprošćeno, bez uzimanja u obzir stvarnih morfoloških karakteristika terena [19, 56]. Na slici 7.4, preuzetoj iz rada [43], prikazana je korišćena šematizacija toka, po kojoj je površinska mreža tokova strogo određena podzemnom (paralelne su), kota terena u okviru podsliva je konstantna i pretpostavlja se da se sva izlivena voda ravnomerno razliva preko cele površine podsliva. Kao i drugi modeli ove vrste, ne postoji povratna sprega ka delu programa u kome se pripremaju podaci o transformaciji kiše u oticaj: iako je došlo do plavljenja podsliva i dalje se pretpostavlja da su uslovi koji su važili prilikom proračuna neto oticaja nepromenjeni. Naravno, iako su ovde iznete samo loše strane ovakvih modela, mora se naglasiti da i sa ovako uprošćenim proračunom površinskog tečenja, ti modeli su izuzetno numerički kompleksni i da daju znatno bolje rezultate u analizama eksczesnih situacija na urbanom slivu od klasičnih modela.

### 7.3 Predloženi model dvojnog odvodnjavanja urbanih površina

Termin “dvojno odvodnjavanje”<sup>3</sup> se koristi za matematički model koji verno simulira uslove tečenja vode u kanalizacionom sistemu i na površini urbanog terena, uz obezbeđenje pune interakcije ova dva sloja kroz računске čvorove (šahlove). Analiziranjem dobrih i loših strana izloženih modela u prethodnoj tački, prednost je data inženjerskoj upotrebljivosti drugog modela, uz neophodnu korekciju površinskog dela kako bi se što vernije opisali fizički procesi na površini terena.

U nastavku ove tačke, daće se prvo opis usvojene šematizacije modela dvojnog odvodnjavanja. Zatim će se uspostaviti veza sa poglavljem 4 *Kreiranje sloja površinskog toka vode* gde su prikazani razvijeni alati za analizu toka vode po površini i povezaće se površinski i podzemni sistem. Pored klasičnih parametara čiji proračun je dat u poglavlju 6 *Proračun parametara za “klasične” modele OUP-a*, biće objašnjeni potrebni dopunski parametri za rad modela dvojnog odvodnjavanja. Na kraju, daje se predlog načina implementacije modela, koji sa matematičke i programerske strane predstavlja svojevrsni izazov.

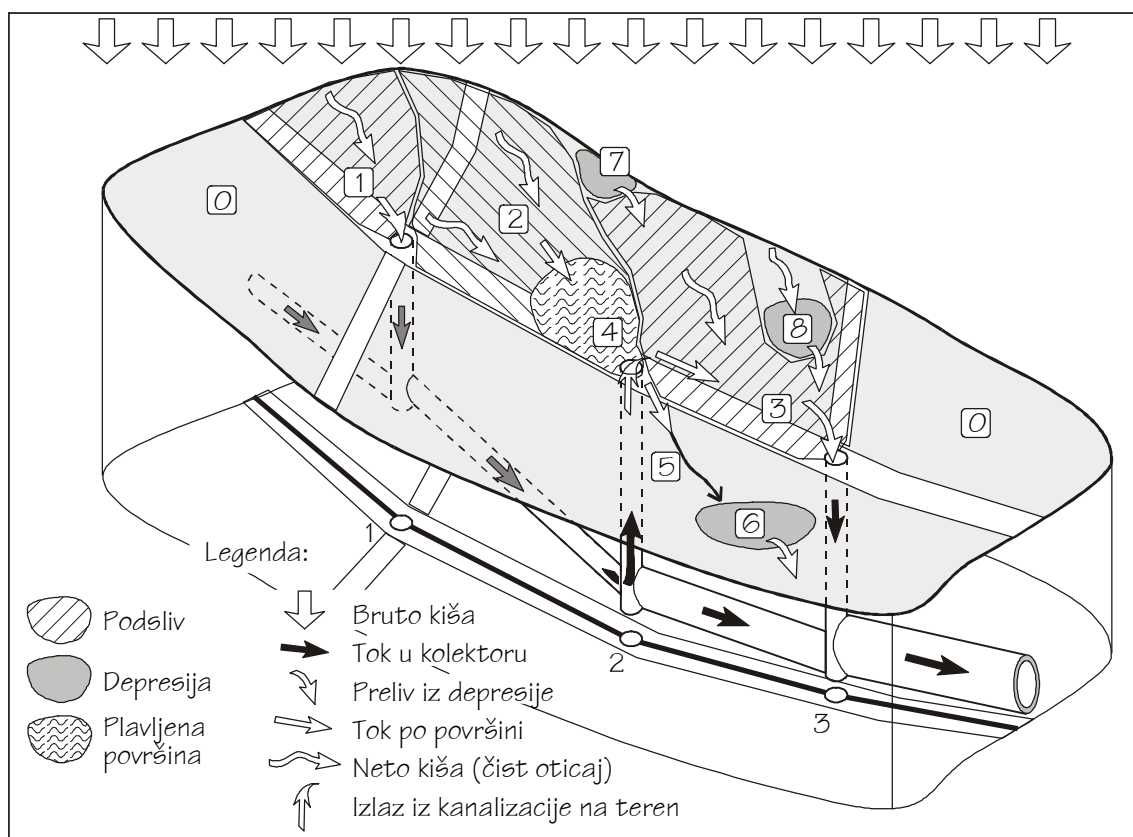
#### 7.3.1 Usvojena šematizacija dvojnog odvodnjavanja

Proračun oticanja kiše sa urbanog sliva počinje pripremom svih klasičnih parametara: sliv se podeli na podslivove, odrede se učešća različitih tipova površina u okviru svakog podsliva, površina, oblik itd. Na bazi tih parametara, bruto pala kiša se transformiše u čist oticaj, koji predstavlja ulazni hidrogram za svaki čvor.

Ukoliko kanalizacioni sistem nije dovoljnog kapaciteta, ili nizvodni uslovi onemogućće dreniranje sve vode, jedan deo vode iz kanalizacije će se izliti na površinu terena.

<sup>3</sup>Na engleskom jeziku *dual drainage*.

U tom čvoru, već sračunati hidrogram od kiše, će se sabrati sa izlivenom vodom i formirati površinski tok. Takođe, moguće je da kanalizacioni sistem bude dovoljnog kapaciteta, ali da slivničke rešetke, zbog začepljenosti, nedovoljne propusne moći ili lošeg postavljanja, nisu u stanju da prime ceo hidrogram od kiše, pa će jedan deo vode ostati na terenu [23, 81].



Slika 7.5: Fizički baziran model koji vodi računa o tečenju vode po površini terena kao i izlivanju vode iz kanalizacije [81]

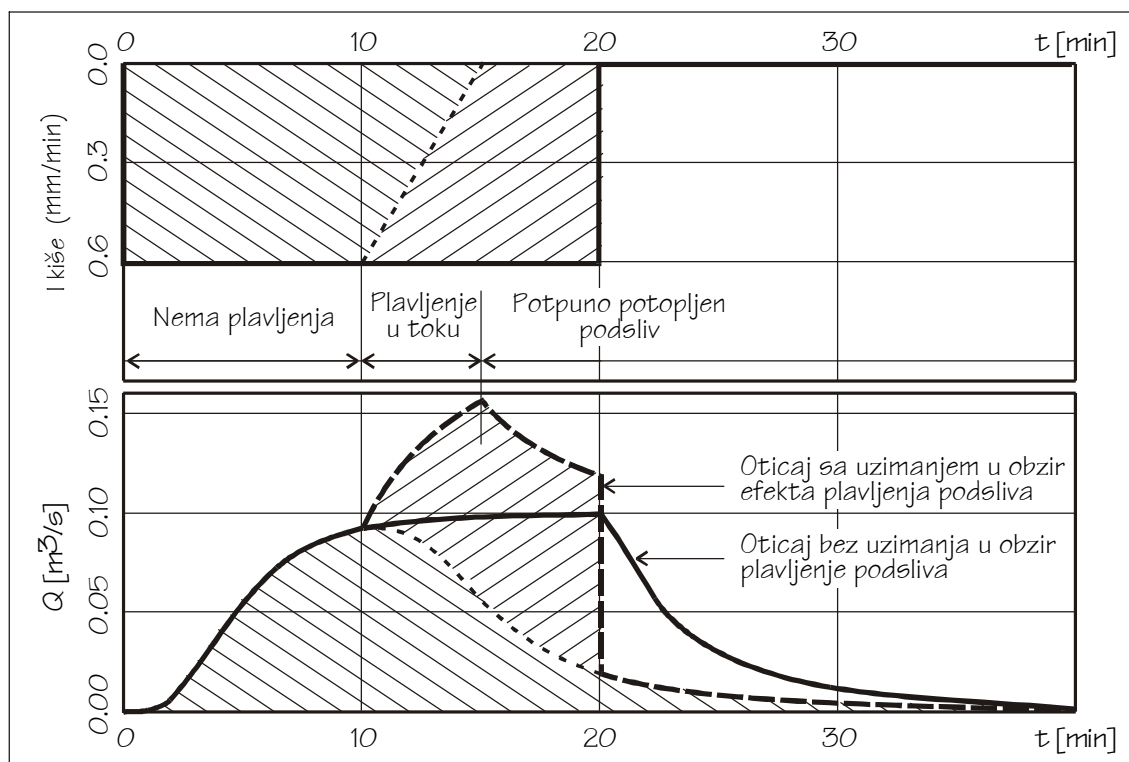
Na slici 7.5 je prikazan deo sliva, sa tri podsliva, gde je na drugom podslivu počelo izlivanje vode na površinu. Na uzvodnom delu podsliva 2, još uvek dolazi do klasične transformacije pale kiše u oticaj, dok na potopljenom delu sliva 4, sva pala kiša daje trenutni oticaj. Podsliv 2 ima kao nizvodnog suseda podsliv 3 i deo sliva (0) koji ne ulazi u ukupnu slivnu površinu (nešrafirani deo sliva). Voda koja ne uspe da uđe u čvor 2, postepeno formira plavljenu površinu (4) koja se izliva u podsliv 3 i van sliva, već prema kotama terena na granici podsliva 2.

Voda koja izađe izvan podsliva 2, teče po površini terena (5) mrežom koju definišu prirodni uslovi. Ta voda može da naiđe na neku depresiju (6), gde će se zadržati dok se ne napuni određena zapremina, a zatim će preko tačke izlaza iz depresije nastaviti dalje van sliva ili u neki nizvodni čvor.

Deo vode koja iz formirane plavljene površine ode u podsliv 3, teče po površini

terena i sabira se sa čistim oticajem od kiše. Takođe, kao ulaz u podsliv, mogu da se pojave izlazi iz pojedinih depresija (7 i 8), u kojima se prvo zadržala određena zapremina vode, a zatim se višak preliva preko tačke izlaza, teče po terenu podsliva 3 da bi na kraju formirao ulazni hidrogram u čvor 3.

Na slici 7.5 je dat primer u kome se plavi samo jedna depresija, a prva sledeća nizvodna depresija prihvata jedan deo viška vode. Model dvojnog odvodnjavanja, međutim, ne pretpostavlja da će se glavni pravac tečenja po terenu poklapati sa pravcem toka u kanalizacionom sistemu. U trenutku kada počne da se formira plavljena površina, kandidati za prijem viška vode su svi podslivovi susedi. Redosled proračuna je takav, da se na osnovu zapremine viška vode prvo određuju dimenzije plavljene površine (sa vremenom ona raste, ako se povećava zapremina koju treba prihvatiti) a zatim i kota sloja vode koja plavi podsliv (pretpostavlja se horizontalni nivo vode u plavljenoj površini). Na osnovu kote vode i spiska svih susednih podslivova, kao i kota na graničnoj liniji podsliva, računaju se dužine prelivne ivice ka svakom od suseda. Na osnovu tih dužina, kao i kota vode na nizvodnom podslivu (ako je i on plavljen) i uslova tečenja po terenu, određuje se preraspodela protoka.



Slika 7.6: Upoređenje rezultata transformacije kiše u oticaj sa podsliva u slučaju kada se ne uzima u obzir plavljenje terena i ako se plavljenje terena obračuna prema modelu dvojnog odvodnjavanja

Uticao predložene šematizacije dvojnog odvodnjavanja samo na modul transformacije pale kiše u oticaj je prikazan na slici 7.6. Za kišu konstantnog intenziteta

i trajanja 20 min, na klasičan način je određen oticaj (prikazan punom linijom na hidrogramu) sa podsliva broj 2 (slika 7.5). Ako u 10-tom minutu dođe do plavljenja tog podsliva i ako u narednih 5 minuta plavljena površina postepeno raste dok ne zauzme ceo podsliv, model dvojnog odvodnjavanja će zahtevati da simulacioni model u svakom sledećem vremenskom trenutku ponovo izračuna hidrogram od kiše, uzimajući u obzir stvarno smanjenje površine terena na kome dolazi do transformacije kiše i povećanje površine koja je direktno povezana sa čvorom (kiša koja pada po plavljenoj površini). Na slici 7.6 je ovako korigovan hidrogram dat isprekidanom linijom, dok je tačkastom linijom dato razdvajanje komponente oticaja sa nepoplavljenih delova sliva od komponente sa plavljenog dela (slika 7.5 je nacrtana u trenutku  $t = 12$  min).

Predloženi model dvojnog odvodnjavanja uspostavlja, dakle, punu interakciju između podzemnog i površinskog sloja, kao i između površinskog sloja i parametara koji se računaju na osnovu njega. U fazi kada nema plavljenja, model se ponaša u svemu kao i klasični model. U trenutku kada dođe do izlivanja na teren, model zahteva za svaki vremenski korak rekalkulaciju svih parametara koji se odnose na podsliv gde je došlo do izlivanja. Formira se mreža svih mogućih tokova po terenu i za svaki od pravaca se preračunavaju potrebni parametri. Simultano se rešavaju jednačine celog sistema podzemne mreže i dela sistema površinske u kojoj postoji izlivena voda, sve dok postoji površinski tok. Nakon toga, model se opet vraća u stanje u kome bi bio i klasični model.

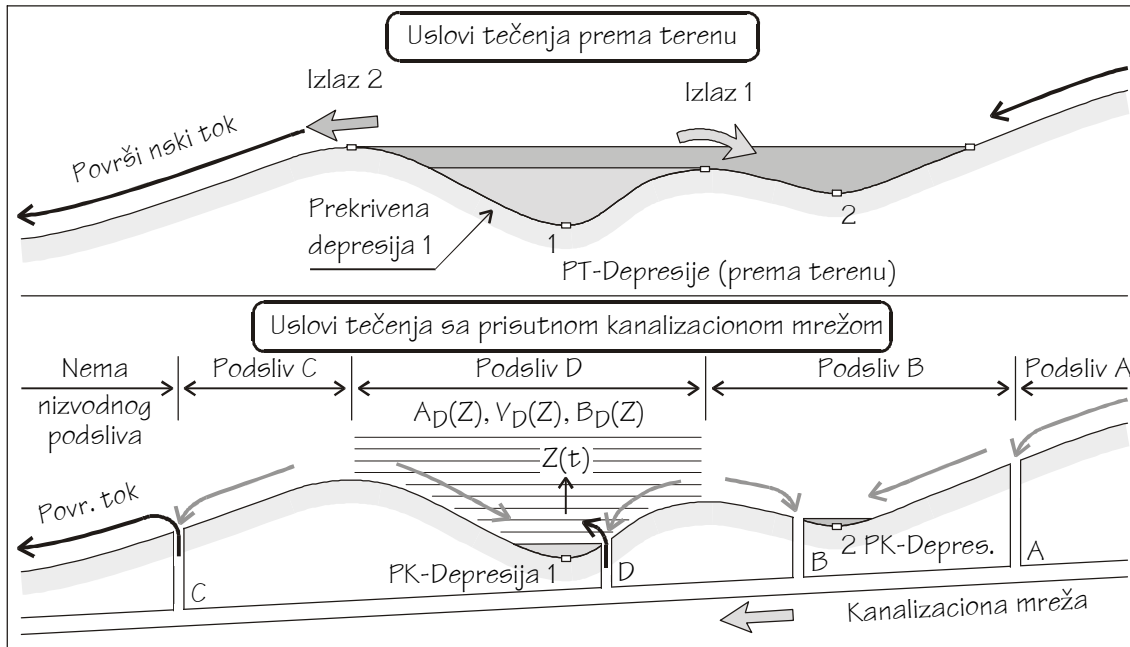
### 7.3.2 Veza kanalizacione mreže i površinskog toka

U poglavlju 4 *Kreiranje sloja površinskog toka vode*, deo 4.2 *Kreiranje podataka o površinskom toku*, razmatrano je tečenje vode po površini terena u slučaju kada ne postoji podzemna kanalizaciona mreža. Na delovima terena gde postoji već izgrađena kanalizaciona mreža, ili gde se projektuje nova, uslovi tečenja po terenu se značajno menjaju: kanalizacioni šahtovi sa slivnicima se ponašaju kao ponori koji skupljaju vodu sa terena, ne dozvoljavajući formiranje većih depresija i dugačkih površinskih tokova, ili kao izvori (kada je nedovoljan kapacitet kanalizacione mreže) koji dodaju vodu u površinski tok.

Sa stanovišta koncepta modela OUP-a, slučajevi čistog površinskog tečenja i tečenja sa kanalizacionom mrežom koja prima svu površinsku vodu su isključivi ali slični. Površinska mreža kanala ili podzemni kolektori čine jednodimenzionalni linijski sistem koji dobija vodu sa odgovarajuće slivne površine nakon transformacije kiše u neto oticaj (veoma jednostavna šematizacija dvodimenzionalnog tečenja). Slučaj izlivanja vode iz kanalizacionog sistema na površinu terena, međutim, mora odvojeno da se tretira modelom OUP-a, jer zahteva korišćenje dodatnih jednačina za linijsko tečenje, kojima se prati tok vode po terenu (model dvojnog odvodnjavanja).

Šta se događa sa površinskom vodom na kompleksnom terenu bez postavljene kanalizacione mreže i nakon njenog postavljanja u uslovima kada dolazi do izlivanja iz mreže, prikazano je na slici 7.7. Na gornjoj slici su prikazani rezultati analize

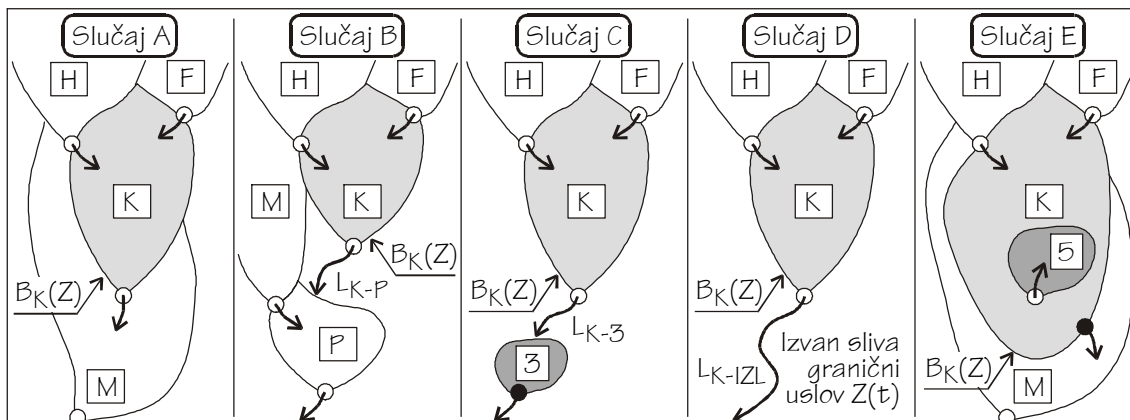




Slika 7.7: Podužni presek kroz teren, slučaj bez kanalizacije (gore) i sa kanalizacijom (dole)

tečenja vode po površini: određene su depresije prema terenu, depresije su povezane međusobno, određena je površinska mreža kanala i kreirana potrebna topologija. Za svaki površinski kanal će se odrediti pripadajuća slivna površina kao i potrebne karakteristike podsliva.

Postavljanjem kanalizacije (slika 7.7 dole) granice podslivova kao ni granice depresija više nisu prirodne, već određene kanalizacionom mrežom. Voda koja se izliva iz mreže, međutim, počinje opet da poštuje prirodne karakteristike terena: puni depresije do prirodnih tačaka izliva (podsliv D sa slike 7.7 dole) i teče po terenu do sledećeg nizvodnog podsliva, do sledeće depresije ili do izlaza sa sliva.



Slika 7.8: Pet slučajeva izlivanja vode iz kanalizacionog šahta i tečenja po terenu

Da bi se formirao model dvojnog odvodnjavanja, pored podzemne mreže i sistema podslivova baziranih na kanalizacionoj mreži, potrebno je odrediti i pravce mogućeg površinskog toka vode. Na slici 7.8 je prikazano pet slučajeva koji se mogu desiti kada voda izađe iz kanalizacionog šahta: otići će na nizvodni podsliv, teći po terenu, zadržati se u depresiji, izaći sa sliva, ili ostati u sopstvenoj depresiji.

Za analizu interakcije površinskog i podzemnog sistema u modelu dvojnog odvodnjavanja sa manjim korekcijama se mogu koristiti do sada razvijeni programi. Delineacija depresija se prvo radi za slučaj nepostojanja šahtova, čime se dobijaju depresije prema terenu (koristiće se skraćenica PT-depresije), prirodne ili velike depresije. U drugom prolazu, u istom programu se aktivira kriterijum po kome se depresije mogu drenirati i podzemnom kanalizacionom mrežom, pa se dobijaju nove granice depresija prema kanalizaciji (PK-depresije). Program vodi računa da imena fizički istih depresija ostanu ista. Takođe, formira se posebna datoteka sa kodovima da li se neka PK-depresija drenira prirodno ili preko kanalizacije i preko koje kanalizacione cevi.

Analiza se obavlja korišćenjem prvog dela programa za kreiranje slike sumarnih dotoka (tačka 4.2.4 *Slika sumarnih dotoka - vektorski orijentisani proračun*) uspostavljanjem veze između depresija. Prvo se kao ulazni podaci koriste PT-depresije, na standardan način. Zatim se koristi sloj sa PK-depresijama, smatrajući da su izvori vode izlazi iz PK-depresija kao i šahtovi kanalizacione mreže. Prati se tok vode duž terena, poštujući moguće slučajeve (slika 7.8):

- A Najčešći slučaj, kada je podsliv  $K$  okružen drugim podslivovima ( $H$ ,  $F$  i  $M$ ). Čim voda pođe iz šahta  $K$  nizvodno, naiđe na drugi podsliv  $M$ . Ne računa se put vode, već se samo zabeleži u posebnu datoteku koji je tip izlaza. Širina prelivne ivice se dobija iz visinske analize granice podsliva  $B_K(Z)$ .
- B Ako sa nizvodne strane šahta  $K$  nema podsliva, program prati tok vode po terenu dok ne dodirne nizvodni podsliv  $P$ . Zabeleži se put vode  $L_{K-P}$ , tip izlaza i oznaka nizvodnog podsliva.
- C Kao i prethodni slučaj, samo što voda dolazi do depresije 3 koja je PT-tipa. Zabeleži se put vode  $L_{K-3}$  i redni broj depresije. Dalji put vode od depresije je dobijen prvom iteracijom proračuna.
- D Kao i prethodna dva slučaja, samo na putu vodi se ne nalazi ni jedan podsliv ni depresija, već voda izlazi sa sliva. Zabeleži se put vode  $L_{K-IZL}$  i tip.
- E Ako voda koja izlazi iz šahta ostaje u istom podslivu  $K$ , obavezno dolazi do PK-depresije. U tom slučaju će voda prvo da puni depresiju 5, koja postaje PT-tipa, do tačke preliva određenog prethodnom iteracijom programa. Nakon toga, voda izlazi sa podsliva na mestu izlaza iz PT-depresije i ponaša se kao jedan od prethodna četiri slučaja.

Algoritam dvojnog odvodnjavanja u svakom računskom koraku proverava koliki je nivo vode u podslivu  $K$ , u zavisnosti od dotoka (od kiše, od uzvodnih slivova i od izlaza/ulaza u kanalizaciju), od protoka koji se preliiva (koji opet zavisi od funkcije dužine granice podsliva  $B_K(Z)$  odnosno širine prelivne ivice) i od funkcije površine podsliva  $A_K(Z)$  (jednačina 7.1). U najvećem broju slučajeva, postojaće samo jedan izlaz iz podsliva i podsliv će se ponašati prema već određenom slučaju. Kod relativno ravnih terena, međutim, ako dovoljno poraste nivo vode u podslivu, može se desiti da se na granici podsliva pojavi drugo mesto preliiva. Tada će jedan deo vode otići na drugi podsliv (ili van sliva), opet u skladu sa izloženih pet slučajeva. Primer je dat na slici 7.7 (donja slika), gde je izlaz iz podsliva D izlazna tačka depresije 1, a to je podsliv B. Kada nivo vode  $Z(t)$  u podslivu poraste, izlazna tačka će biti na drugoj strani, ka podslivu C.

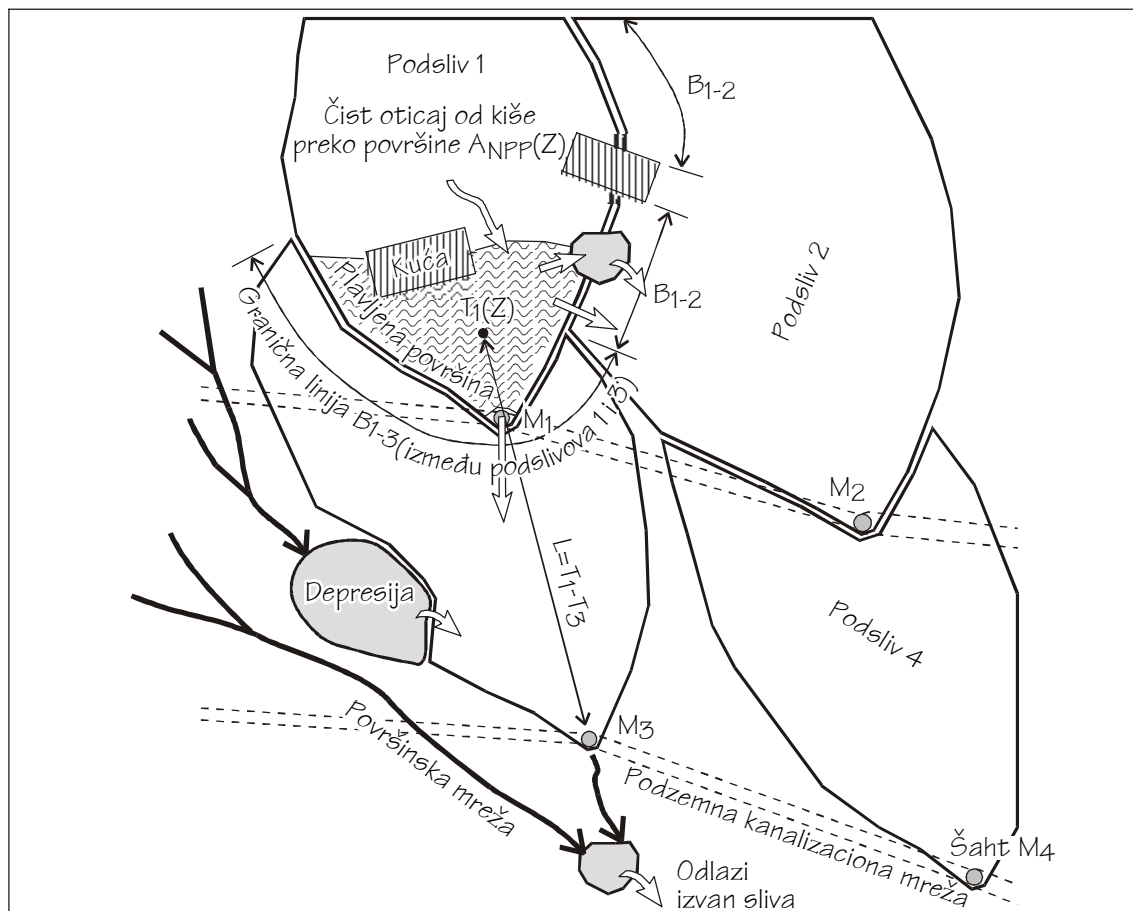
Model dvojnog odvodnjavanja računa protoke prema svim mogućim putevima vode za svaki podsliv. Problem određivanja tih puteva vode iz jednog podsliva se može rešiti tako što se unapred sprovede izložena procedura praćenja vode po terenu onoliko puta koliko ima mogućih izlaza na granici podsliva u druge podslivove ili na teren. U razvijenom informatičkom modelu OUP-a prihvaćeno je, međutim, drugačije rešenje: unapred se formira samo jedan, najverovatniji, način površinskog toka, dok se ostali slučajevi rešavaju u toku rada samog simulacionog modela. U svakom koraku proračuna, simulacioni model traži podatke od podslivova-agenata o njihovom stanju (protoci i nivo vode). Ako podsliv zaključi da je nivo vode takav da izlazi iz redovnog radnog stanja, zatražiće, samo za sebe, potrebne podatke od GIS modula.

Sam algoritam praćenja toka vode od depresija i šahtova (računskih čvorova kanalizacione mreže) se zasniva na vektorskom proračunu, tako da se direktno dobijaju koordinate površinskih kanala. Slika sumarnih dotoka se ne kreira, pa otpadaju i potrebe za njenom reklasifikacijom i vektorizacijom (tačke 4.2.5 i 4.2.6). Površinska mreža se dobija povezivanjem računskih čvorova (šahtova) i depresija prema određenom pravcu toka vode. Naravno, za rad programa je potrebno prethodno kreirati sloj sa granicama podslivova (poglavlje 5).

### 7.3.3 Parametri potrebni za model dvojnog odvodnjavanja

Usvojena šematizacija interakcije površinskog i podzemnog tečenja, po kojoj treba da radi model dvojnog odvodnjavanja, pretpostavlja da su korisniku na raspolaganju slojevi DMT-a i namene površine terena, kao i sve izložene procedure za analizu tečenja vode po površini terena. Pre početka simulacije potrebno je, takođe, odrediti i sve "klasične" parametre kao i prvu iteraciju dodatnih parametara koji se odnose na površinski tok.

Na slici 7.9 je prikazana situacija u kojoj je došlo do delimičnog plavljenja podsliva 1, pa se pojavljuje i površinska komponenta u modelu dvojnog odvodnjavanja. Oznake date na slici će se koristiti u sledećim paragrafima, gde se detaljnije objašnjavaju dodatni parametri potrebni za model dvojnog odvodnjavanja.



Slika 7.9: Šematizacija tečenja u modelu dvojnog odvodnjavanja

**Kriva zapremine podsliva** Ako se pretpostavi da je granica podsliva vertikalni zid, moguće je formirati funkciju  $V_{PP} = f(Z)$ ,<sup>4</sup> krivu zapremine podsliva. Ukoliko DMT ne sadrži veštačke objekte, unete preko linija prekida i stvarnih visina u TIN modelu, potrebno ih je iz krive zapremine isključiti korišćenjem sloja namene površina. Alternativno, može da se koristi i visinski korigovan DMT, tačka 4.2.1 na strani 70 i 5.2.3 na strani 108, ali uz smanjenje visine za koju se spuštaju ulice na realnih 10 do 20 cm.

Funkcija krive zapremine podsliva je potrebna radi određivanja kote vode koja se zadržala na terenu. U svakom računskom koraku se određuje zapremina vode koja ostaje na podslivu (jednačina 7.1), pa se na osnovu te zapremine i krive zapremine odredi kota vode (a ne dubina!).

**Kriva potopljene i nepotopljene površine podsliva** Kao i kod krive zapremine podsliva, kriva površine podsliva se određuje uz uslov vertikalnog ograničenja na granicama podsliva. Kriva površine plavljenog dela sliva  $A_{PP} = f(Z)$  isključuje

<sup>4</sup>Indeks "PP" znači: plavljen deo podsliva.

visoke objekte (zgrade). Za vrednosti  $Z_{\text{VODA}} \leq Z_{\text{SAHT}}$  površina je  $A_{\text{PP}} = 0.0$ , a za  $Z_{\text{VODA}} \geq Z_{\text{P-MAX}}$  površina je  $A_{\text{PP}} = A_{\text{P}} - A_{\text{KROV}}$ , gde je  $Z_{\text{VODA}}$  kota vode na podslivu iz prethodnog vremenskog koraka,  $Z_{\text{SAHT}}$  kota terena na mestu računskog čvora (šahta), odnosno najniža kota terena na podslivu,  $Z_{\text{P-MAX}}$  maksimalna kota terena na podslivu i  $A_{\text{KROV}}$  površina visokih objekata koji se odbijaju od krive površine podslivova (i  $A_{\text{KROV}}$  je funkcija kote  $Z$ ).

Za proračun transformacije pale kiše u oticaj, potrebno je odrediti komplement površini  $A_{\text{PP}}$ , površinu koja još nije poplavljena  $A_{\text{NPP}} = f(Z)$ . Kako se ova površina koristi u procesu transformacije kiše, od te površine treba oduzeti objekte koji su direktno povezani sa kanalizacionim sistemom (uzvodni deo još nije potopljen!). Ti objekti mogu a ne moraju biti isti sa objektima koji su uneli visinsku korekciju DMT-a, tako da uopšteno važi:

$$A_{\text{PP}}(Z) + A_{\text{NPP}}(Z) \neq A_{\text{SLIV}} + A_{\text{KROV}} \quad (7.2)$$

Pored površine nepotopljenog dela sliva potrebno je u svakom vremenskom koraku odrediti dužinu podsliva (modeli transformacije kiše u oticaj koji koriste oblik podsliva mogu da zadrže nepromenjen taj parametar, zbog relativno malog njegovog uticaja na proračun) kao i prosečni nagib, koji će najverovatnije pokazati blagi porast.

**Koordinate težišta podsliva u funkciji kote vode** Za površinu potopljenog dela umanjenu za visoke objekte  $A_{\text{PP}}(Z)$  računaju se koordinate težišta  $T_{\text{PP}} = f(Z)$ . Za kotu vode  $Z_{\text{VODA}} \leq Z_{\text{SAHT}}$  težište se poklapa sa koordinatama čvora (šahta) a za  $Z_{\text{VODA}} \geq Z_{\text{P-MAX}}$  je  $T_{\text{PP}}$  težište celog podsliva.

Koristeći koordinate težišta podsliva računaju se dužine toka vode po terenu između dva podsliva. Naime, ako je  $k$ -tom podslivu nizvodni sused neki drugi podsliv ( $n$ ) u jednačine za površinsko tečenje unosi se rastojanje  $L = T_k - T_n$ , gde će se ta dužina menjati iz koraka u korak proračuna. Ako nizvodni sused nije drugi podsliv, već voda prvo teče po terenu do drugog podsliva, depresije, ili do izlaza is sliva, tada se kao početak toka ne koristi težište  $T_{\text{PP}}$  već koordinate stvarne tačke izlaza na granici podsliva.

**Spisak susednih podslivova** Za svaki podsliv treba napraviti spisak svih susednih podslivova, onih koji dele zajedničku granicu. Ova lista se već interno formira u razvijenom modulu informatičkog modela koji reklasifikuje podslivove sa kriterijumom upotrebe minimalnog broja boja, tačka 5.3.2 *Reklasifikacija i prikaz podslivova*.

Na osnovu liste svih suseda inicijalno se formira prstenasta mreža površinskih tokova sa dužinama jednakim rastojanjima između računskih čvorova (šahtova). Sve dok ne dođe do plavljenja na površini terena ova mreža kanala se ignoriše u modelu. Kada se pojavi voda na terenu aktivira se samo deo mreže od poplavljenog podsliva do njegovih suseda, uz stalnu korekciju dužina i nagiba toka. Širina toka vode će se odrediti u narednom paragrafu.

**Dužina granice između susednih podslivova u funkciji kote vode** Za svaka dva susedna podsliva  $k$  i  $n$  računa se dužina granice između njih u funkciji kote terena  $B_{k-n}(Z)$ , umanjena za visoke objekte (kuće). Na slici 7.9 je ta granica prikazana za podslivove 1 i 2 kao i za podslivove 1 i 3. Da bi se odredili svi parovi susednih podslivova koristi se lista suseda kreirana u prethodnom paragrafu.

Dužina granice  $B_{k-n}(Z)$  se koristi u proračunu površinskog tečenja. Na osnovu kote vode u uzvodnom podslivu određuje se širina toka vode potrebna za proračun brzine.

**Veza podsliva i površinskog toka** Na delovima podsliva koji nemaju suseda potrebno je uspostaviti vezu podsliva sa površinskom mrežom tokova, kreiranom u poglavlju 4 *Kreiranje sloja površinskog toka vode*, tačka 4.2.6 *Vektorizacija slike površinskog toka*. Svaki segment granice  $k$ -tog podsliva se posebno numeriše, na primer  $k - I$ ,  $k - II$ , itd. Zatim se odrede dužine granica u funkciji kote vode i na najnižem mestu granice podsliva se uspostavlja veza sa površinskim tokom.

Na slici 7.9, dat je primer podsliva 3 koji nema nizvodnog suseda već se višak vode izliva na teren i teče do depresije, a zatim odlazi sa sliva. U prethodnoj tački 7.3.2, na strani 145 su obrađeni mogući slučajevi ovakvog površinskog toka (slučajevi 2, 3 i 4).

### 7.3.4 Način implementacije koncepta dvojnog odvodnjavanja

U ovom poglavlju je opisan novi model OUP-a, model dvojnog odvodnjavanja. Data je šematizacija modela i prikazan model podataka koji treba da podrži hidroinformatički model. Sama numerička implementacija modela nije razmatrana u ovom radu. Zbog izuzetne složenosti modela, međutim, pre nego što se krene sa ispisivanjem jednačina, na primer kinematskog talasa, za površinski tok i njihovog kodiranja, neophodno je razmotriti moguće načine programske implementacije.

Dosadašnji pristup programiranju u modelima OUP-a je bio čisto sekvencijalni: program kreće od učitavanja podataka koje je korisnik pripremio, uspostavlja matricu jednačina koje opisuju tok u kolektorima i rešava ih iz jednog u drugi vremenski korak. Na kraju se generiše izveštaj o obavljenom poslu.

Takav sekvencijalni način rada programa je moguće primeniti i kod modela dvojnog odvodnjavanja. U fazi pripreme podataka potrebno je pored klasičnih podataka pripremiti i sve dodatne podatke, krive zapremine i površine podslivova, položaje težišta i dužine granica između svih suseda, kao i sve potencijalne tokove po terenu. Kada model krene sa računom imaće sve podatke na raspolaganju, bez obzira da li se simulira slaba kiša kod koje nema izlivanja na teren, da ili će se pojaviti izlivanje na samo nekoliko podslivova, ili će biti zahvaćena veća površina sliva.

Malo inteligentniji program će dozvoliti modelu OUP-a da radi i bez prisutnih podataka o izlivanju na teren, kada će se ponašati kao i "klasični" model. Kada dođe

do izlivanja, može tražiti od korisnika da mu tek tada spremi dodatne podatke, ali opet za ceo sliv.

Pravo rešenje za model dvojnog odvodnjavanja je, međutim, u potpunoj integraciji informatičkih alata koji se upotrebljavaju u pripremi podataka i samog matematičkog modela. Zašto bi se mnogi parametri računali izvan modela i time kreirale mnogobrojne datoteke, kada to može sam model da uradi? Od ulaznih podataka modelu treba dostaviti slojeve sa mrežom, DMT-om, granicama podslivova, slojem namene površina i slojem površinske mreže (potrebna je određena interakcija korisnika u njenom kreiranju). Model će sam po svom startovanju odrediti inicijalne parametre, a zatim će u toku rada, po potrebi, pozivati alate za proračun samo onih parametara koji su mu potrebni.

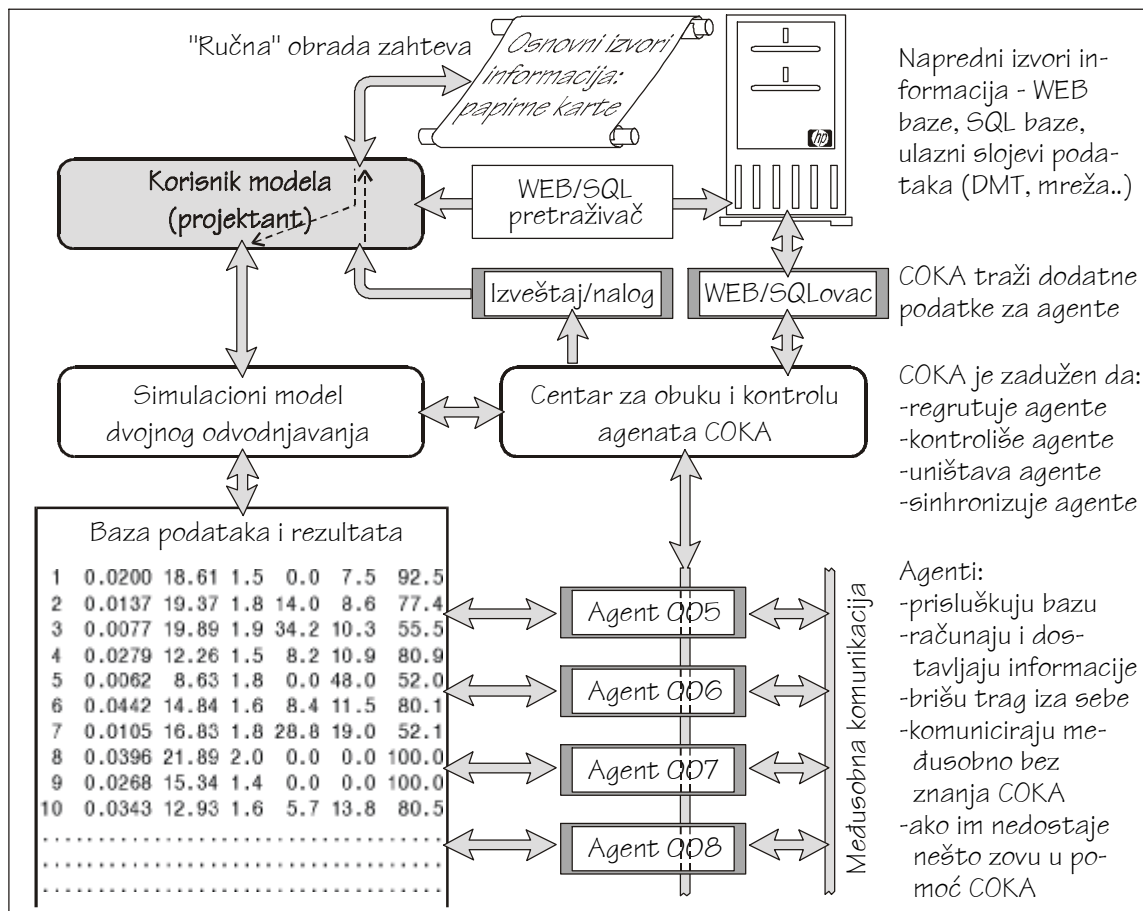
U računarskoj informatici, pogotovu u oblasti Internet/intranet komunikacija, u poslednje vreme su u upotrebi veoma kratki programi, "agenti", koji su tako kreirani da sami putuju mrežama i traže određene podatke [39]. Sličan pristup je u potpunosti primenjiv i u modelu dvojnog odvodnjavanja. Glavni program, u kome se rešavaju jednačine, može se potpuno osloboditi brige oko podataka sa kojima radi, a ako mu nešto zatreba što ne postoji u bazi, dovoljno je da izda nalog nekom agentu da mu to pribavi. Agent će to uraditi bez dalje kontrole od strane glavnog programa.

Razdvajanje programa na čisto računski deo i deo koji se brine o pripremi podataka je prikazano na slici 7.10. Korisnik startuje simulacioni model, koji radi sa podacima u bazi. U startu nedostaju svi parametri, pa model šalje poruku centru za kontrolu agenata (COKA) da su mu potrebni inicijalni podaci. Centar generiše nekoliko agenata, koji u paralelnom radu uzimaju podatke iz slojeva i računaju potrebne parametre. Kada završe posao, obaveste COKA da su završili i sami se gase.

U toku generisanja inicijalnih podataka, model počinje sa radom čim dobije neophodan minimum podataka. U toku klasičnog proračuna, bez izlivanja vode na teren, modelu nisu potrebni dodatni podaci, pa ih agenti i ne generišu. U trenutku kada se izlije voda na teren, model se obraća COKA-u sa informacijom na kom podslivu je došlo do plavljenja. COKA tada generiše agenta čiji je sada zadatak da prati stanje na plavljenom podslivu, da generiše potrebne podatke, prvo inicijalne, a zatim da prati u bazi u svakom vremenskom koraku šta je promenjeno i da za nove uslove dostavlja potrebne izmene u podacima.

Za svaki podsliv u kome se javi plavljenje, COKA generiše po jednog agenta, koji radi paralelno sa ostalima. Od trenutka kada model javi da je došlo do plavljenja na nekom podslivu, sva briga o korektnosti i validnosti podataka je prepuštena agentima. Zbog toga je neophodno obezbediti i međusobnu komunikaciju agenata kao i njihovo sinhronizovano delovanje. Ako u toku proračuna parametara, neki od agenata zaključi da nema dovoljno podataka za rad, obratiće se COKA-u, a on će kreirati novog agenta koji će potražiti podatke u digitalnoj bazi ili će generisati poruku korisniku i tražiti te podatke.

Kada kota vode na terenu padne ispod kote terena, završeno je i plavljenje. Tada



Slika 7.10: Multi agent pristup u modelovanju površinske komponente dvojnog odvodnjavanja

agent tog podsliva očisti sve podatke u bazi koji više nisu potrebni, javi se COKA-u da je završio posao i uklanja se iz programa.

Multiagent pristup programiranju je izuzetno zahvalan kod veoma složenih sistema. Zbog karakteristike agenata da su to jednostavni programi koji mogu da rade paralelno, posebno dolaze do izražaja na savremenim paralelnim procesorima u multitasking sistemima. Za implementaciju ovakvog pristupa, nije naravno neophodno imati posebne moćne sisteme. I na običnoj mreži PC-ja ovakvi programi donose drastično ubrzanje rada.

Glavni adut multiagent pristupa je u doslednom raščlanjivanju složenog posla na samostalne module, programe koje programer može jednostavno da razvije i testira. Modularnim pristupom (ili, kako se u poslednje vreme naziva, objektnim pristupom) se znatno povećava pouzdanost složenih programa, kakav je model dvojnog odvodnjavanja. Takođe, omogućava se jednostavniji rad više programera na istom programu, čime se skraćuje razvojno vreme.





## Glava 8

# Primeri primene razvijenog hidroinformatičkog modela

Paralelno sa razvojem prikazanog informatičkog modela, rađeni su i projekti odvodnjavanja urbanih slivova, na kojima su proveravani usvojeni algoritmi. Pri tome, prvo je u okviru projekata testirana primenjivost usvojenog informatičkog modela i prostornog modela podataka. Nakon korekcija koje su bile rezultat rada na realnim podacima i u realnim projektantskim uslovima, prišlo se testiranju svakog pojedinog razvijenog programskog modula. Konačna verifikacija kompletnog hidroinformatičkog modela povezanog sa simulacionim hidrodinamičkim modelima je obavljena na primeru gde se raspolagalo detaljnim ulaznim podacima i rezultatima osmatranja padavina i oticaja sa sliva [65, 22].

Primenom razvijenog informatičkog modela je do sada izvedeno 5 projekata: sliv Miljakovac II u Beogradu; centralni deo grada Drezden, Nemačka; grad Kladovo; naselje Klisa u Novom Sadu; i sliv Kumodraškog potoka u Beogradu. Takođe, trenutno su u fazi rada još dva projekta: rešenje kanalizacije grada Ruma i dela grada Kraljeva. Redosled kojim su dati primeri sa osnovnim podacima u ovom poglavlju, predstavlja istovremeno i dinamiku razvoja informatičkog sistema OUP-a kao i njegovog uvođenja u standardne projektne procedure.

### 8.1 Eksperimentalni sliv Miljakovac – Beograd

Eksperimentalni sliv Miljakovac II u Beogradu je formiran 1984. godine, sa ciljem terenskog izučavanja procesa transformacije kiše u oticaj kao i praćenja kvaliteta kišnih voda. Sliv obuhvata stambenu zonu novije gradnje, sa pretežno četvoro-spratnim zgradama ravnog krova, značajnijom površinom pod garažama i dečijim igralištima. Nagibi ulica i pojedinih delova terena su i do 12%. Ukupna slivna površina od 25.2 ha, podeljena je na osnovu detaljnog obilaska terena na 10.5% krovova, 27% ulica, trotoara i parking mesta, i 62.5% propusnih površina. Kasnijom analizom i dopunskim obilaskom terena, ustanovljeno je da 48% od ukupne

nepropusne površine nije direktno povezano sa kanalizacijom, već da voda sa tih površina prvo teče preko propusnih površina.

Od 1995. godine, značajno je promenjena struktura objekata na slivu. Dodatnom urbanizacijom su (skoro) sve zgrade sa ravnim krovom dobile još jedan sprat i kosi krov, koji je direktno povezan sa kanalizacijom. Takođe, smanjena je propusna površina izgradnjom novih objekata.

1992. godine započeti su prvi radovi na razvoju i primeni GIS alata u urbanoj hidrotehnici [65]. Na osnovu raspoloživih podloga (crno-bela aerofotografija i papirna karta razmere 1:2500), isprobane su različite metode unosa podataka za formiranje digitalnog modela terena kao i sloja namene površina:

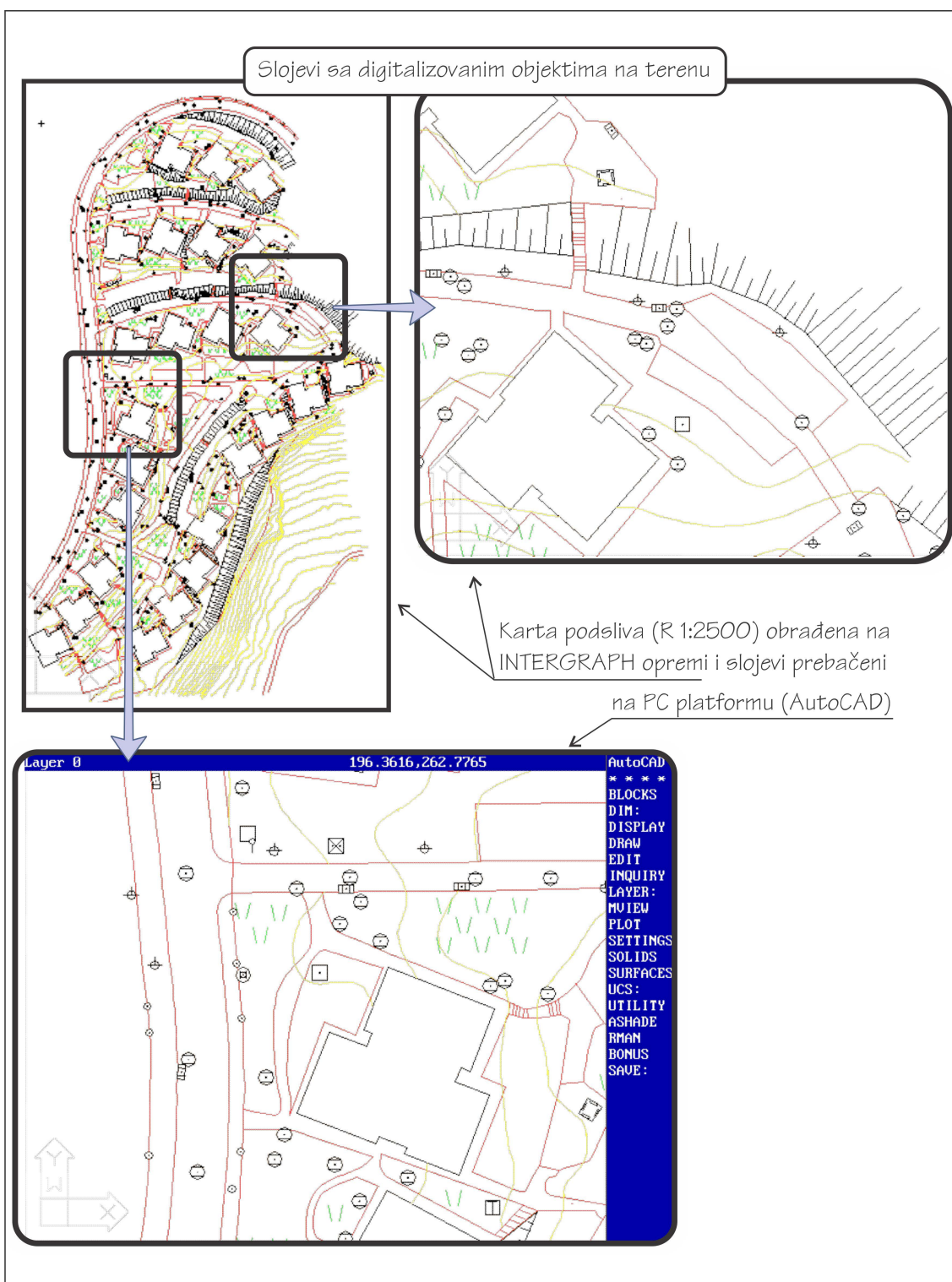
- Automatska obrada aerofotografije, slika 8.1, sa ciljem dobijanja podataka o nameni površina. Isprobane su različite tehnike klasifikacije, ali zbog rada samo sa monohromatskom fotografijom, nisu dobijeni zadovoljavajući rezultati. Takođe, pokušano je sa analizom teksture površina, sa idejom automatskog izdvajanja krovova zgrada.
- Formiranje DMT-a na osnovu tačaka dobijenih obradom stereo aerofotografije, uz precizno definisanje uslova koje tačke na terenu treba obraditi.
- Ručna digitalizacija papirnih karti, objekata na terenu, izohipsi i pojedinih tačaka sa poznatom kotom, kao i kanalizacione mreže. Digitalizacija je rađena AutoCAD programom, a zatim su koordinate tačaka eksportovane u IDRISI GIS sistem.
- Skeniranje papirne karte i (neuspeo) pokušaj automatske vektorizacije a zatim polu-automatske vektorizacije na INTERGRAPH opremi. Na slici 8.2 je dat zapadni deo sliva, sa dva detalja (donji detalj je rezultat konverzije INTERGRAPH formata u AutoCAD). Može se uočiti izuzetno visok nivo detaljnosti sa kojom je obrađena karta (formirana baza je predefinisana, sadrži mnogo više informacija nego što je to potrebno projektu OUP-a) što je rezultat loše koordinacije projektanta sistema za OUP i lica koja obrađuju ulazne podloge.

Zaključak izvučen iz faze pripreme i unosa podataka je da se monohromatski aerofoto snimci ne mogu uspešno koristiti za automatsko formiranje sloja namene površina, ali da su veoma značajni kao dopunska informacija u tumačenju tematskog sadržaja papirnih karti. Digitalizacija papirnih karti korišćenjem standardnih CAD paketa (AutoCAD) je brz postupak dostupan projektantima sistema za OUP, ali istovremeno nosi i niz problema koje treba rešiti (georeferenciranje karti, otklanjanje deformacija, topološka uređenost objekata, itd.). Svi ti problemi se uspešno rešavaju primenom kvalitetnijih GIS sistema (INTERGRAPH) ali tada se javlja problem komunikacije između tima ljudi koji rade na projektu OUP-a i GIS operatera.

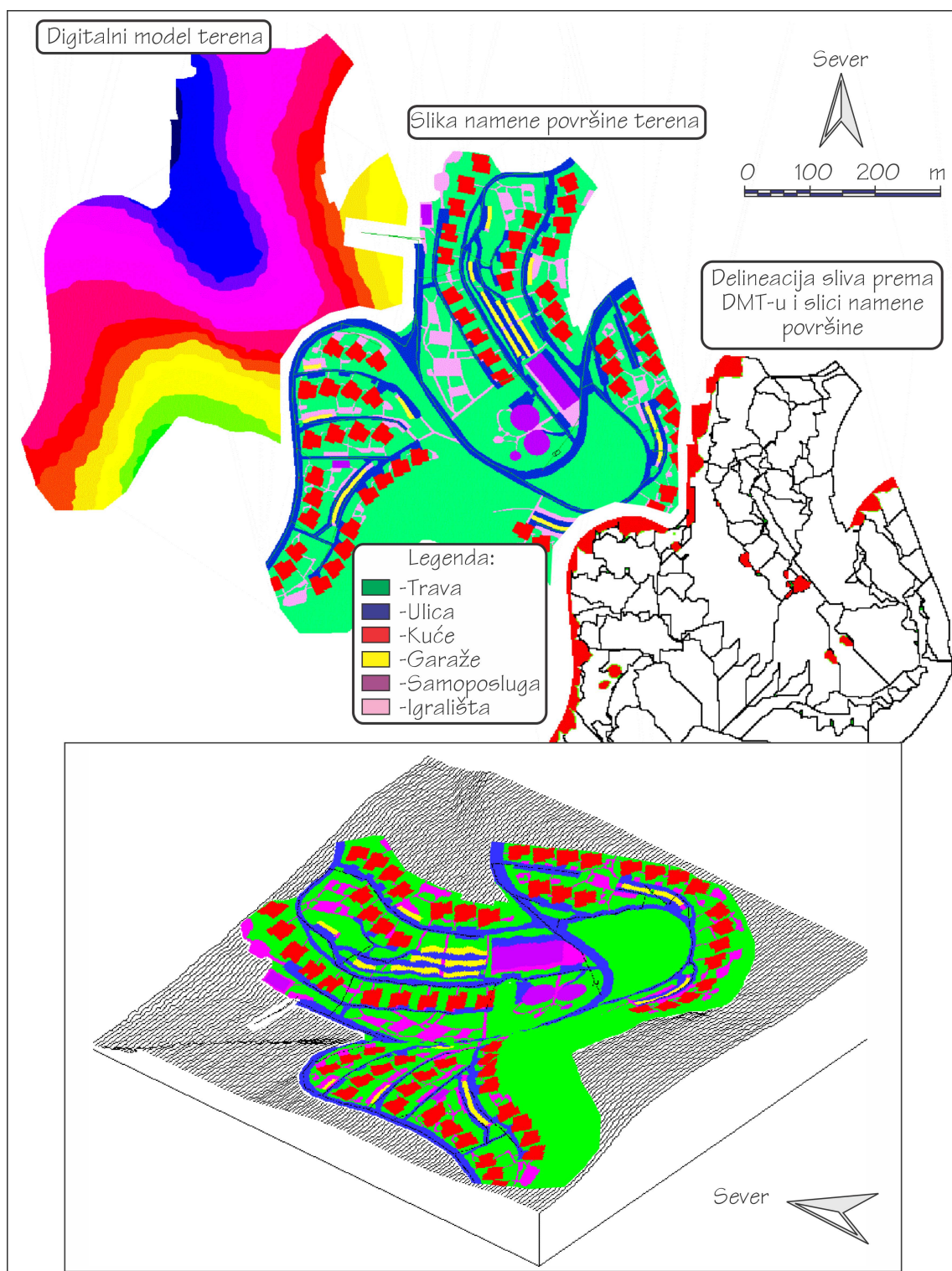
Na osnovu unetih podataka kreiran je DMT metodom srednjih vrednosti sa inverznim kvadratom rastojanja, kao i sloj namene površine terena sa 6 različitih



Slika 8.1: Eksperimentalni sliv Miljakovac II, aerofotografija sliva

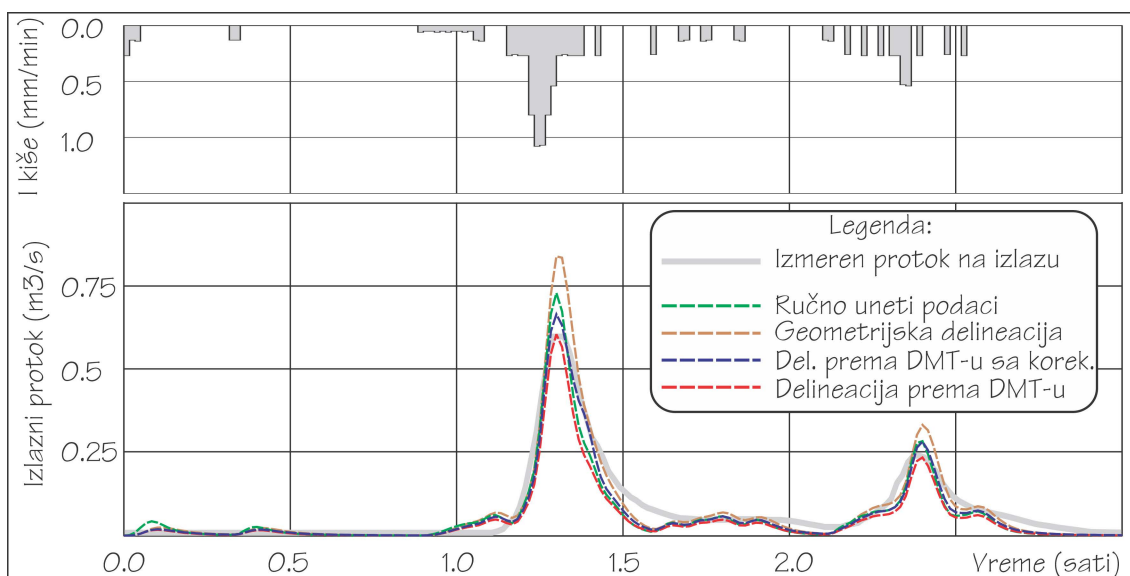


Slika 8.2: Eksperimentalni sliv Miljakovac II, rezultat digitalizacije sloja namene površina od strane profesionalnog operatera



Slika 8.3: Eksperimentalni sliv Miljakovac II, ulazni i generisani slojevi

tipova. Postupkom delineacije sliva prema DMT-u i prema sloju namene površina terena, kreirani su podslivovi za svih 112 računskih čvorova kanalizacionog sistema (slika 8.3). Koristeći granice podslivova, kreirane su datoteke potrebne za rad BEMUS programa: podaci o kanalizacionoj mreži i podaci o podslivovima (površina i nagib podsliva, oblik i učešće propusnih površina, nepropusnih i direktno povezanih krovova).



Slika 8.4: Izmereni oticaj sa sliva za kišnu epizodu YU0171 (siva linija) i rezultati simulacije BEMUS modelom (isprekidane linije): “ručno” pripremljeni parametri, na klasičan način (zeleno isprekidana linija); automatski određeni parametri na osnovu geometrijske delineacije sliva (braon isprekidana linija); automatski određeni parametri na osnovu delineacije sliva prema DMT-u (crvena isprekidana linija); automatski određeni parametri na osnovu delineacije sliva prema DMT-u sa korekcijom (plavo isprekidana linija)

Za verifikaciju razvijenih alata za automatsku pripremu ulaznih podataka, upoređeni su rezultati simulacije protoka na slivu korišćenjem BEMUS programa sa izmerenim oticajem, slika 8.4. Za kišnu epizodu YU0171 [49] prvo je obavljena simulacija oticaja korišćenjem ručno pripremljenih i optimiziranih ulaznih parametara (na slici prikazano isprekidanom zelenom linijom) i upoređena sa izmerenim oticajem (siva puna linija). Nakon toga, parametri koji se odnose na geometriju sliva (površina podslivova, nagib, oblik i procentualna zastupljenost tipova površina) su zamenjeni automatski sračunatim parametrima, uz zadržavanje ostalih hidrauličkih parametara. Braon isprekidanom linijom je dat rezultat simulacije kada su podslivovi određeni geometrijskim putem (maksimalan oticaj, jer je površina sliva određena prema granici koja je nešto veća od stvarne), crvenom linijom za granice podslivova određene samo prema DMT-u (minimalan oticaj, jer 7 ha centralnog sliva ostaje ne drenirano zbog lokalne konfiguracije terena) i plavom linijom za granice podslivova određene prema DMT-u uz korekciju u skladu sa slikom namene površina

(slaganje sa izmerenim oticajem je najbolje, pogotovu u silaznoj grani prvog hidrograma usled korektnijih podataka o nagibima podslivova, kao i u maksimumu hidrograma - obratiti pažnju na to da merenom hidrogramu nedostaje vrh usled greške u merenju oticaja).

Dobijeni rezultati su poslužili za ocenu validnosti postupaka primene novih hidroinformatičkih alata u projektima OUP-a. Zahvaljujući iskustvu stečenom na slivu Miljakovac, kasnije su razvijeni alati koji čine jezgro informatičkog modela OUP-a.

## 8.2 Centralni deo grada Drezdena

Dalja provera informatičkih tehnologija je sprovedena na realnom, “velikom” primeru. U saradnji sa institutom ITWH [50], preuzete su podloge iz projekta koji je bio u toku, procena stanja kišne kanalizacione mreže centralnog dela grada Drezden. Površina sliva je 591.16 ha. Ulazne podloge su bile papirna karta 1:5000, AutoCAD nestruktuirani crtež sa visinama terena na mestu računskih čvorova kanalizacione mreže i snimci u tri različita spektralna područja iz 1992. godine, nabavljen preko Ruske svemirske agencije, rezolucije 15 m.

Priprema podataka je urađena na više različitih sistema, sa ciljem upoređenja brzine i pouzdanosti rada. [69, 70]. U tabeli 8.1 se daje utrošak resursa (vremena) sa specificiranom računskom i programskom opremom za svaku od faza rada:

Na slici 8.5 je dat detalj sa tri satelitska snimka snimljena u različitim spektralnim područjima i njihova kombinacija kojom se dobijaju pravi i lažni kolor snimak. Mada je od Ruske svemirske agencije tražena kontakt kopija filma, dobijeni su samo papirni snimci, čijom se obradom drastično smanjuje originalna rezolucija. Bilo je pregovora o nabavci i multispektralnog snimka više rezolucije, ali to nije sprovedeno.

Na bazi lažne kolor kompozitne slike, pokušana je klasifikacija različitih površina metodom maksimalne verovatnoće<sup>1</sup>. I pored pažljivo izabranih reprezentativnih površina, zbog rezolucije snimka koja se procenjuje na 30 m, postignuta je samo pouzdana klasifikacija većih zelenih površina i par betonskih trgova.

Na slici 8.6 je dat sloj namene površina, dobijen digitalizacijom papirnih karti, uz konsultacije satelitskog kolor snimka. U kreiranju sloja, izdvojeno je 7 tipova različitih površina, sa različitim parametrima oticaja.

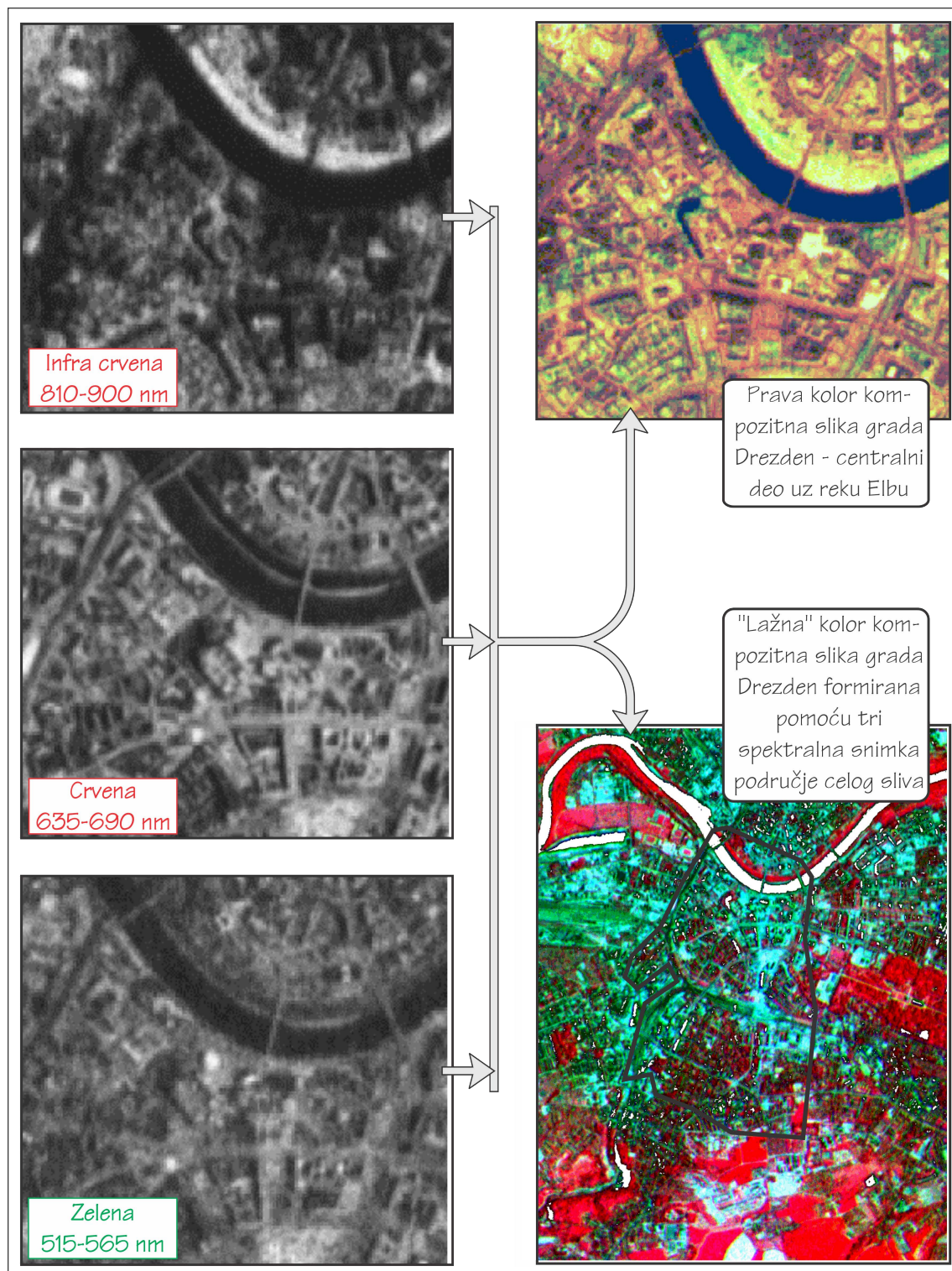
DMT prikazan na slici 8.7 je kreiran na bazi visina terena na mestima čvorova kanalizacione mreže. Da bi DMT što bolje predstavio uslove tečenja po terenu, relativno mali broj tačaka sa poznatom visinom je progušćen primenom linearne interpolacije duž ulica (slika 3.19 na strani 49) i pažljivom digitalizacijom izohipsi sa papirne karte.

Nakon unosa podataka i kreiranja potrebnih slojeva, izvršena je analiza granica podslivova, prvo geometrijski a zatim prema DMT-u i sloju namene površine, slika 8.8. Svi rezultati proračuna, koji su obavljani u rasterskom sistemu su vektorizovani i vraćeni u osnovnu bazu podataka. Algoritmi koji su do tada bili orijentisani ka

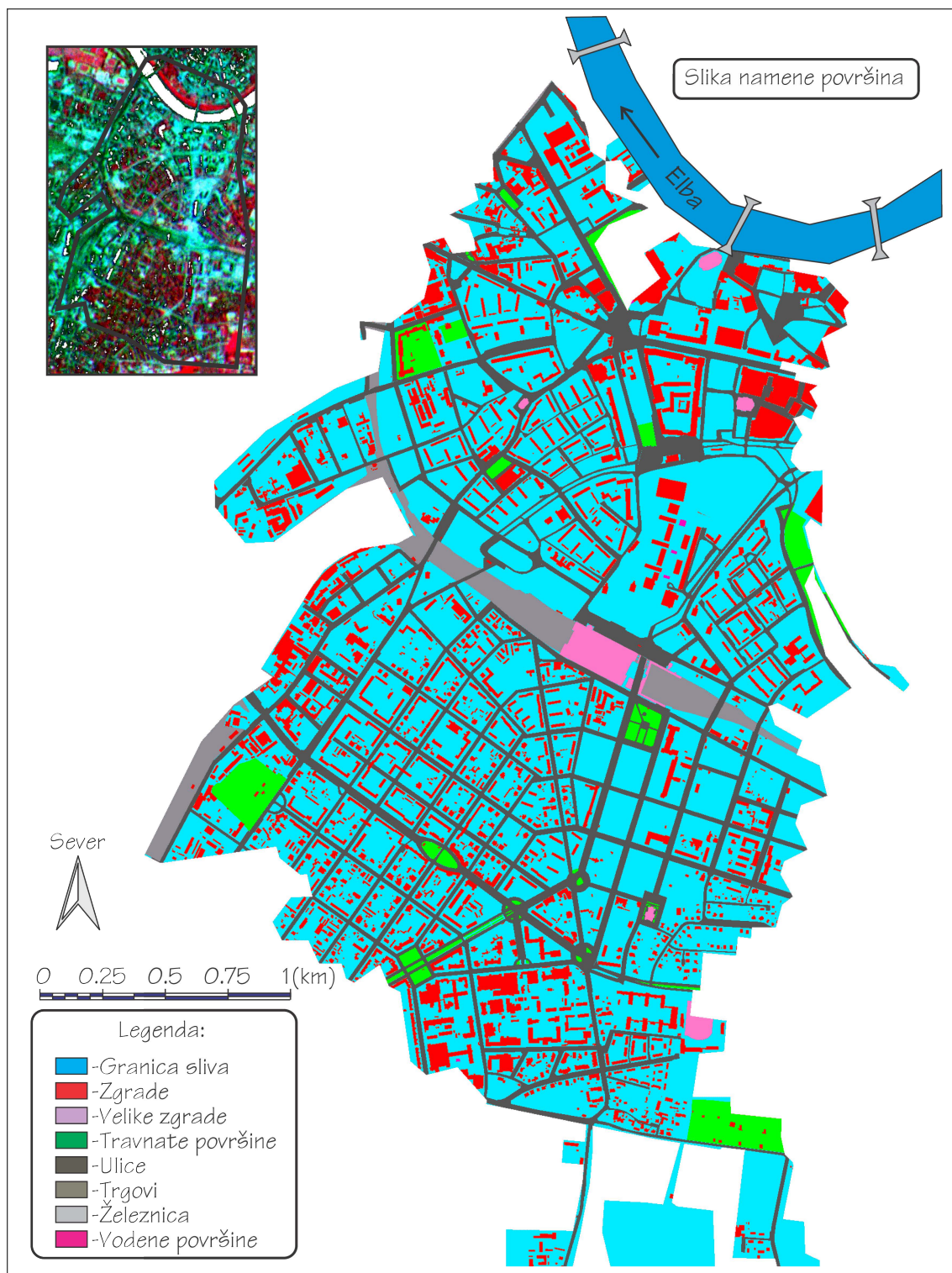
---

<sup>1</sup>Na engleskom jeziku *Maximum Likelihood classification*.

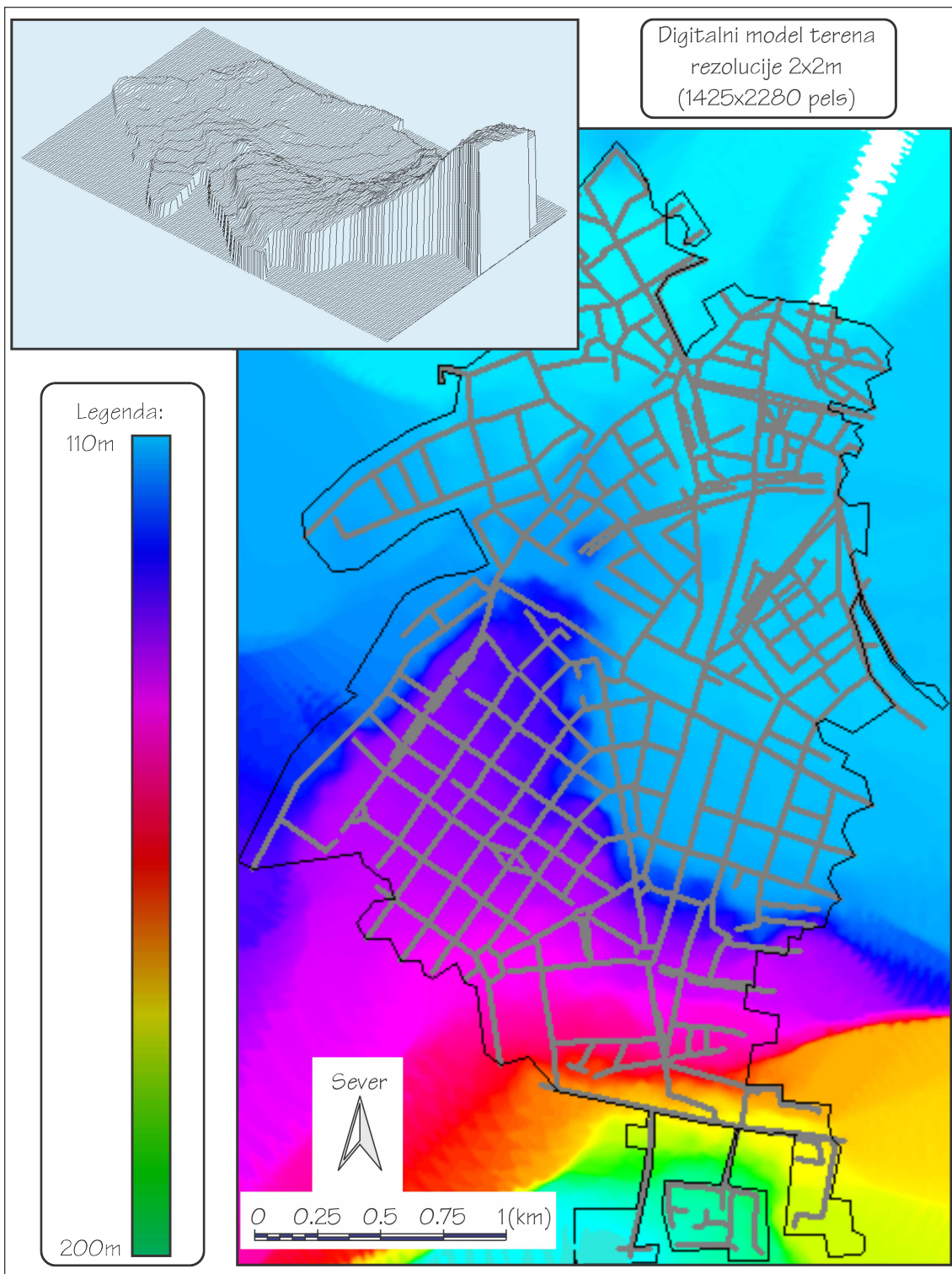




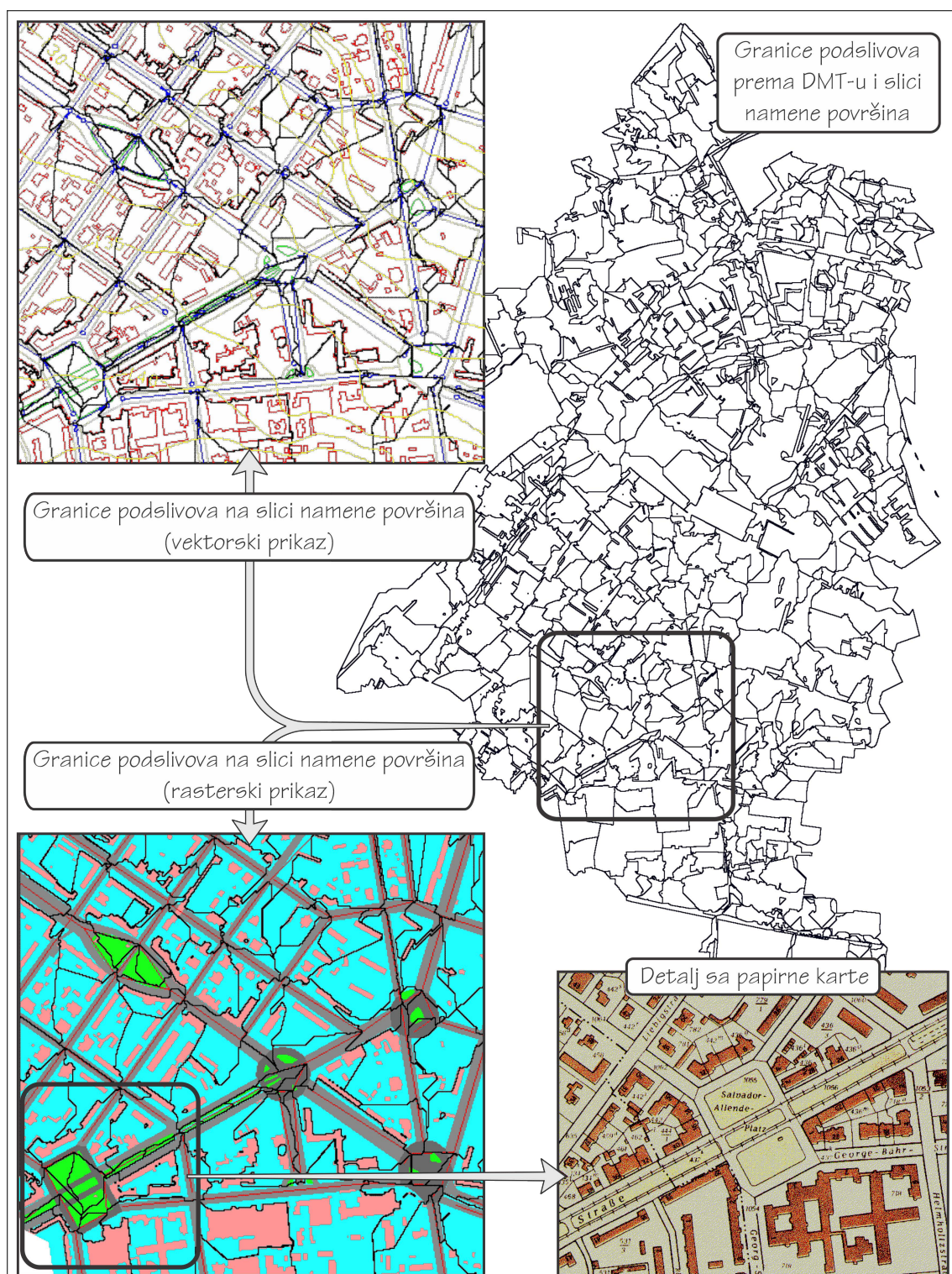
Slika 8.5: Sliv centralnog dela grada Drezdena, tri satelitska snimka u različitim spektralnim područjima i generisana kolor slika



Slika 8.6: Sliv centralnog dela grada Drezdena, kolor kompozitna slika grada, napravljena na bazi satelitskog snimka i sloj namene površine terena dobijen digitalizacijom papirne karte razmere 1:5000



Slika 8.7: Sliv centralnog dela grada Drezdena, digitalni model terena dobijen interpolacijom na osnovu kota terena na mestu čvorova, uz uslov o linearnoj interpolaciji duž ulica



Slika 8.8: Sliv centralnog dela grada Drezdena, generisane granice podslivova

Br.	Operacija	Čovek/dan	Primed.
1	Skeniranje papirnih karti - INTERGRAPH	2	*
2	Skeniranje papirnih karti - HOUSTON Instruments	2	**
3	Digitalizacija na ekranu - INTERGRAPH TIGRIS i konverzija u DXF format	14	*
4	Digitalizacija na ekranu - CAD OVERLAY	20	**
5	Skeniranje satelitskih snimaka, georeferenciranje i kreiranje kompozitne slike	2	
6	Unos podataka o visinama i kreiranje DMT-a	6	***
7	Analiza površina na terenu i kreiranje sloja namene površina	3	***
8	Konverzije između vektorskih i rasterskih podataka	5	***
9	Delineacija sliva, kreiranje Hystem-Extran datoteka, prebacivanje svih rezultata u AutoCAD	6	***
10	Črtanje izlaznih rezultata, kriranje izveštaja, arhiviranje datoteka	10	
11	Koordinacija poslova, kontrola i konsultacije	20	
12	Administrativni poslovi (kopiranje, pošta, ...)	6	
<p>Za sve poslove (izuzev br. 1 i 3 gde je korišćena radna stanica INTERGRAPH) korišćena su dva PC-ja 486/33 (ceo dan), crno beli (4 sata) i kolor (1 dan) skener, kolor HP DeskJet i crno beli HP LaserJet printeri.</p> <p>* - Podizvođač A  ** - Podizvođač B  *** - Vreme uključuje i razvoj alata kao i rad u više verzija  Čovek/dan: 7.5 radnih sati</p>			

Tabela 8.1: Resursi upotrebljeni u primeni GIS tehnologija za projekat OUP-a

BEMUS modelu, gde je čvor (šaht sa slivnikom) osnova za delineaciju, su sada korigovani prema Hystem-Extran modelu, u kome kanalizaciona cev može celom svojom dužinom da prima vodu sa površine. Takođe, dorađeni su i alati za kreiranje specifičnih parametara podslivova kao i formata datoteka za Hystem-Extran model.

Obradom svih dobijenih podataka različitim metodama, stečena su dragocena iskustva u pogledu rada na realnim, stvarnim projektima OUP-a. Mada su neke operacije ugovarane sa nezavisnim, informatičkim kompanijama, ispostavilo se da je vreme potrošeno na uhadavanje radnih timova, zbog specifičnosti projekata, istog reda veličine kao i vreme provedeno na pripremi podataka. Kreiranje DMT-a, mada naizgled jednostavan proces, se pokazao kao izuzetno osetljiv na loše ulazne podatke kao i na podatke iz različitih izvora, pa je vreme provedeno u verifikaciji DMT-a bilo duže od samog vremena kreiranja. Satelitski snimci nisu ispunili očekivane

zahteve, ali su, sa druge strane, bili od neprocenjive vrednosti u dopuni sadržaja starih papirnih karti.

Na osnovu stečenih iskustava, sa kompanijom ITWH je dogovoreno da se svi razvijeni alati za pripremu potrebnih datoteka za Hystem-Extran simulacioni program, ugrade unutar AutoCAD programa. Napravljen je paket GIPS, sa ekster-nom bazom (slika 2.7 na strani 17 i slika 3.1 na strani 26) i sistemom za unos topološki uređenih objekata. Interfejs pod AutoCAD-om ka razvijenim GIS alatima je omogućio jednostavno povezivanje dva sistema u kompaktnu aplikaciju.

## 8.3 Kladovo

Za potrebe grada Kladova urađena je hidraulička analiza postojeće i novoprojektovane kišne kanalizacije [21]. Konfiguracija terena je takva da se kišna voda sa manjeg, severoistočnog dela (sliv Pristanište, oko 70 ha) odvodi direktno u Dunav, dok se glavni deo sliva (slivovi Centar, Dedinje i Pemci, ukupne površine oko 200 ha) drenira u retenziono jezero iz koga se kasnije crpi u Dunav (slika 8.9).

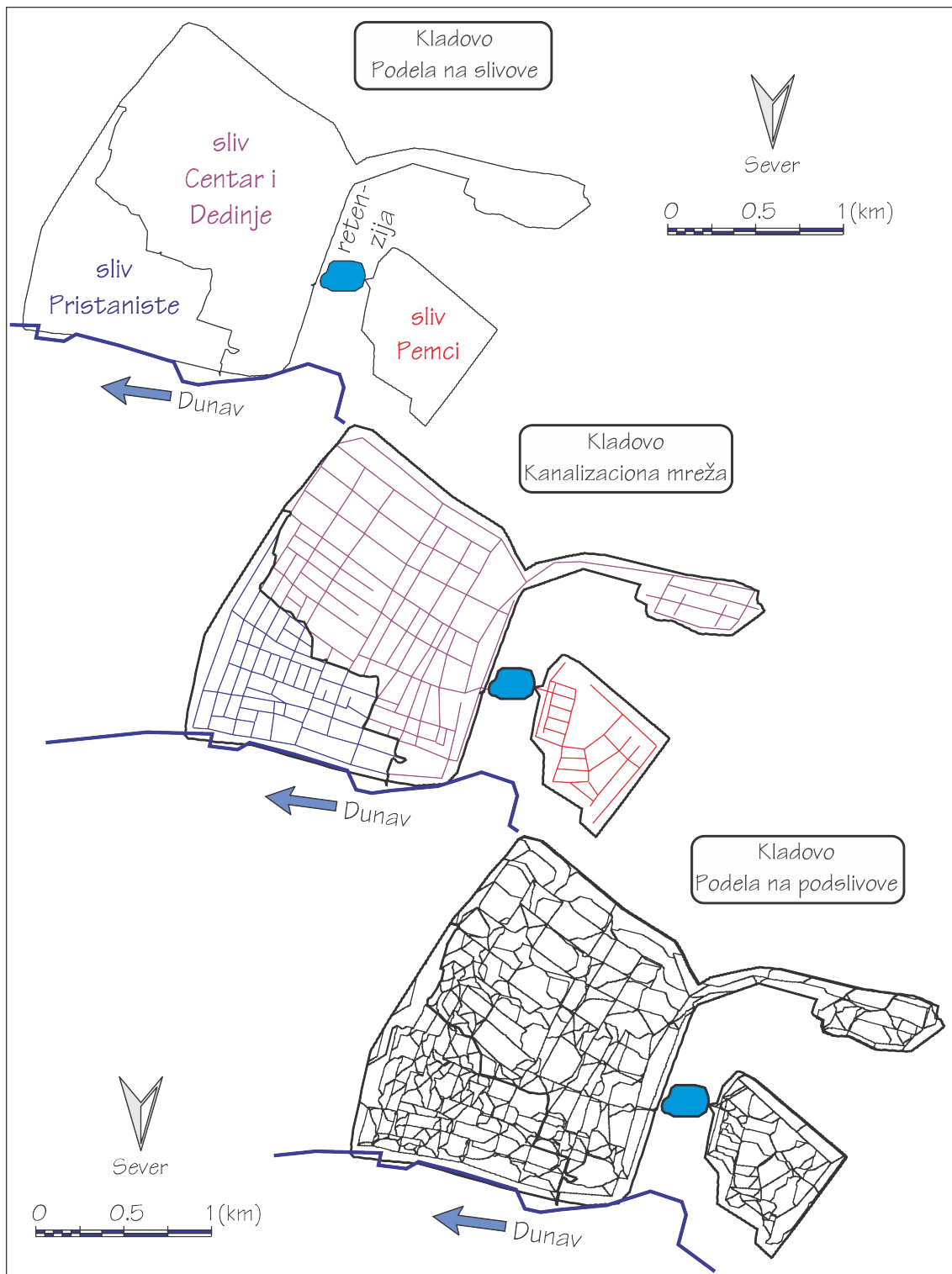
Osnovni zahtev pri izvođenju hidrauličke analize je bila hitnost. Zbog nabavke određenih cevi u srednjem delu sliva Centar, bilo je potrebno za nekoliko dana obaviti kompletan proračun i dimenzionisanje novih kolektora. Kao izvor podataka, poslužile su papirne karte i ASCII datoteke sa koordinatama računskih čvorova i sa kotama terena i dna cevi. U okviru hidrauličke analize, nije dozvoljeno nikakvo odstupanje od već unapred zadate trase kanizacionih cevi, usvojenih idejnim projektom.

Postojeći podaci o mreži su reformatizovani i uneti u informatički model. AutoCAD je korišćen za vizualizaciju podataka. U fazi provere povezanosti mreže kao i kota terena i cevi, otkriveno je dosta grešaka u ulaznim datotekama. Vreme provedeno na otklanjanju (tuđih) grešaka je bilo istog reda veličine kao i procenjeno potrebno vreme da se cela mreža digitalizacijom direktno unese u sistem(!).

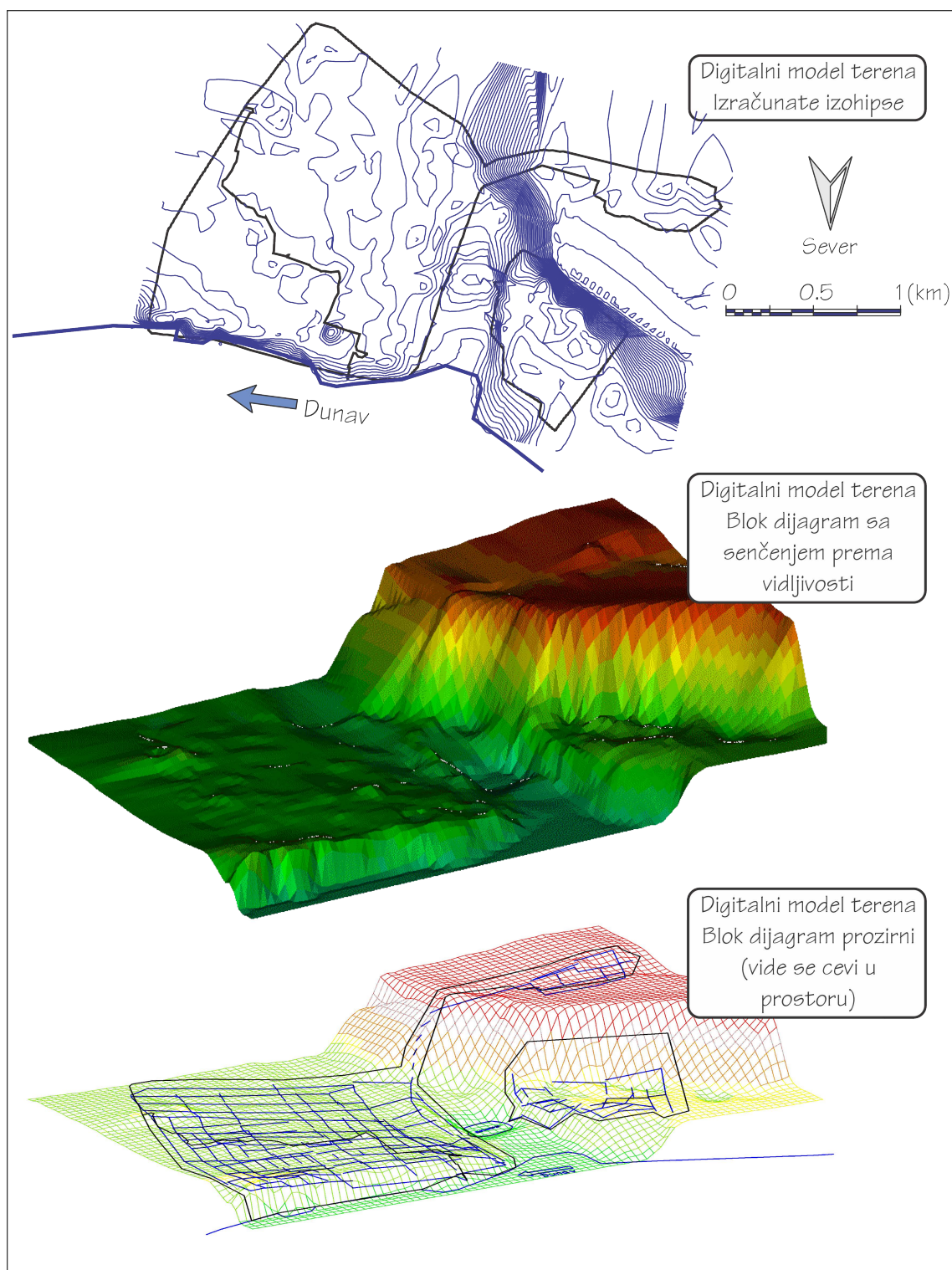
Na osnovu kota terena kreiran je DMT i računске izohipse. Primenjen je postupak triangulacije a zatim prostorne interpolacije kubnim polinomom. Na slici 8.10 je dat DMT senčen i u formi žičanog blokdijagrama sa kanizacionim cevima.

Delineacija sliva je obavljena samo u skladu sa DMT-om, jer detaljan sloj namene površina nije postojao (slika 8.9 dole). Pri delineaciji je dobijeno za jedan manji deo unutar pretpostavljenih granica sliva da ne pripada ni jednoj slivnoj površini, što je posledica konfiguracije terena koji je tu lokalno u depresiji. To praktično znači da sa tih delova sliva, usled nagiba terena, voda neće oticati ni i jednu cev.

Da bi se odredile procentualne zastupljenosti različitih tipova površina za svaki podsliv su ručno digitalizovane u AutoCAD-u grubo konture 5 najčešćih zona: administrativno-upravni i ugostiteljsko-trgovinski centri, lokalni centri i kolektivno stanovanje I kategorije; kolektivno stanovanje II kategorije; individualno stanovanje, javni objekti u zelenilu, sportsko-rekreativni centri i komunalne zone; park, groblje i sportska igrališta; zaštitno zelenilo (nije prikazano na slikama). Za svaku od zona



Slika 8.9: Grad Kladovo, razgraničenje grada na tri sliva, postojeća i novoprojektovana kanalizaciona mreža i generisani podslivovi

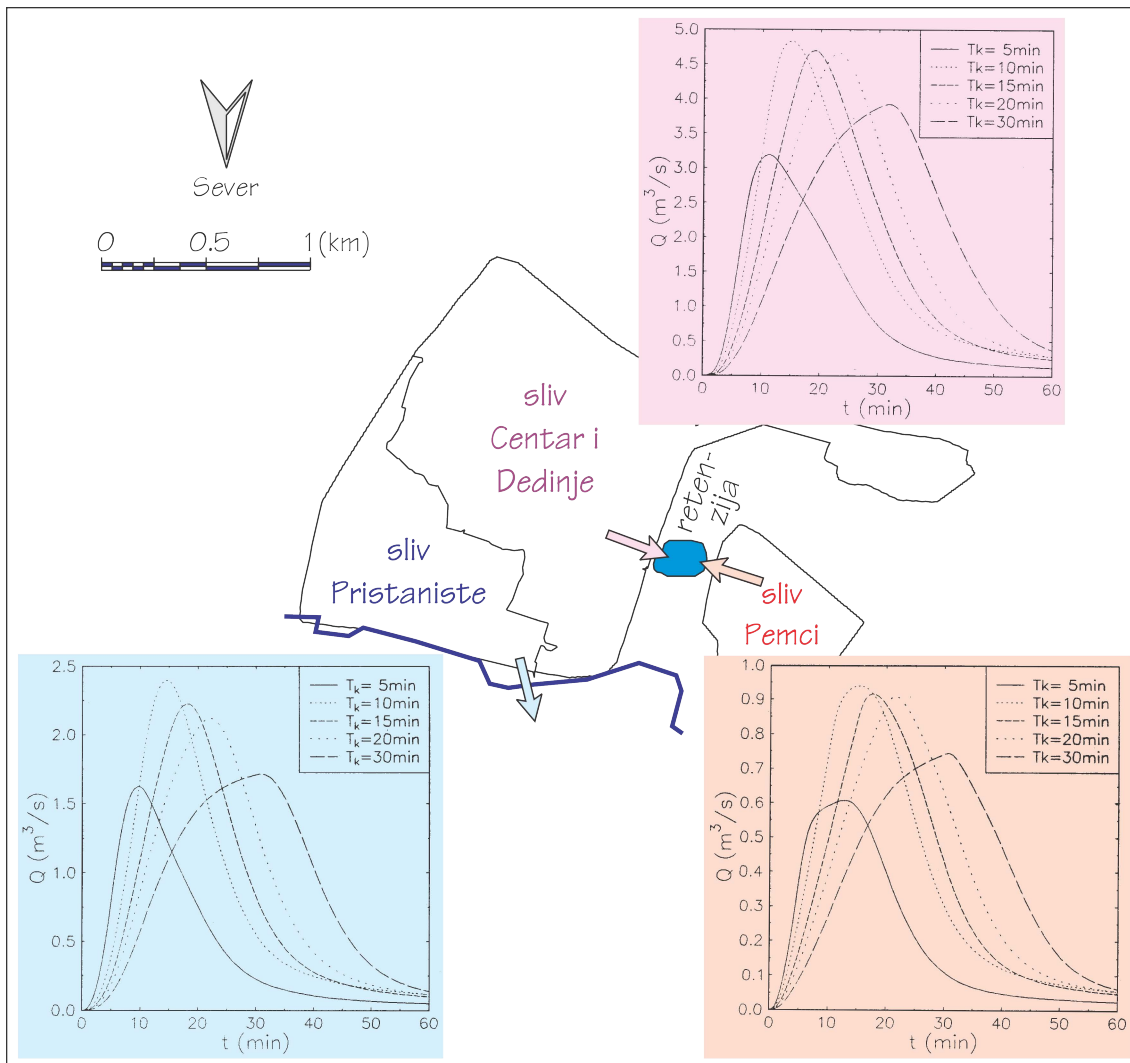


Slika 8.10: Grad Kladovo, digitalni model terena prikazan izračunatim izohipsama i blokdijagramom



su procenjeni procenti krovova, kolovoza i trotoara i zelenih površina.

Informatički model je generisao sve datoteke u vezi kanalizacione mreže i podslivova u formatu potrebnom BEMUS modelu. Razvijen je i dodatni modul koji preuzima rezultate simulacije i generiše AutoCAD crtež sa podacima o procentualnim ispunjenostima cevi i brzinama vode u cevi.



Slika 8.11: Grad Kladovo, hidrogrami oticaja u izlaznim presecima za tri dela sliva, za kiše povratnog perioda dve godine, a za različita trajanja kiše

Rezultati simulacije oticaja za tri dela sliva su dati na slici 8.11. Prema zahtevima investitora, korišćeni su dijagrami o jačini kiše u zavisnosti od trajanja i učestalosti (ITP), dobijeni na bazi podataka sa kišomerne stanice u Turn-Severinu u periodu 1952-1960.<sup>2</sup> Za merodavnu računsku kišu je, za ceo sliv,<sup>3</sup> usvojena 10-to minutna

<sup>2</sup>Sugerisano je investitoru da je potrebno pribaviti novije podatke, za period posle izgradnje akumulacije Đerdap, i sa bliže lokacije.

<sup>3</sup>Preporučeno je da se uradi i analiza sa različitim povratnim periodima kiša za različite delove

kiša povratnog perioda dve godine, čiji je intenzitet 1.15 mm/min (za konstantan intenzitet).

Zbog kratkog vremena i nedostatka finansijskih sredstava, informatički model OUP-a nije mogao da se upotrebi za sve predviđene analize. pokazalo se, međutim, da i u uslovima ograničenog vremena, razvijeni sistem pomaže u znatno bržoj i kvalitetnijoj pripremi podataka i generisanju finalnih izveštaja simulacije. Iskustva stečena u ovom projektu su upravo pomogla u boljem sagledavanju rada na ovakvoj vrsti projekata i u još boljem prilagođavanju informatičkog modela realnim inženjerskim potrebama.

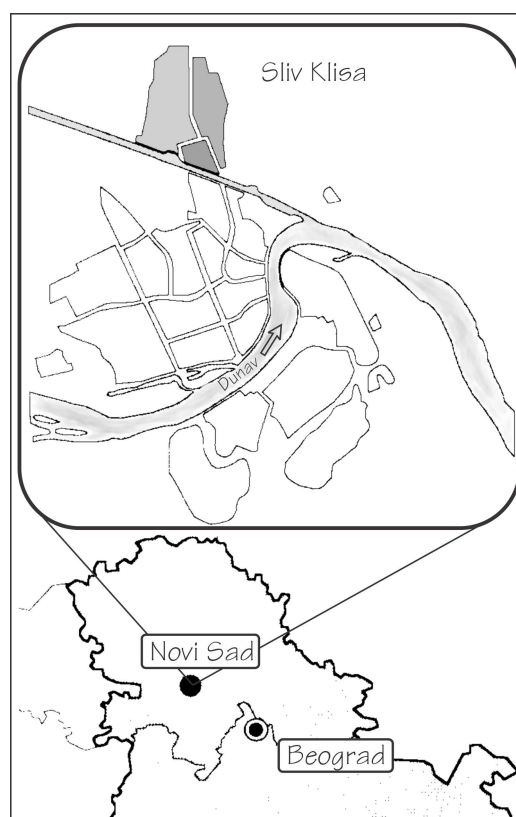
## 8.4 Novi Sad

Sliv Klisa se nalazi u severnom delu grada Novi Sad, između kanala Dunav-Tisa-Dunav i autoputa Beograd-Subotica [61, 80]. Površina sliva je 440 ha i sastoji se od relativno ravnog terena niske kote, štice sistemom nasipa. Srednji nivo podzemnih voda je blizu kote terena, a postojeći kanalizacioni sistem za upotrebljene vode je u znatnoj meri oštećen zbog sleganja terena.

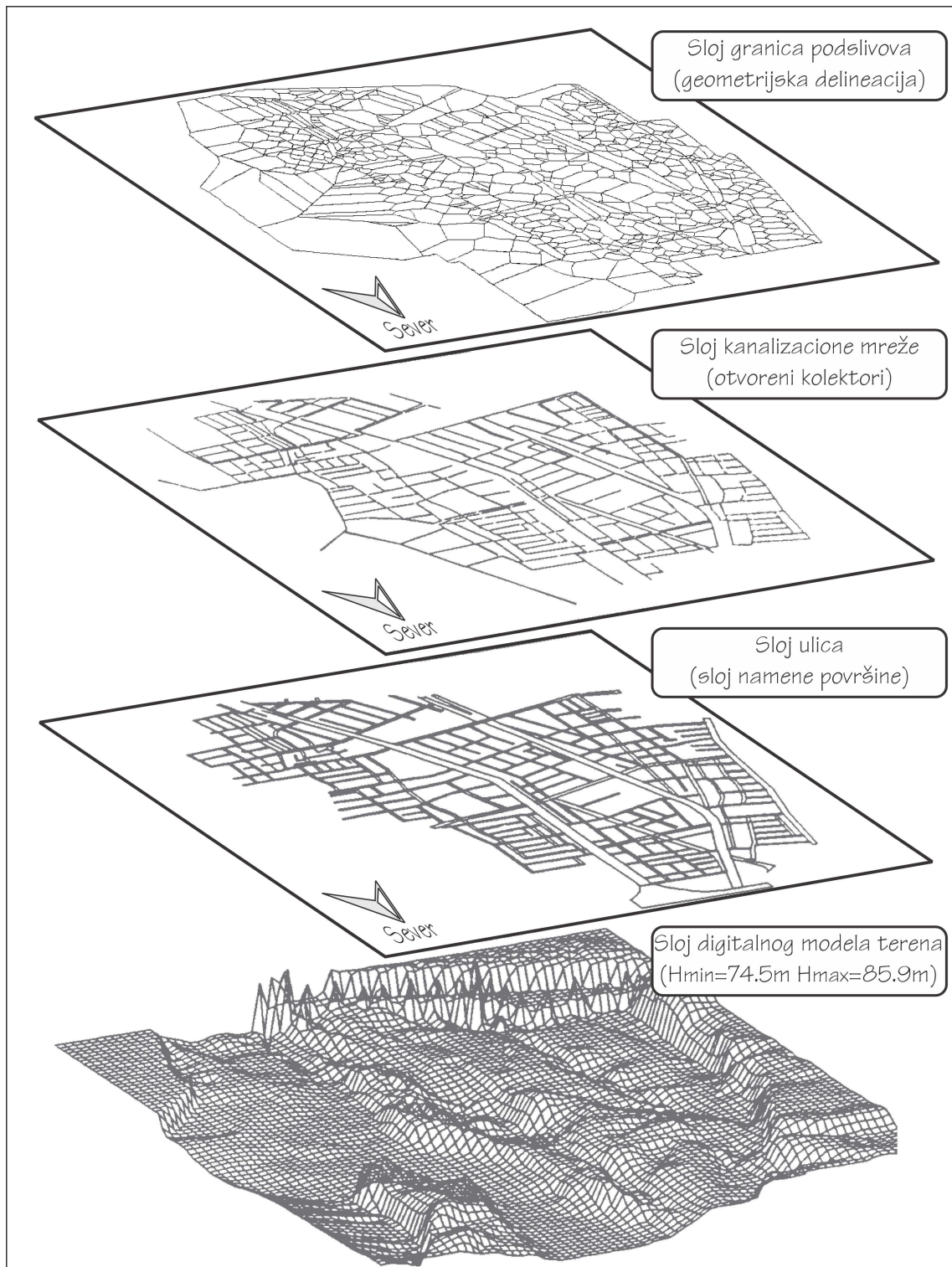
Svrha ovog projekta je bila da se da rešenje odvođenja kišnih voda, uzimajući u obzir sve planirane faze urbanizacije sliva. Kao rešenje za prikupljanje i sprovođenje kišnih voda unutar sliva zadržana je postojeća mreža slabo održavanih otvorenih kanala sa predviđenim novoprojektovanim kanalom Strelište i crpnom stanicom na nizvodnom kraju kojom se voda prebacuje u meliorativni sliv Vrbak. Dogradnjom novih deonica kanala i propusta, kao i čišćenjem i eventualnim proširenjem postojećih, mreža je prilagođena merodavnim količinama voda.

Od ulaznih podataka, na raspolaganju su bile papirne karte relativno starog datuma, rezultati terenskog premera trasa pojedinih značajnijih (postojećih) kanala, kao i aerofotografije, klasifikovane kao vojna tajna (zabranjeno umnožavanje). Na osnovu rezultata premera terena kao i izohipsi sa papirne karte, formiran je DMT (kreiranjem TIN-a a zatim prostornom interpolacijom). Pažljivom analizom DMT-a i aerofotografija, određena je granica slivnog područja. Digitalizacijom papirne

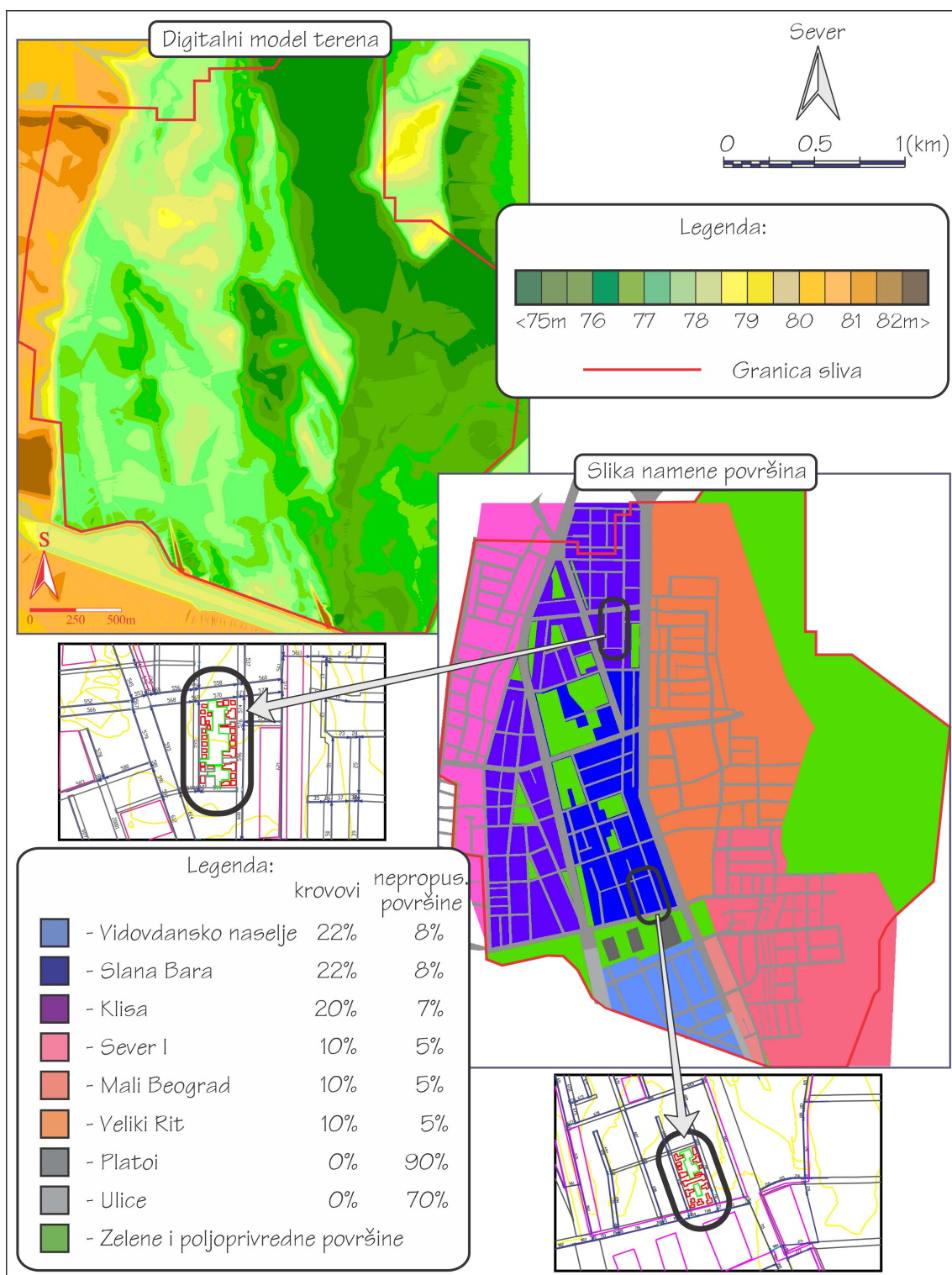
sliva, kao i sa različitim sintetičkim oblicima padavina.



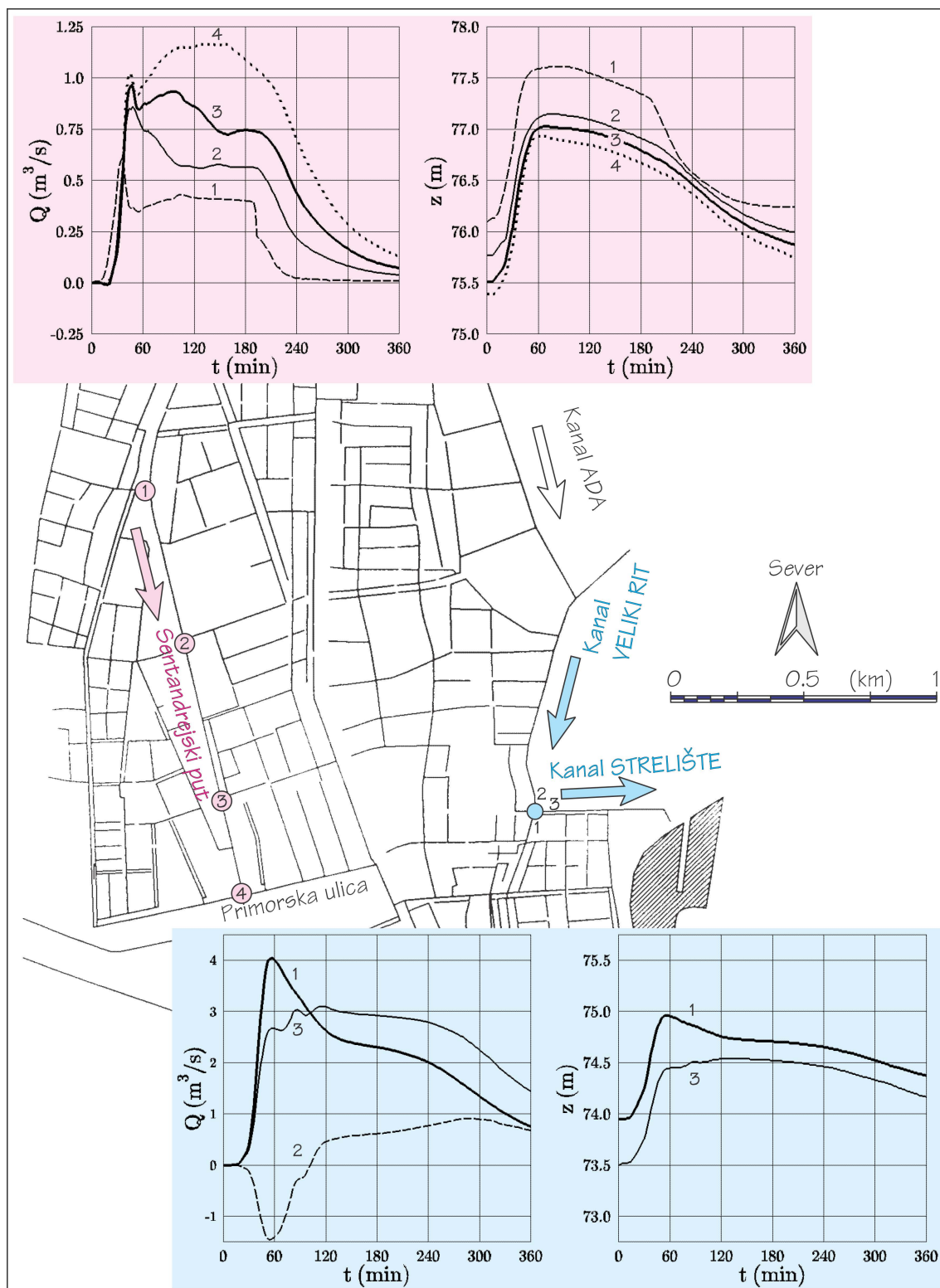
Slika 8.12: Položaj sliva Klisa u Novom Sadu



Slika 8.13: Klisa, Novi Sad, ulazni i generisani slojevi



Slika 8.14: Klisa, Novi Sad, digitalni model terena i sloj namene površina



Slika 8.15: Klisa, Novi Sad, hidrogrami i nivogrami duž kanala na istočnoj strani Sentandrejskog puta i na mestu uliva kanala Veliki rit u kanal Strelište, za kišu povratnog perioda deset godina, dužine trajanja 45 min

karte, u informatički model su unete sve ulice, kao značajne nepropusne površine i kao pouzdani orijentiri. Sa karti su digitalizovani i postojeći kanali, pri čemu je kota dna automatski određivana u odnosu na kotu interpolovanog terena a na osnovu poznate dubine kanala, dok su propusti visinski usklađivani sa uzvodnim/nizvodnim kanalom.

Koristeći aerofotografije (vizuelno) i papirne karte, kao i obilaskom terena, uočeno je 9 tipova površina terena (slika 8.14). Za dva tipa su detaljno digitalizovani svi objekti unutar jednog kvarta, određene su zastupljenosti krovova, nepropusnih i propusnih površina, a zatim su ti rezultati ekstrapolovani na ostale zone (poglavlje 6.3 *Zastupljenost različitih tipova površine*).

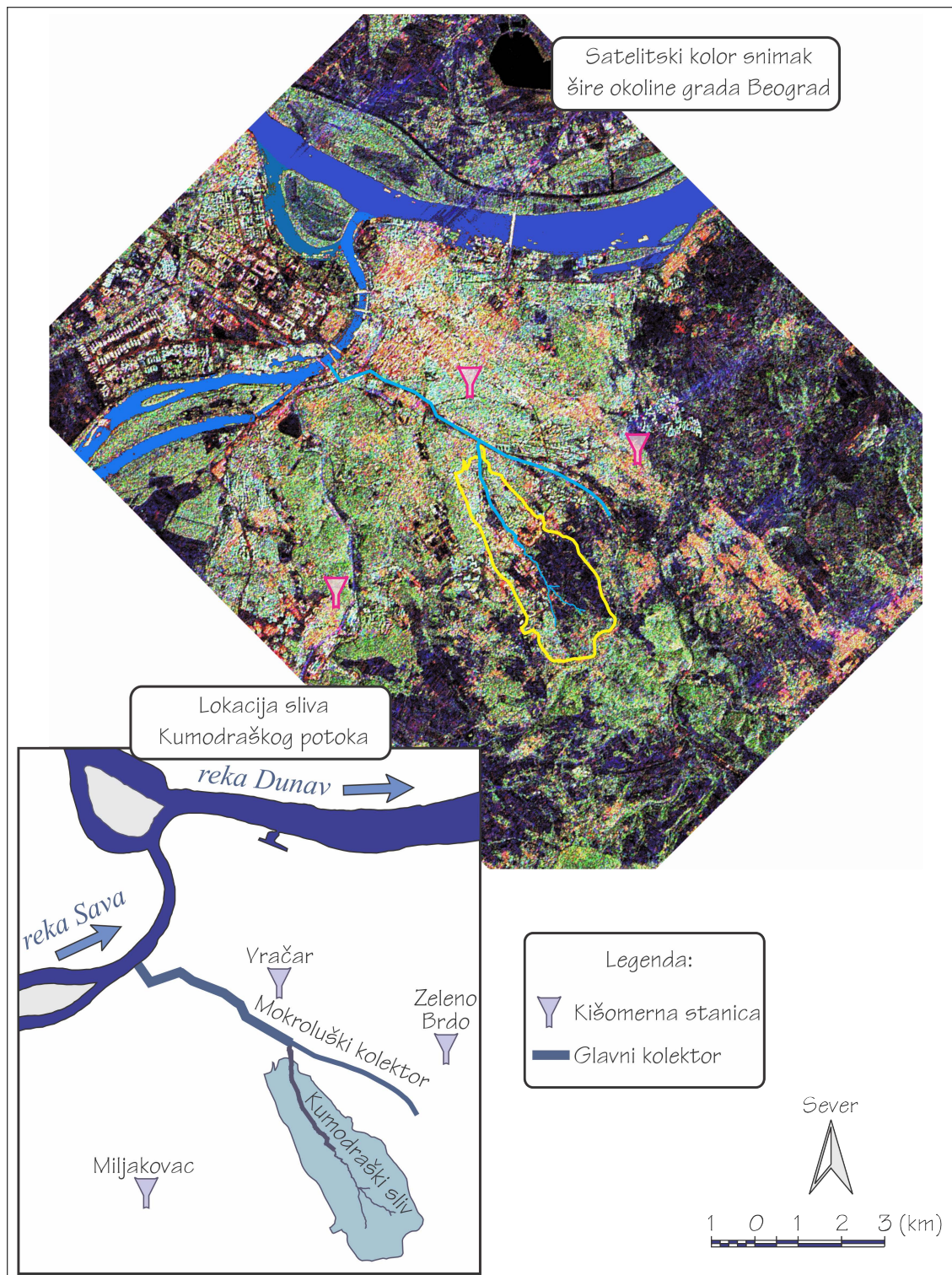
Zbog izuzetno malih nagiba terena, korišćena je geometrijska delineacija sliva. Prethodno su analizom DMT-a izdvojene dve zone sa većim depresijama, iz kojih voda ne može da se odvede gravitaciono. Na slici 8.15 su prikazani rezultati simulacije oticanja sa sliva, za kišu trajanja 45 minuta i povratnog perioda 10 godina. U proračunu su korišćeni ITP dijagrami kao i dijagrami neravnomernih oblika hijetograma različitih verovatnoća, dobijeni statističkom analizom izdvojenih serija najjačih kiša određenog trajanja. Analizom rezultata simulacija sa kišama različitih trajanja i oblika hijetograma, ustanovljeni su merodavni nivogrami i hidrogrami za dimenzionisanje manjih uzvodnih kanala (za kratke pljuskove), tranzitnih kanala (kiše trajanja 30 do 45 minuta) i pumpnih stanica i retenzije (prema kišama trajanja 90 minuta). Takođe, izvršena je i analiza moguće koncidencije trenutka pojave najvećih nivoa i proticaja.

U toku rada na projektu, bilo je potrebno pojedine delove mreže računati i MOUSE modelom. Zbog toga je razvijen kompletan interfejs između MOUSE-a i informatičkog modela OUP-a, tako da je bilo moguće izabrane delove sistema računati ili u BEMUS-u ili u MOUSE-u.

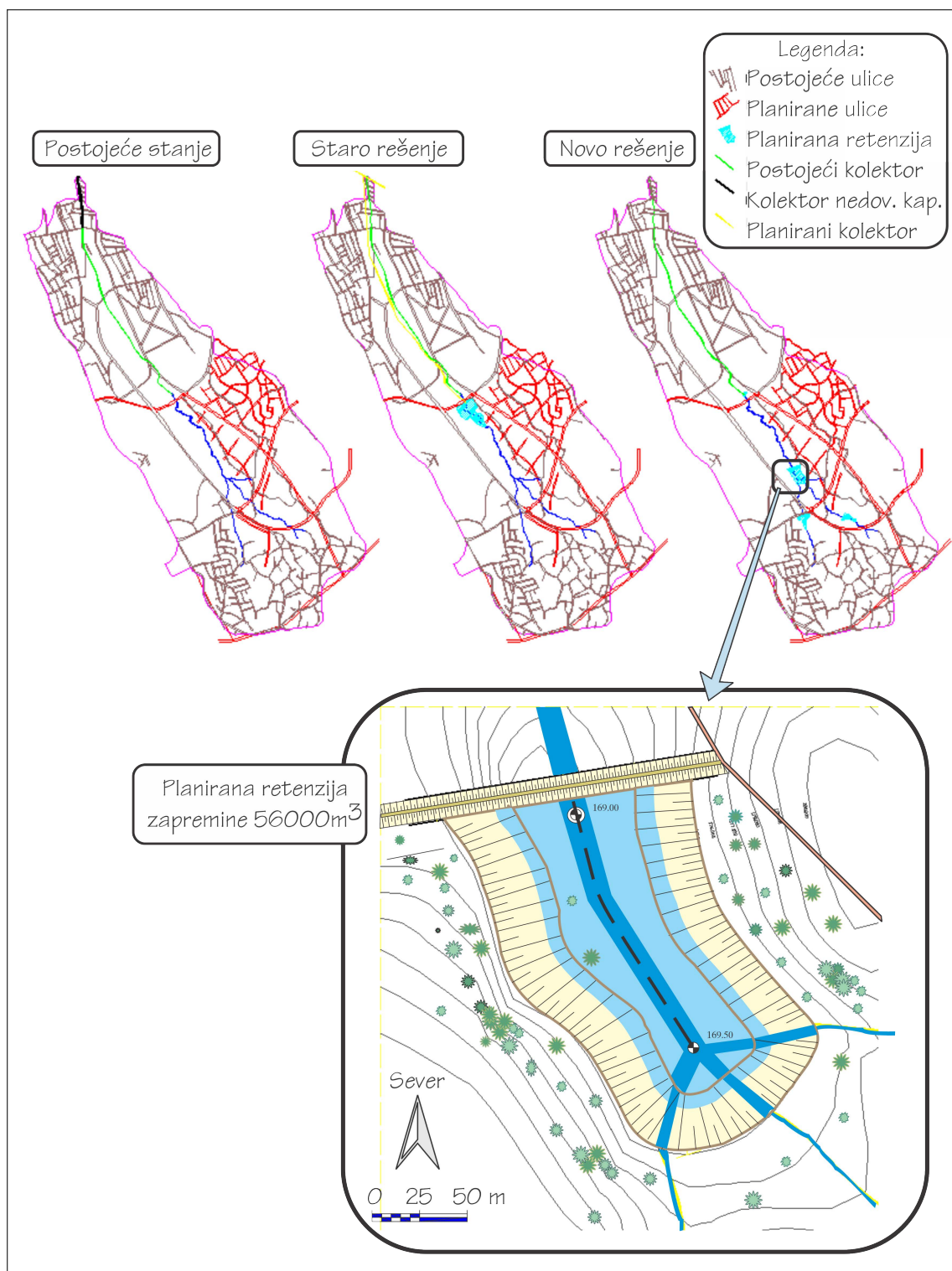
## 8.5 Kumodraž – Beograd

Sliv Kumodražskog potoka je tipičan za Beogradski kanalizacioni sistem [13, 22]. Ukupna površina sliva je 775 ha, sa strukturom koja varira od čisto ruralnog sliva u uzvodnom (i strmijem) delu, preko industrijalizovanog dela u srednjem, do gusto naseljenog dela u najnižvodnijem (i najpravijem) delu sliva. U uzvodnom delu sliva potok čini prirodni kolektor, dok je u nizvodnom delu sliva taj potok zacevljen. Sve vode Kumodražskog sliva prihvata Mokroluški kolektor, koji gravitaciono (osim u periodima visokih voda u Savi) odlazi u reku Savu (slika 8.16).

Sadašnju kanalizacionu mrežu sliva čini oko 1000 cevi, sa mešavinom sistema za upotrebljene vode, za kišne vode, kao i opšteg sistema. Cilj ovog projekta je bila ocena postojećeg stanja sistema, evaluacija rešenja Kumodražskog sliva iz 1975. godine, kojim je bila predviđena velika retenzija u centralnom delu sliva, i da se ponudi inovirano rešenje u skladu sa aktuelnim procesima urbanizacije sliva i predviđenim urbanističkim planovima (slika 8.17). Kriterijumi od kojih se pošlo



Slika 8.16: Beograd, sliv Kumodraž, lokacija sliva na satelitskom (SPOT) kolor kompozitnom snimku niske rezolucije



Slika 8.17: Beograd, sliv Kumodraž, postojeće stanje i varijante rešenja sa retenzi-jama



u predlaganju budućeg rešenja su: razdvajanje kišnih od upotrebljenih voda, u što većoj meri; korišćenje postojećih cevi i kolektora kako bi se minimizirali skupi građevinski radovi u urbanizovanom delu sliva; kanalisanje kišnih voda za mero-davne proticaje povratnog perioda 2 godine na celom slivu i 10 godina za glavni kolektor; i formiranje nekoliko manjih retenzija umesto jedne velike.

Od ulaznih podataka, korišćene su papirne karte sliva, razmere 1:5000 i detaljni listovi 1:500, starijeg datuma, kao i aerofotografije razmere 1:6500, novijeg datuma. Varijanta sa fotorestitucijom sirovih aerofotografija, odakle bi se dobili svi značajniji objekti (ulice, trotoari, nepropusne površine, kuće, itd.) kao i visine terena sa lini-jama prekida, nije usvojena od strane investitora, zbog visoke cene pripreme (georeferenciranje triangulacijom) snimaka. Umesto toga, digitalizovana je karta razmere 1:5000, odakle su unete samo ulice, nekoliko većih objekata i globalna granica sliva, dok su sa detaljnih listova krupne razmere (1:500) uneti podaci o kanalizacionom sistemu.

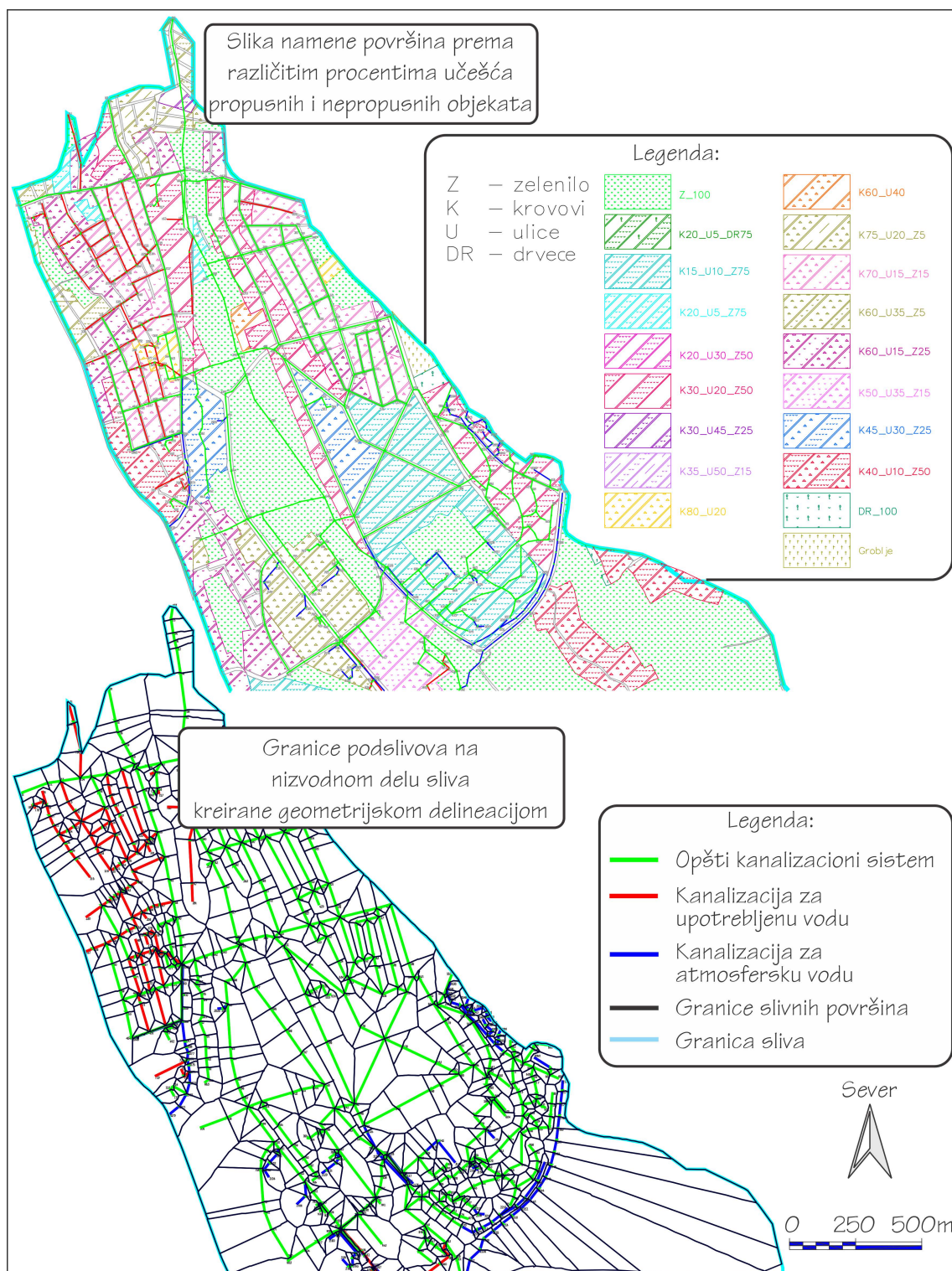
Visinski podaci o terenu su preuzeti iz detaljnih listova, gde su upisane kote terena na mestu šahtova, kao i kote pojedinih karakterističnih tačaka. Takođe, korišćene su i izohipse u delu sliva gde ne postoji kanalizaciona mreža. Kreiranjem TIN-a a zatim kubnom interpolacijom, napravljen je DMT (slika 8.19 levo i srednji deo slike 8.21).

Na osnovu DMT-a i aerofotografija, kreiran je ortofotografski snimak sliva. Nje-govim korišćenjem, digitalizovana su i sva nova (planski i nelegalno izgrađena) naselja na slivu. U formiranju sloja namene površine terena, korišćenjem ortofoto-grafije i papirne karte, određeno je 19 tipova površina terena, sa različitim ste-penom zastupljenosti krovova, ulica i propusnih površina (slika 8.18 gore). Operaci-jom preklapanja slojeva, kombinovane su površine koje su detaljno digitalizovane (ulice i veći objekti) sa višim prioritetom i uneti tipovi površina sa nižim priorite-tom.

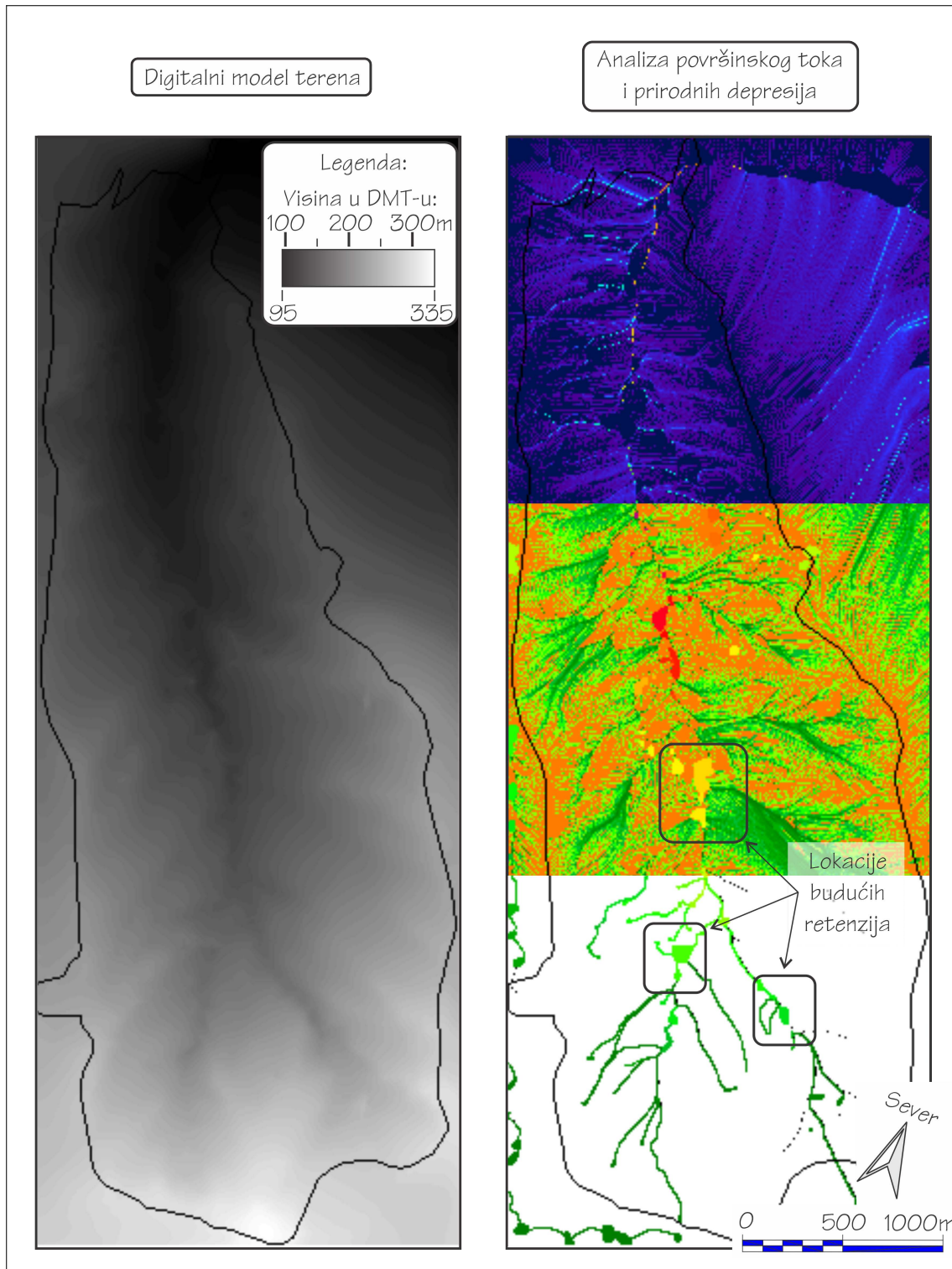
Na slici 8.18 dole, date su granice podslivova u urbanizovanom delu sliva, gde postoji kanalizaciona mreža. U delineaciji je vođeno računa da samo kišni i opšti kolektori mogu primati vodu sa površine terena. Na slici nije prikazana delineacija sliva za potrebe određivanja količina upotrebljenih voda, kada je korišćena samo fekalna i opšta mreža.

Kako je Kumodraški sliv mešavina urbanog i ruralnog sliva, tok vode po površini terena predstavlja jednu od značajnih komponenti ciklusa oticaja. Na slici 8.19 desno su dati rezultati analize površinskog tečenja, sa lokacijama prirodnih depresija. Na osnovu te analize, određene su i lokacije budućih retenzija, kao i njihove karakteris-tike. Takođe, za uzvodni, čisto ruralni deo sliva, određena je i mreža površinskih kanala. Na istoj slici se vidi i primer kako informatički model prilikom preuzimanja podataka iz vektorskog sistema, rotira granicu sliva, kako bi se minimizirala površina rasterske slike.

Da bi se što kvalitetnije sagledalo postojeće stanje na slivu, u okviru projekta je uspostavljeno stalno merno mesto na izlivu Kumodraškog kolektora u Mokroluški, sa kontinualnim merenjem dubine vode. Na slici 8.20 su dati rezultati proticaja



Slika 8.18: Beograd, sliv Kumodraž, sloj namene površina terena i granice podslivova sa kanalizacionom mrežom



Slika 8.19: Beograd, sliv Kumodraž, digitalni model terena (levo) i rezultati analize površinskog toka i prirodnih depresija (desno)

sračunatog na osnovu dubine i formirane Q/H krive, za tri kišne epizode (isprekidana linija) u periodu 10-13. oktobar 1997. Na osnovu osmotrene kiše na Vračaru (na slici 8.20 je dat intenzitet kiše), primenom automatski određenih parametara, izvršena je i simulacija tih epizoda, kao nezavisnih događaja (puna linija). Prikupljeni podaci na izlivu kolektora tokom perioda 1997.-1999. godine čine izuzetno vrednu osnovu za kvalitetnu verifikaciju matematičkog modela i time pouzdanije simulacije budućih stanja urbanizacije sliva. Na žalost, tokom velike kiše 12-13. juna 1999. godine (preliminarno procenjenog povratnog perioda 20 godina), kolektor je došao pod veliki pritisak pa je poklopac šahta na mernoj lokaciji praktično “izleteo” uništiti kompletnu mernu opremu i same podatke o tom događaju.

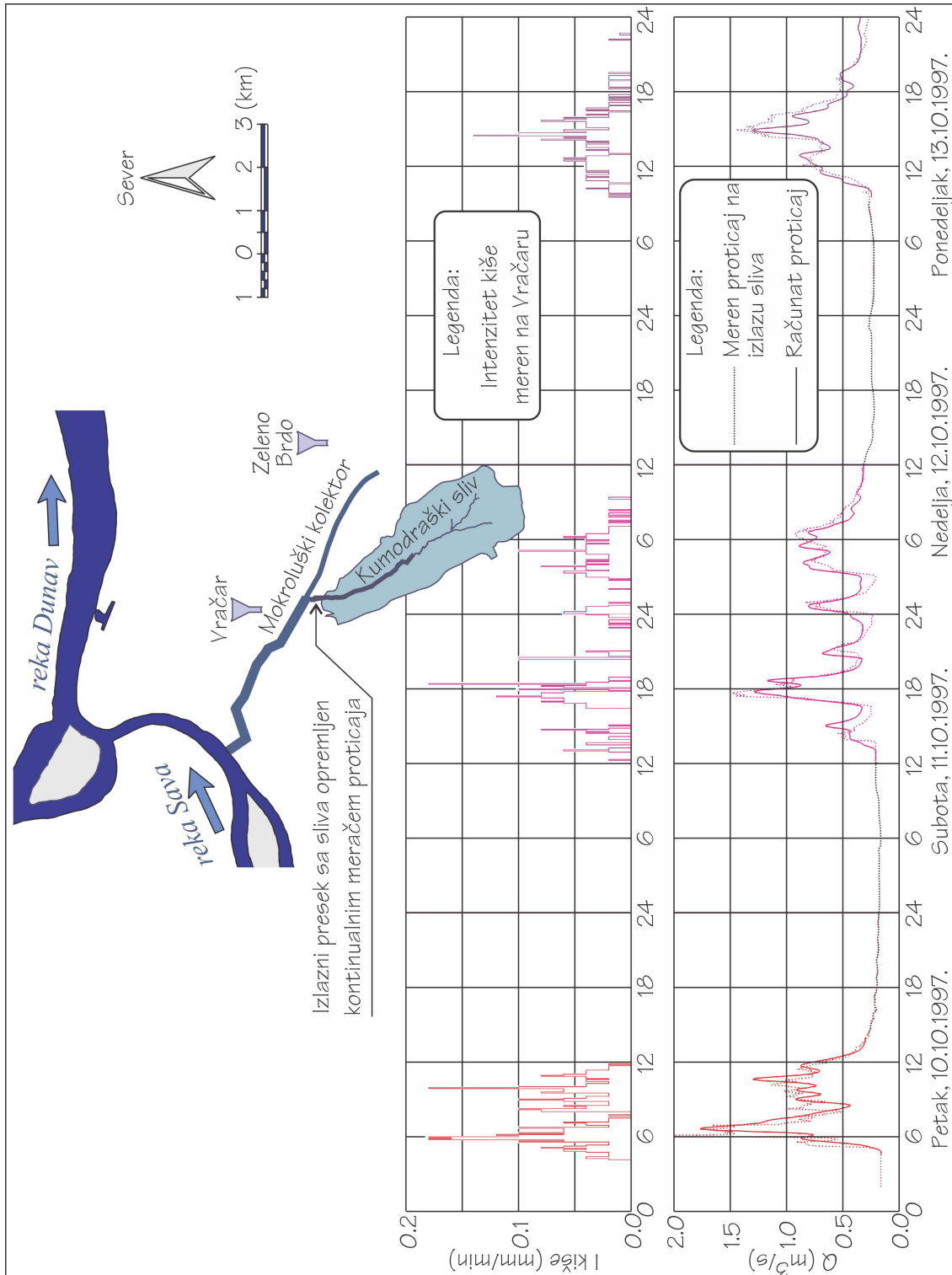
Problemu prezentacije rezultata simulacije je posvećena veća pažnja nego u prethodnim projektima. Na slici 8.21 je prikazan detalj iz izveštaja, kojim se prikazuje na jasan grafički način stepen ispunjenosti kolektora u nizvodnom delu sistema, pred uliv u Mokroluški kolektor. Na slici 8.22 je dat snimak ekrana računara, za vreme simulacije tečenja vode u sistemu. Posebnim programom, koji nije deo razvijenog informatičkog modela, prikazuje se trodimenzionalno, u prostoru, slika terena (ortofotografija stavljena preko DMT-a) kao i slika kanalizacionih cevi [44]. U svakom vremenskom koraku, animiraju se izabrane računске veličine predstavljanjem bilo promene boje cevi ili u formi “ograda”, dok se pijezometarske kote vizualizuju podizanjem i spuštanjem ravni koja predstavlja kotu vode u cevi.

Ovakav način prezentacije rezultata je direktno kompatibilan sa razvijenim informatičkim modelom. Mada su potrebni računarski resursi za komotan inženjerski rad još uvek izvan mogućnosti mnogih firmi, trodimenzionalnom vizualizacijom se znatno lakše analiziraju rezultati proračuna i određuju uska grla u sistemu.

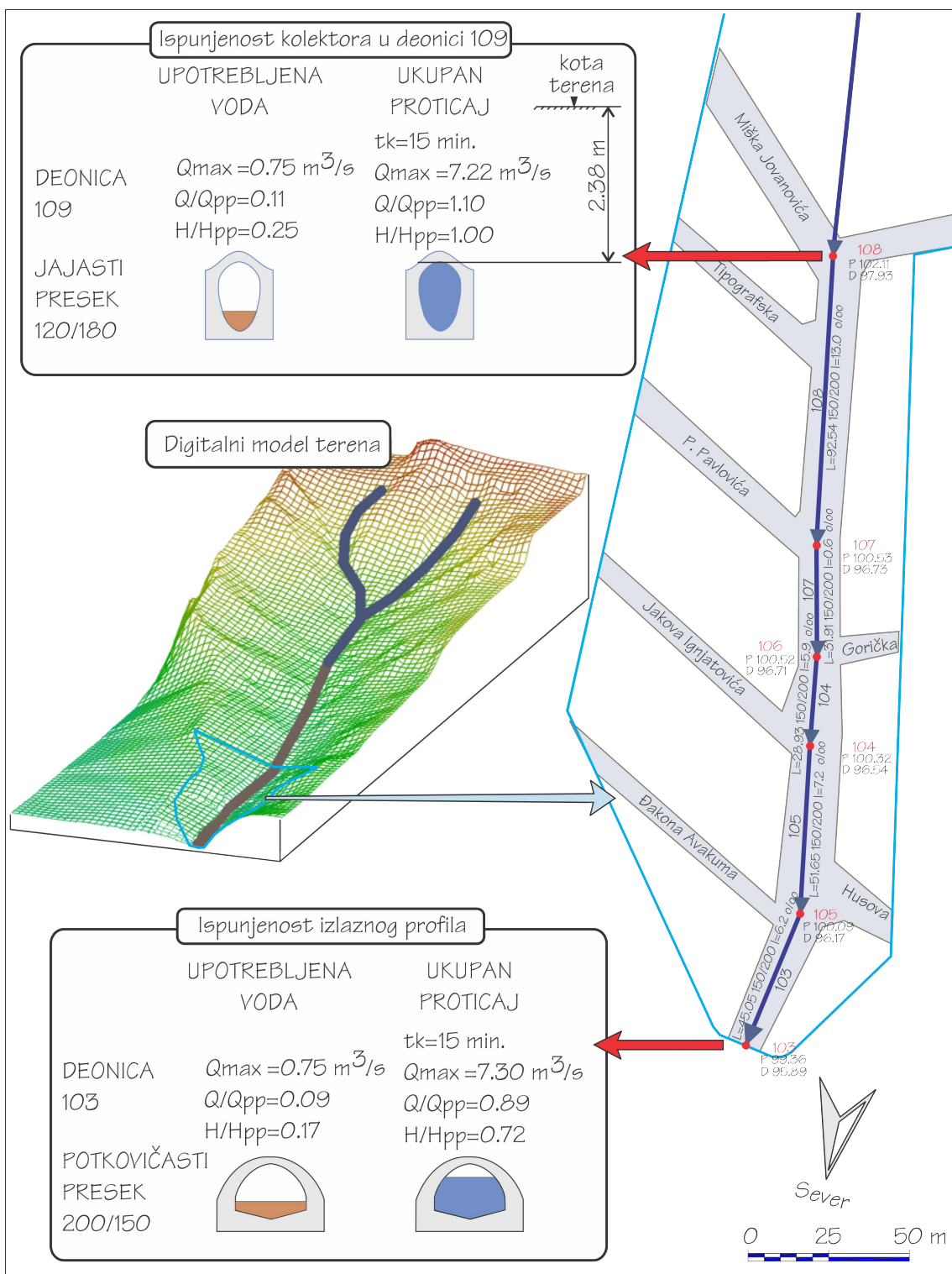
Primer Kumodražskog sliva je veoma važan u fazi razvoja prikazanog informatičkog modela OUP-a, jer je po prvi put kompletan sistem korišćen od strane drugih ljudi, uz minimalne intervencije autora. Na osnovu stečenih iskustava, izvršene su manje korekcije sistema, pre svega u domenu pouzdanijeg korišćenja i od strane manje obučениh inženjera.

Mada su na raspolaganju bile izuzetno kvalitetne aerofotografije, velika je šteta što je odlučeno da se one ne koriste na pravi način. Visinski podaci tako dobijeni bi rezultovali mnogo kvalitetnijim DMT-om, pa bi se sa većom pouzdanošću mogle odrediti i granice podslivova kao i površinske mini retenzije, koje mogu imati značajan udeo u smanjenju maksimalnog oticaja sa sliva.

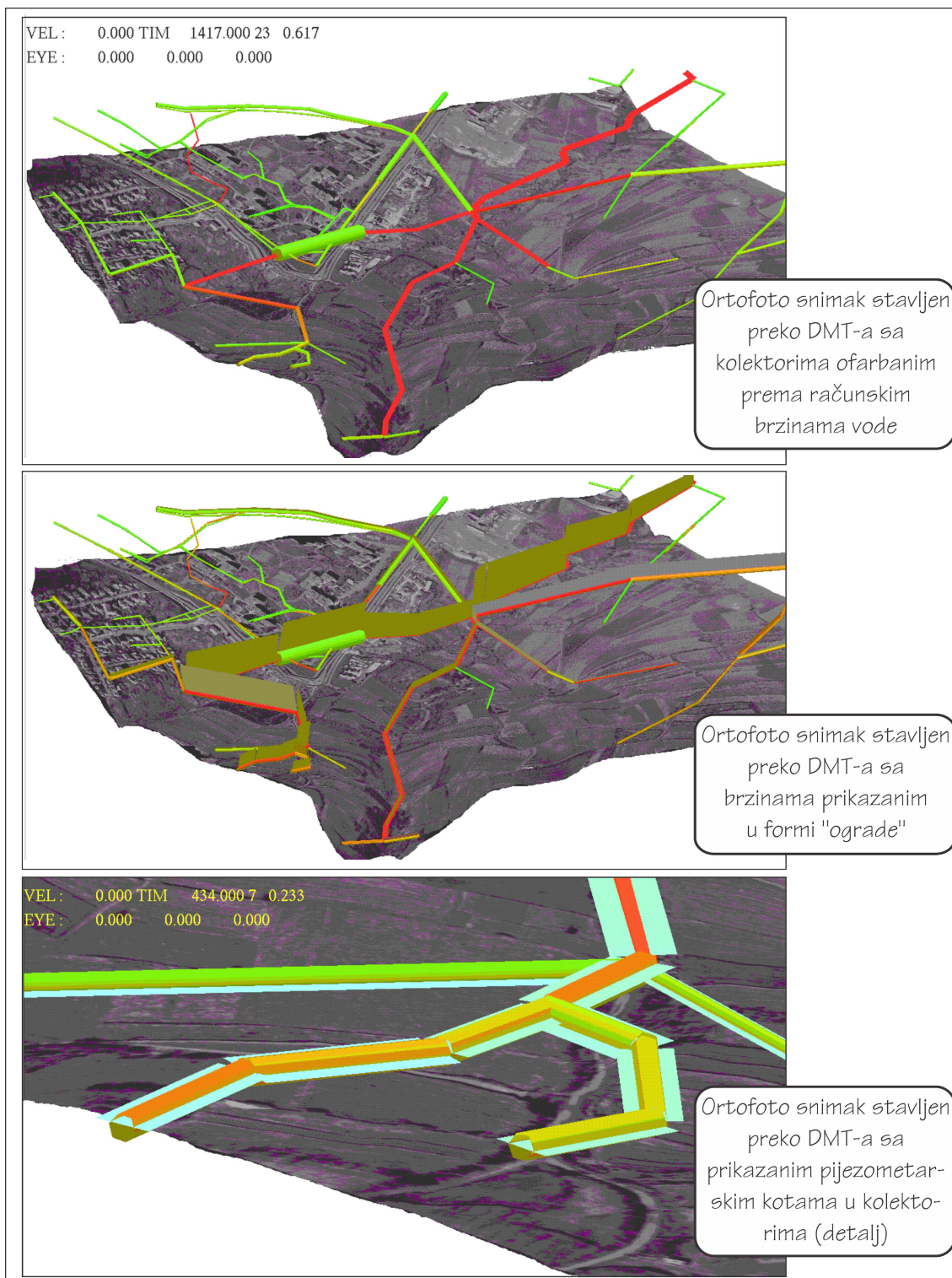
Interesantan je i propratni efekat primene informatičkog modela u ovom projektu. Naime, svi podaci o mreži su do sada isključivo bili čuvani u “papirnom” obliku, na detaljnim listovima. Nakon prve iteracije unošenja podataka, otkrivene su brojne greške: neslaganje tipova kolektora, različiti načini označavanja preseka kolektora, nelogičnosti u povezivanjima itd. Značajno vreme je potrošeno u “čišćenju” tih podataka (kroz obilazak terena, razgovore sa brojnim iskusnim majstorima Beogradske Kanalizacije, itd), tako da se sada došlo do pouzdane baze znanja o podzemnoj kanalizacionoj mreži.



Slika 8.20: Beograd, sliv Kumodraž, rezultat simulacije proticaja na izlivu iz sliva (puna linija) upoređen sa proticajem dobijenim merenjem dubine vode (isprekidana linija) za tri uzastopne kišne epizode



Slika 8.21: Beograd, sliv Kumodraž, prikaz stepena popunjenosti kolektora opšteg sistema, na samom izlazu iz sliva



Slika 8.22: Beograd, sliv Kumodraž, vizualizacija rezultata proračuna, kombinovanim DMT-a, ortofotografije terena i trodimenzionalnog prikaza cevi

# Glava 9

## Zaključak

### 9.1 Pregled obavljenih istraživanja i zaključci

U okviru disertacije je *razvijen hidroinformatički model OUP-a*, kompatibilan sa standardnim GIS sistemima i prilagođen postojećim numeričkim modelima BEMUS, Hystem-Extran i MOUSE. Razvijeni informatički model definiše *model podataka* i *metapodataka* (podaci o podacima: izvor podataka, domen tačnost, raspoloživost, datum, struktura itd.), *slojeve* u kojima se čuvaju podaci i vezu između njih, kao i *alate*, odnosno postupke kojima se ti slojevi kreiraju i održavaju. Informatički model omogućava pouzdanije unošenje podataka, kreiranje novih informacija na osnovu unetih podataka i automatsko pripremanje ulaznih parametara za numeričke modele. Takođe, obezbeđuje *dvostranu komunikaciju sa numeričkim modelima* i to snabdevajući modele potrebnim podacima kao i preuzimanjem rezultata simulacije radi njihovog čuvanja i prikaza.

U okviru hidroinformatičkog modela, *razvijene su sledeće originalne i samostalne funkcije* (moduli):

- Preuzimanje i snimanje podataka iz različitih korisničkih baza podataka i njihova konverzija u standard korišćen u razvijenom informatičkom modulu, uz kreiranje metapodataka.
- Rotacija i translacija slivnog područja sa kriterijumom minimalna površina opisanog pravougaonika oko sliva i prevođenjem koordinata objekata iz korisničke baze, koji su u nacionalnom (ili nekom drugom) koordinatnom sistemu, na lokalne koordinate.
- Rasterizacija tačaka, linija i površina: prilikom rasterizacije kanalizacione mreže, kao i podslivova rasterizuje se i ukupna granica sliva, a prilikom rasterizacije slojeva sa objektima na terenu, koriste se metapodaci o hijerarhijskom redosledu.
- Analiza lokalnih depresija na terenu: otkrivanje depresija, delineacija depre-



sija, proračun najniže tačke, tačke preлива, preklapanje depresija, kriva zapremine i kriva površine.

- Određivanje nagiba i pravca maksimalnog nagiba terena za digitalni model terena, za teren nakon visinske korekcije kao i za teren nakon uklanjanja malih ili svih depresija.
- Analiza površinskog toka vode, povezanost depresija, određivanje površinske mreže kanala.
- Vektorizacija i topološko uređivanje mreže kanala.
- Delineacija sliva na podslivove, geometrijski ili prema digitalnom modelu terena. Unošenje raznih korekcija u proces delineacije.
- Vektorizacija granica podslivova i njihovo topološko uređivanje, generalizacija granice podsliva.
- Reklasifikacija sloja podslivova primenom kriterijuma minimalnog broja boja, priprema za vizualizaciju podslivova.
- Proračun parametara za odabrani simulacioni program: površine podslivova, njihov oblik, nagib, zastupljenost različitih tipova površina i količina upotrebljenih voda. Konverzija podataka u format prema standardima odgovarajućih simulacionih programa.

Mada je najveći deo ove disertacije posvećen pripremi podataka za postojeće numeričke modele, na osnovu do sada razvijenih i prikazanih alata, u radu se daje predlog za *poboljšanje aktuelnih fizički baziranih matematičkih modela*. Poboljšanje se odnosi na kvalitetniji proračun procesa plavljenja urbanog terena i tečenja vode po terenu, kada postojeća kanalizaciona mreža nije u stanju da primi svu vodu, pa se površinski tok aktivno uključuje u proces oticanja vode. Takav režim oticanja vode je nazvan *dvojno odvodnjavanje* i karakteriše ga puna interakcija površinske i podzemne komponente toka u delovima sliva gde je došlo do potapanja. U radu je dat *koncept predloženog rešenja* dvojnog odvodnjavanja. Detaljno su obrađeni *potrebni parametri* koji se mogu odrediti iz već uspostavljenog informatičkog modela. Dat je i *način programske implementacije* modela kojom se kompleksan problem svodi na upotrebljiv nivo.

Razvijeni informatički model, povezan sa pobrojanim računskim modelima, je u svim svojim fazama razvoja *testiran i verifikovan na realnim projektantskim primerima*. Zaključak je da model znatno skraćuje vreme od početka rada na projektu do dobijanja prvih rezultata simulacije oticaja, uz smanjenje subjektivizacije i omogućavanje realnijeg sagledavanja ponašanja sliva u uslovima promeljivih parametara. Uvođenjem visokog stepena automatizacije u pripremi parametara za modele, omogućeno je projektantima da izuče osetljivost sliva na kvalitet ulaznih podataka, kao i na moguće scenarije predloženih hidrotehničkih rešenja u različitim uslovima buduće

urbanizacije sliva. Pokazalo se, međutim, da *hidroinformatički model ne može da nadomesti nedostajuće ili loše podatke* (što se i očekivalo). Primenom modela, težište je prebačeno sa faze “puštanja” numeričkog modela na fazu prikupljanja kvalitetnih podataka.

U razvoju informatičkog modela, problemu vizualizacije nije posvećena dužna pažnja (osim razvijenog modula za bojenje podslivova). To je urađeno svesno, ostavljajući standardnim GIS i drugim grafičkim paketima posao prezentacije rezultata proračuna. Odluka autora disertacije je bila da se svo raspoloživo vreme posveti razvoju modula koji nisu na “jelovniku” standardnih GIS paketa i koji su specifično prilagođeni problemima urbanih slivova. S obzirom na kompatibilnost razvijenog informatičkog modela sa mnogim GIS i CAD sistemima, korisnici će sami moći da odaberu programe za prezentaciju koji im najviše odgovaraju.

## 9.2 Pravci daljeg razvoja prikazanog hidroinformatičkog modela

U ovom radu su izložena, i do različitog stepena obrađena, dva različita pristupa primene hidroinformatičkih modela u oblasti odvodnjavanja urbanih površina. Prvi pristup je da se u potpunosti zadrže postojeći numerički fizički bazirani modeli otičanja i da se, koristeći sve raspoložive informatičke tehnologije, unapredi procedura pripreme podataka. Ovaj pristup je detaljno obrađen i razvijeni su svi potrebni moduli kako bi se dobila zaokružena upotrebljiva aplikacija. Dalji razvoj u ovoj oblasti u velikoj meri zavisi od razvoja pratećih tehnologija:

- računarskih, čime će se dozvoliti *primena veće rezolucije* u svim analizama, a samim tim i povećanje tačnosti prostornih analiza;
- grafičkih, posebno u oblasti trodimenzionalne virtuelne stvarnosti, koja može po prvi put *obezbediti projektantu stvarni uvid u prostorne podatke* smeštene u sve većim bazama;
- daljinske detekcije koja treba da obezbedi *ekonomične i kvalitetne podatke* sa rezolucijom prikladnom urbanoj sredini, a to se pre svega odnosi na visinsku predstavu terena, DMT;
- razvoja nacionalnih digitalnih baza podataka, čime će se problem unosa sirovih podataka prebaciti na oblast *razvoja kvalitetnih interfejs programa* za komunikaciju sa tim bazama.

Jači računarski resursi bi mogli da obezbede, u određenom trenutku, potiskivanje primene svih elemenata proračuna u grid sistemu. U ovom radu su određene analize rađene zbog jednostavnosti i brzine proračuna u rasterskom grid sistemu, tako da je stalno prisutan problem konverzije iz vektorskog u rasterski sistem i obrnuto. Već sada postoji dosta radova koji koriste vektorski TIN sistem za određivanje

površinske mreže kanala, mada su te procedure dosta složenije od rasterskih. Ovde treba istaći da se kompletnim prelaskom u vektorski sistem ne očekuje povećanje tačnosti, jer se i vektorske procedure baziraju na mreži izohipsa, koje su rezultat prostorne interpolacije TIN modela, isto kao i grid sistem. *Osnova za tačnije analize su kvalitetniji DMT i sloj namene površine terena.*

Drugi pristup primeni hidroinformatičkog modela se ogleda u *razvoju novog numeričkog modela oticanja*. U ovom radu je dat prikaz jednog od pristupa: polazi se od postojećih modela, koji su provereno upotrebljivi u fazama simulacije kada nema izlivanja na površini terena, a od trenutka pojave površinske komponente toka, predlaže se novi model dvojnog odvodnjavanja. U tom modelu uspostavlja se puna interakcija između površinske i podzemne komponente toka. Za punu implementaciju predloženog modela, potrebno je uraditi sledeće:

- razraditi predloženi *koncept interakcije dve komponente toka*;
- *dopuniti već razvijene module* iz ovog rada, kako bi se obezbedila informatička podrška;
- *razviti aplikaciju* koja će biti veoma složena, korišćenjem predloženog multiagent pristupa;
- i, možda najvažnije, *obezbediti dovoljno kvalitetnih eksperimentalnih podataka* na laboratorijskim i terenskim instalacijama, kako bi se obezbedilo tariranje novog modela.

Naravno, predloženi model dvojnog odvodnjavanja nije jedina mogućnost kvalitetnije integracije numeričkih i informatičkih modela. Pristup primenjen kod hidrološkog modela SHE bi mogao, određenim konceptnim izmenama i uz očekivani razvoj računске tehnologije, da se primeni i na urbani sliv. Jedan od pravaca kojim bi trebalo težiti je primena quad-tree strukture grida, čime se efikasno smanjuje redundansa u podacima, uz mogućnost unošenja urbanih struktura koje određuju pravce površinskog toka vode.

# Bibliografija

- [1] Abbott, M.B. (1993). The electronic encapsulation of knowledge in hydraulics, hydrology and water resources. *Advances in Water Resources*. Knjiga: 16, strane: 21–39.
- [2] Abbott, M.B. (1994). The theory of the hydrologic model, or: the struggle for the soul of hydrology. *NATO Advance Research Workshop (ARW) on Hydroinformatics*. Castle de Vanenburg, Putten, The Netherlands.
- [3] Abbott, M.B. (1994). The impact of the knowledge revolution in the water industries. *NATO Advance Research Workshop (ARW) on Hydroinformatics*. Castle de Vanenburg, Putten, The Netherlands.
- [4] Arsov, R. i A. Dimov. (1994). Assessment of Urban Runoff Water Quality by GIS Based Modelling. *The European Conference and Exhibition on Remote Sensing and GIS in Urban Waters, UDT'94*. Editori: Č. Maksimović, J. Elgy i V. Dragalov. Moscow.
- [5] Band, L.E. (1986). Topographic Partition of Watersheds with Digital Elevation Models. *Water Resources Research*. Knjiga: 22, broj: 1, januar, strane: 15–24.
- [6] Blagojević, B., J. Elgy, Z. Chen i Č. Maksimović. (1994). Airborne Videography as Data Source for an Urban Hydrological Model. *The European Conference and Exhibition on Remote Sensing and GIS in Urban Waters, UDT'94*. Editori: Č. Maksimović, J. Elgy i V. Dragalov. Moscow.
- [7] Bower, S.T. i C.M. Newton. (1993). Boundary Problem for Triangulated Irregular Networks. *Cartography and Geographic Information Systems*. Knjiga: 20, broj: 4, strane: 244–250.
- [8] Burrough, P.A. (1993). Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment. Clarendon press, Oxford.
- [9] Collins, S.H. i G.C. Moon. (1981). Algorithms for Dense Digital Terrain Models. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. Knjiga: 47, broj: 1, januar, strane: 71–76.

- [10] Cuhadaroglu, M.S., D.R. Maidment i L.J. Hayes. (1992). Integrating a Finite Element Model for Stormwater Prediction with Geographic Information System. *Computational Methods in Water Resources IX, Vol. 2: Mathematical Modeling in Water Resources*. Editori: T.F. Russel i ostali. Computational Mechanics Publications, Southampton, Boston and Elsevier Applied Science, London. Strane: 745–752.
- [11] Cvijetinović, Ž. (1995). Konceptualno rešenje postupka prikupljanja i obrade digitalnih podataka visinske predstave terena u okviru državnog premera. Magistrski rad. Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu.
- [12] Delhomme, J. P. (1978). Kriging in the Hydrosience. *Advances in Water Resources*. Knjiga: 1, broj: 5, strane: 251–266.
- [13] Despotović, J, A. Šotić, J. Petrović, S. Đorđević, D. Prodanović i A. Đukić. (1997/98). Idejni projekat odvoda kišnih i upotrebljenih voda sa sliva Kumodražskog potoka. Knjiga 1: Postojeće stanje–verifikacija i ocena; Knjiga 2: Idejni projekat odvoda kišnih i upotrebljenih voda sa sliva
- [14] Dimov, A. i D. Prodanović. (1993). Calculating Statistics of a Subcatchment required for BEMUS and WALLRUS. *Workshop on Development of Tools for GIS in Urban Drainage*. University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy; Dept. of Water Supply and Sewerage, Sofia, Bulgaria.
- [15] Doe, W.W. i B. Saghafian. (1993). Spatial and Temporal Effects of Army Maneuvers on Watershed Response: The Integration of GRASS and Two-dimensional Hydrologic Model. *Seventh Annual GRASS Users Conference*. Editor: G.S. Waggoner. US Department of the Interior.
- [16] Dyer, C.R. i A. Rosenfeld. (1979). Thinning Algorithms for Gray-Scale Pictures. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. Knjiga: PAMI-1, broj: 1, januar, strane: 88–89.
- [17] Đokic, D. i D.R. Maidment. (1991). Terrain Analysis for Urban Stormwater Modelling. *Hydrological Processes*. Knjiga: 5, strane: 115–124.
- [18] Đokic, D. i D.R. Maidment. (1993). Application of GIS Network Routines for Water Flow and Transport. *Journal of Water Resources Planning and Management*. Knjiga: 119, broj: 2, mart.
- [19] Đorđević, S., M. Ivetić, Č. Maksimović i A. Rajčević. (1992). Modelling of surcharged flow in storm sewers with water exchange through the inlet openings. *Int. Conf. on Interaction of Computational Methods and Measurements in Hydraulics and Hydrology, HYDROCOMP '92*. Editori: J. Gayer, Ö. Starosolszky i Č. Maksimović. Budapest.

- [20] Đorđević, S. (1992). A Review of Input Data for Urban Drainage Models. *Workshop on Development of Tools for GIS in Urban Drainage*. Beograd.
- [21] Đorđević, S. i D. Prodanović. (1995). Hidraulička analiza kišne kanalizacije Kladova.
- [22] Đorđević, S., D. Prodanović, J. Despotović, J. Petrović i A. Šotić. (1998). A Preliminary Design of Kumodraž Urban Drainage System – First Phase. *Hydroinformatics '98*. Editor: V. Babović. Copenhagen.
- [23] Đorđević, S., D. Prodanović i Č. Maksimović. (1998). An Approach to Simulation of Dual Drainage. *Fourth International Conference on Developments in Urban Drainage Modelling, UDM'98*. Editori: D. Butler i Č. Maksimović. London.
- [24] Eastman, J.R. (1995). Idrisi for Windows, User's Guide. Clark University, USA.
- [25] Elgy, J. i D. Prodanović. (1992). Technical Problems of Data Acquisition. Materijal za kurs *Application of GIS in Urban Drainage*. TEMPUS projekt JEP 2424-91/1. Beograd.
- [26] Elgy, J., Č. Maksimović i D. Prodanović. (1993). Using Geographic Information Systems for Urban Hydrology. *International Conference on Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources, HydroGIS 93*. Editori: K. Kovar and H.P. Nachtnebel. Vienna, Austria.
- [27] Elgy, J., Č. Maksimović i D. Prodanović. (1993). Matching Standard GIS Packages with Urban Storm Drainage Simulation Software. *6th International Conference on Urban Storm Drainage, ICUSD*. Niagara Falls.
- [28] Fankhauser, R. (1994). Determination of Impervious Areas for Rainfall-Runoff Models. *The European Conference and Exhibition on Remote Sensing and GIS in Urban Waters, UDT'94*. Editori: Č. Maksimović, J. Elgy i V. Dragalov. Moscow.
- [29] Fisher, T.R. (1993). Integrated three-dimensional geoscientific information system (GSIS) technologies for groundwater and contaminant modelling. *International Conference on Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources, HydroGIS 93*. Editori: K. Kovar i H.P. Nachtnebel. Vienna, Austria.
- [30] Fuchs, L. i C. Scheffer. (1993). HYSTEM-EXTRAN Vers. V – Model Description and Documentation. Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie, Hannover.

- [31] Garg, N.K. i D.J. Sen. (1994). Determination of Watershed Features for Surface Runoff Models. *Journal of Hydraulic Engineering*. Knjiga: 120, broj: 4, april, strane: 427–447.
- [32] Goodchild, M.F. (1993). The state of GIS for Environmental Problem-Solving. *Environmental Modelling with GIS*. Editori: M.F. Goodchild, L.T. Steyaert i B.O. Parks. Oxford University Press. Strane: 8–15.
- [33] Grayson, R.B., I.D. Moore i T.A. McMahon. (1992). Physically Based Hydrologic Modeling, 1. A Terrain-based Model for Investigative Purposes. *Water Resources Research*. Knjiga: 28, broj: 10, oktobar, strane: 2639–2658.
- [34] Horton, R.E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; Hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bull. Geol. Soc. Am.*. Knjiga 56, strane: 275-370.
- [35] Ionescu, C. (1993). Hydrographic basin model simulation based on DTM. *International Conference on Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources, HydroGIS 93*. Volume of Poster Papers. Editor: G. Reichel. Vienna, Austria.
- [36] Jenson, S.K. i J.O. Dominigue. (1988). Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. Knjiga: 54, broj: 11, novembar, strane: 1593–1600.
- [37] Jenson, S.K. (1991). Application of Hydrologic Information Automatically Extracted from Digital Elevation Models. *Hydrological Processes*. Knjiga: 5, strane: 31–44.
- [38] Jones, N.L., S.G. Wright i D.R. Maidment. (1990). Watershed Delineation with Triangle-Based Terrain Models. *Journal of Hydraulic Engineering*. Knjiga: 116, broj: 10, oktobar, strane: 1232–1251.
- [39] Jonoski, A. i M.B. Abbott. (1998). Network distributed decision-support systems as multi-agent constructs. *Hydroinformatics '98*. Editor: V. Babović. Copenhagen.
- [40] Kao, J-J. (1996). Neural Net for Determining DEM-Based Model Drainage Pattern. *ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. Knjiga: 122, broj: 2, mart/april, strane: 112–121.
- [41] Keckler, D. (1994). Manual for Surfer ver. 5.01. Golden Software, Colorado, USA.
- [42] Kernighan, B.W. i D.M. Ritchie. (1988). The ANSI C Programming Language. Prentice Hall, New Jersey.

- [43] Kinouchi, T., M. Kuriki i Y. Tanaka. (1995). Prediction of Local Inundation in an Urbanized Watershed. *2nd International Conference on Innovative Technologies in Urban Storm Drainage, NOVATECH 95*. Lyon, France. Pages: 411–418.
- [44] Lazić, R., M. Ivetić i D. Pokrajac. (1998). Vizualizacija u hidrotehnici, *12-to savetovanje jugoslovenskog društva za hidraulička istraživanja JDHI*. Subotica.
- [45] Lea, N.J. (1991). An Aspect Driven Kinematic Routing Algorithm. *Workshop on the hydraulics and erosion mechanics of overland flow*. University of Keele, Staffordshire, England.
- [46] Lei, J.H. (1996). Uncertainty analysis of urban rainfall-runoff modelling. PhD dissertation. Faculty of Civil Engineering, Norwegian University of Science and Technology. Trondheim, Norway.
- [47] Lei, J.H. i W. Schilling. (1998). Systems modeling revisited – Verification, confirmation and the role of uncertainty analysis. *Hydroinformatics '98*. Editor: V. Babović. Copenhagen.
- [48] Maidment, D.R. (1996). GIS and Hydrologic Modeling - an Assessment of Progress. *Third International Conference on GIS and Environmental Modeling*. Santa Fe, New Mexico.
- [49] Maksimović, Č. i M. Radojković. (1986). *Urban Drainage Catchments, Selected Worldwide Rainfall-Runoff Data from Experimental Catchments*. Pergamon press, Oxford.
- [50] Maksimović, Č. i D. Prodanović. (1993). Application of GIS in Data Preparation for Urban Storm Drainage Projects, Phase 1: Initial Activities and Case Study for a Catchment in the City of Dresden. Interni izveštaj za ITWH (Institut für Technisch-Wissenschaftliche Hydrologie), Hannover.
- [51] Maksimović, Č., J. Elgy, L. Fuchs, D. Prodanović i S. Đorđević. (1994). Gluing Routines for Matching Standard GIS Packages with Simulation and Design Models for Water Projects. *The European Conference and Exhibition on Remote Sensing and GIS in Urban Waters, UDT'94*. Editori: C. Maksimović and J. Elgy and V. Dragalov. Moscow.
- [52] Maksimović, Č., D. Prodanović, J. Elgy i L. Fuchs. (1994). GIS (or GIM) in Water Projects – Tools or Toys. *International conference on Hydroinformatics*. Delft.
- [53] Maksimović, Č., L. Fuchs, D. Prodanović i J. Elgy. (1995). Full Scale Application of Standard GIS Packages with Urban Storm Drainage Simulation Software. *Kurier Abwaserung, Germany*. Knjiga: 1, strane: 3–13.



- [54] Maksimović, Č., S. Đorđević i D. Prodanović. (1995). GIS-Supported Physically Based Rainfall-Runoff Model for Urban Drainage Projects. *Runoff Computations for Water Projects*. St. Petersburg.
- [55] Maksimović, Č., D. Prodanović i S. Đorđević. (1996). GIS kao jedan od uslova za analizu, projektovanje i upravljanje radom hidrotehničkih infrastrukturnih sistema. *GIS – Stanje i perspektive, YUGIS*. Editori: B. Jovanović i D. Mihajlović. Beograd.
- [56] Mark, O., T. Kalken, K. Rabbi i J. Kjelds. (1997). A MOUSE GIS Study of the Drainage in Dhaka City. *Danish Hydraulic Institute, Denmark*. Interna publikacija DHI instituta.
- [57] Marks, D., J. Dozier i J. Frew. (1984). Automated Basin Delineation from Digital Elevation Data. *Geo-Processing*. Knjiga: 2, strane: 299–311.
- [58] Meijerink, A., H. de Brouwer, C. Mannaerts i C. Valenzuela (1994). Introduction to the use of geographic information systems for practical hydrology. The International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), The Netherlands.
- [59] Meyer, S.P., T.H. Salem i J.W. Labadie. (1993). Geographic Information Systems in Urban Storm-Water Management. *Journal of Water Resources Planning and Management*. Knjiga: 119, broj: 2, april.
- [60] Millard, K. (1998). ENVALDAT – Customer Valuation of Environment Data. *Hydroinformatics '98*. Editor: V. Babović. Copenhagen.
- [61] Milutinović, R., M. Pakai, E. Pantelić, D. Kesić, O. Maletin, Č. Maksimović, S. Đorđević, D. Prodanović, J. Despotović i M. Drašković. (1996). Idejni projekat kišne kanalizacije slivova Klise, Malog Beograda, Velikog Rita i Severa IV.
- [62] Moore, I.D. i R.B. Grayson. (1991). Terrain-Based Catchment Partitioning and Runoff Prediction Using Vector Elevation Data. *Water Resources Research*. Knjiga: 27, broj: 6, jun, strane: 1177–1191.
- [63] Moore, I.D., A. K. Turner, J.P. Wilson, S.K. Jenson i L.E. Band. (1991). GIS and Land-Surface-Subsurface Process Modeling. *Montana Agricultural Experiment Station, report no. J2713*. Strane: 196–230.
- [64] Nelson, E.J., N.L. Jones i A.W. Miller. (1994). Algorithm for Precise Drainage-Basin Delineation. *Journal of Hydraulic Engineering*. Knjiga: 120, broj: 3, mart, strane: 298–312.
- [65] Prodanović, D. (1992). Automatic Delineation of Subcatchments within Urban Catchments, example of Miljakovac catchment. Materijal za kurs *Application of GIS in Urban Drainage*. TEMPUS projekt JEP 2424-91/1. Beograd.

- [66] Prodanović, D. (1993). Catchment Parameters from DEM and GIS. Materijal za kurs *GIS for Water Engineering*. Aston University, UK.
- [67] Prodanović, D. (1993). Catchment Delineation and Case Study of Dresden. Materijal za kurs *GIS for Water Engineering*. Aston University, UK.
- [68] Prodanović, D. (1993). Subcatchment Delineation. *GIS for Water Engineers, Manual*. Editor: Lothar Fuchs.
- [69] Prodanović, D. (1994). Catchment Parameters from DEM and GIS. Materijal za kurs *Anwendung Geografischer Informationssysteme in der Stadtentwässerung*. COMETT-Kurs 4991 cb. Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie, Hannover.
- [70] Prodanović, D. (1994). AutoCAD Interface for GIS in Urban Water Modelling. Materijal za kurs *Anwendung Geografischer Informationssysteme in der Stadtentwässerung*. COMETT-Kurs 4991 cb. Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie, Hannover.
- [71] Prodanović, D., S. Đorđević i Č. Maksimović. (1994). Interfacing AutoCAD Updated by GIS Functions with Simulation Models for Urban Infrastructure Projects. *The European Conference and Exhibition on Remote Sensing and GIS in Urban Waters, UDT'94*. Editori: C. Maksimović and J. Elgy and V. Dragalov. Moscow.
- [72] Prodanović, D., S. Đorđević i Č. Maksimović. (1994). Primena AutoCAD-a proširenog sa GIS funkcijama u simulacionim modelima oticanja sa urbanih slivova. *11-to savetovanje jugoslovenskog društva za hidraulička istraživanja JDHI*. Beograd.
- [73] Prodanović, D. (1997). Data verification, correction, data quality, errors. Materijal za kurs *Sistemas de información geográfica (GIS) aplicados a redes hidráulicas*. Curso M13/1997. Grupo Mecánica de Fluidos, Universidad politécnica de Valencia, Spain.
- [74] Prodanović, D. (1997). Digital elevation models. Materijal za kurs *Sistemas de información geográfica (GIS) aplicados a redes hidráulicas*. Curso M13/1997. Grupo Mecánica de Fluidos, Universidad politécnica de Valencia, Spain.
- [75] Prodanović, D. (1997). Introduction to geographical databses. Materijal za kurs *Sistemas de información geográfica (GIS) aplicados a redes hidráulicas*. Curso M13/1997. Grupo Mecánica de Fluidos, Universidad politécnica de Valencia, Spain.
- [76] Prodanović, D. (1997). Development and maintenance of database for urban infrastructures. Materijal za kurs *Sistemas de información geográfica (GIS)*

- aplicados a redes hidráulicas*. Curso M13/1997. Grupo Mecánica de Fluidos, Universidad politécnica de Valencia, Spain.
- [77] Prodanović, D. (1997). Database matching with simulation models. Materijal za kurs *Sistemas de información geográfica (GIS) aplicados a redes hidráulicas*. Curso M13/1997. Grupo Mecánica de Fluidos, Universidad politécnica de Valencia, Spain.
- [78] Prodanović, D. (1997). Data structures for physically based models. Materijal za kurs *Sistemas de información geográfica (GIS) aplicados a redes hidráulicas*. Curso M13/1997. Grupo Mecánica de Fluidos, Universidad politécnica de Valencia, Spain.
- [79] Prodanović, D. (1997). Digital elevation model, network, structures, gluing routines. Materijal za kurs *Sistemas de información geográfica (GIS) aplicados a redes hidráulicas*. Curso M13/1997. Grupo Mecánica de Fluidos, Universidad politécnica de Valencia, Spain.
- [80] Prodanović, D. (1997). Storm drainage systems of Dresden and Novi Sad. Materijal za kurs *Sistemas de información geográfica (GIS) aplicados a redes hidráulicas*. Curso M13/1997. Grupo Mecánica de Fluidos, Universidad politécnica de Valencia, Spain.
- [81] Prodanović, D., S. Đorđević i Č. Maksimović. (1998). GIS Assisted Model for Dual Drainage Simulation. *Hydroinformatics '98*. Editor: V. Babović. Copenhagen.
- [82] Pryn, K., S. Vanacek i P. Vasek. (1998). Data Processing and Manipulation Tools used for Urban Drainage Systems. *Hydroinformatics '98*. Editor: V. Babović. Copenhagen.
- [83] Radojković, M. i Č. Maksimović. (1984). Development, testing and application of Belgrade urban drainage model. *Third Int. Conf. on Urban Storm Drainage*. Editori: P. Balmer, P.A. Malmqvist i A. Sjöberg. Göteborg, knjiga: 4, strana: 1431–1443.
- [84] Ragan, R.M. i T.J. Jackson. (1975). Use of Satellite Data in Urban Hydrologic Models. *Journal of the Hydraulics Division*. Knjiga: 101, broj: HY12, decembar, strane: 1469–1475.
- [85] Rieger, W. (1993). Hydrological Terrain Features Derived from a Pyramid Raster Structures. *International Conference on Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources, HydroGIS 93*. Editori: K. Kovar i H.P. Nachtnebel. Vienna, Austria.

- [86] Rodriguez, F., H. Andrieu, J.D. Creutin i G. Raimbault. (1998). Relevance of Geographic Information Systems for Urban Hydrological Analysis. *Fourth International Conference on Developments in Urban Drainage Modelling, UDM'98*. Editori: D. Butler i Č. Maksimović. London.
- [87] Schmitz, G. H., E. M. Kiefer i M. Vauclin (1990). Modern Kriging and Classical Gaussian Techniques - Do they Necessarily Yield Identical Results. *Advances in Water Resources*. Knjiga: 13, broj: 2, strane: 90–97.
- [88] Schumann, A.H. (1993). Development of conceptual semi-distributed hydrological models and estimation of their parameters with the aid of GIS. *International Conference on Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources, HydroGIS 93*. Editori: K. Kovar and H.P. Nachtnebel. Vienna, Austria.
- [89] Sircar, J.K., R.M. Ragan, E.T. Engman i R.A. Fink. (1991). A GIS Based Geomorphic Approach for the Digital Computation of Time-Area Curves. *Remote Sensing Applications*.
- [90] Smith, M.B i M. Brilly. (1992). Automated Grid Element Ordering for GIS-Based Overland Flow Modeling. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. Knjiga: 58, broj: 5, maj, strane: 579–585.
- [91] Smith, M.B. (1993). A GIS-Based Distributed Parameter Hydrologic Model for Urban Areas. *Hydrological Processes*. Knjiga: 7, strane: 45–61.
- [92] Spoenemann, P., T. Beeneken, L. Fuchs, D. Prodanović i S. Schneider. (1996). Criteria for Geographic Information Systems used in Urban Drainage. *7th International Conference on Urban Storm Drainage, ICUSD*. Hannover.
- [93] Stojanović, D., M. Petković i L. Stoimenov. (1996). Upravljanje verzijama u prostornim bazama podataka. *GIS Stanje i perspektive, YUGIS*. Editori: B. Jovanović i D. Mihajlović. Beograd.
- [94] Strahler, A.N. (1964). Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks, section 4-II. *Handbook of applied hydrology*. Editor: V.T. Chow. New York.
- [95] Tarboton, D.G., R.L. Bras i I. Rodriguez-Iturbe. (1991). On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data. *Hydrological Processes*. Knjiga: 5, strane: 81–100.
- [96] Ullah, W. i W.T. Dickinson. (1979). Quantitative Description of Depression Storage using a Digital Surface Model, I. Determination of Depression Storage. *Journal of Hydrology*. Knjiga: 42, strane: 63–75.

- [97] Ullah, W. i W.T. Dickinson. (1979). Quantitative Description of Depression Storage using a Digital Surface Model, II. Characteristics of Surface Depressions. *Journal of Hydrology*. Knjiga: 42, strane: 77–90.
- [98] Vieux, B.E. (1991). Geographic Information Systems and Non-Point Source Water Quality and Quantity Modelling. *Hydrological Processes*. Knjiga: 5, strane: 101–113.
- [99] Yang, D., S. Herath i K. Musiake. (1997). Analysis of Geomorphologic Properties Extracted from DEMs for Hydrologic Modeling. *41st Japanese conference on Hydraulics*. Pages: 105–110.
- [100] Yang, D., S. Herath i K. Musiake. (1997). Analysis and Stability of River Network Geomorphological Parameters using DEM data of Japanese Catchments. *27th IAHR Congress*.
- [101] — (1997). GIPS – Geografisches Informations- und Planungssystem für die Stadtentwässerung Reference Manual. ITWH, Hannover.
- [102] — (1994). MOUSE Reference Manual, Version 3.20. Danish Hydraulic Institute, Hørsholm.