

Доц. др **Бранислав Божић**, дипл. инж.*

Доц. др **Слободан Ашанин**, дипл. инж.

ПРИМЕНА КИНЕМАТИЧКЕ МЕТОДЕ ГПС У ГЕОДЕТСКИМ РАДОВИМА

РЕЗИМЕ

У раду су приказани неки стандарди примене кинематичке GPS методе и резултати анализе могућности њене примене у геодетским радовима. Резултати GPS мерења су упоређени са резултатима терестричких мерења, на основу чега је констатована сагласност добијених оцена по хоризонталном положају и висини боља од 3 cm.

Кључне речи: GPS, инжењерски премер, анализа тачности.

ABSTRACT

This article is explaining some standards of using GPS kinematic methods in engineering surveys. Results of GPS measurements were sufficiently accurate compared with data of terrestrial measurement.

Key words: GPS, engineering survey, accuracy analysis.

1. УВОД

Глобални систем позиционирања у данашње време представља водећу технологију у праћењу померања тачака високе резолуције промена. Области примене GPS укључују праћење померања Земљине коре, праћење свих врста објеката као и динамике њихове изградње. У области геодетског и инжењерског премера, дефинисано је неколико техника GPS мерења. У зависности од тачности премера врши се и избор адекватне методе. У овом раду пажња је посвећена кинематичкој методи GPS позиционирања. Посебна је истакнут значај стандардизације у овој области и приказани су неки постојећи стандарди у свету који дефинишу ову област. Показано је како се из анализе теренских мерења, користећи статистичке показатеље, добија тачност и поузданост мерења.

Ради илустрације наведене тврдње, извршен је експеримент у оквиру кога је анализирана тачност резултата GPS кинематичких мерења у односу на класичне конвенционалне методе мерења. Резултати анализе показују да се ова метода премера може веома ефикасно примењивати у напред наведеним геодетским пословима.

2. КИНЕМАТИЧКА МЕТОДА GPS ПОЗИЦИОНИРАЊА

2.1. Основне карактеристике GPS кинематичких метода

Постоје три фундаменталне технике GPS мерења, и то:

- техника апсолутног позиционирања,
- техника диференцијалног позиционирања (кодна мерења – DGPS), и
- техника релативног позиционирања (фазна мерења).

У овом раду пажња ће бити усмерена на релативне технике позиционирања, при чему ће се посебно истаћи кинематичка (интермитентна, stop-and-go) метода и кинематика у реалном времену (RTK).

Кинематичка метода GPS подразумева одређивање положаја покретног пријемника у односу на референтни који се налази на познатој – базној станици. На почетку мерења неопходно је извршити *иницијализацију* чиме се фазне неодређености решавају са минималном количином мерења, на основу *познатог вектора* - базе линије. Применом алгорита са двоструким фазним разликама у даљој обради опажања неодређености су фиксирани. Одржавање решења неодређености врши се континуираним праћењем најмање четири сателита. Уколико је број видљивих

* Институт за геодезију Грађевинског факултета Универзитета у Београду

сателита мањи од 4, иницијализација се мора поновити. Ако пријемник поседује **on-the-fly** опцију, иницијализација се извршава у покрету. Након иницијализације, покретним пријемником изводи се снимање детаља. У току мерења води се рачуна о условима мерења, а препоручује се да број сателита не буде мањи од 5 (да би се спречиле поновне и учестале иницијализације). Што се тиче брзине регистрације података (епоха; *epoch recording rate*) обично се бирају вредности од 1 до 15 секунди, а минимално време задржавања на детаљној тачки износи од 5 до 10 епоха. При примени ове методе посебну пажњу треба обратити на присуство објеката од којих би се сигнали могли рефлектовати јер је овај извор грешака један од доминантних. Дакле, на основу основних карактеристика кинематичке методе GPS мерења могу се извести њене предности и недостаци.

Основне предности кинематичке методе у односу на конвенционалне методе снимања јесу: *могућност рада само једног оператера, није нужна видљивост између базе и покретног пријемника, рад у јединственом координатном систему, истовремено одређивање положаја и висине детаљних тачака, једноставна обрада мерења без сувишних помоћних образаца и брз, ефикасан и економичан рад на терену.*

Основни недостаци примене GPS технологије огледају се у: *немогућности рада у затвореном и маскираном терену, осетљивости на чест губитак сигнала, неадекватној хомогености постојеће државне мреже и непознавању облика и положаја геоида на територији СЦГ.*

2.2. Неки стандарди у области примене GPS у свету

Стандардима се дефинише минимална тачност коју је неопходно остварити да би се постигли унапред дефинисани захтеви. Стандарде увек прате спецификације које дефинишу теренске процедуре и методе мерења чијом применом се задовољава постављени стандард. Стандардизација у области GPS технологије најдаље је, природно, одмакла у САД па је зато и логично те стандарде корис-

тити као узор. Неки други, постојећи стандарди значајно су везани за америчке.

Први стандард који представља путоказ у примени GPS донет је 1984. године од стране **Савезног комитета за контролу геодетских радова** (у даљем тексту **FGCC** – Federal Geodetic Control Committee) под називом *Стандарди и спецификације у реализацији геодетских контролних мрежа*. Према овом стандарду положајна тачност мреже заснована је на стандардима тачности дужина и дефинише се односом релативне грешке хоризонталног положаја тачке и хоризонталне дужине. Највиши ниво тачности, у то време дефинисан, износио је 1:100 000. У погледу висина, стандард је био заснован на тачности висинских разлика и дефинише опсег од **2.0 - 0.05 mm/km**. Развој GPS технологије утицао је да се данас рутински може постићи тачност реда **1 cm + 1-2 mm/km**, а уз примену посебних процедура чак и **0.3 cm + 0.01 mm/km**, што је око 1000 пута боље од захтева из 1984. С обзиром на ту околност, **FGCC** 1989. доноси нови стандард под називом *Стандарди геометријске геодетске тачности и спецификације за примену технике GPS релативног позиционирања*. Овим стандардом веома су прецизно и свеобухватно дефинисани нивои тачности и описана теренска процедура мерења као и начин обраде мерења. Нешто касније, 1994. године подкомитет **FGCC** допуњује стандарде из 1989. и даје нову димензију у посматрању основних појмова о GPS. Наиме, уводи се појам **просторне тачности** која се дели на **хоризонталну** и **вертикалну**. Даље, класификација GPS премера врши се према мерама **локалне тачности**¹ и **тачности мреже**². На крају, у овом низу, али не на крају и по значају, свакако долази и стандард донет од стране аустралијског *Међувладиног саветодавног ко-*

¹ Мере локалне тачности изводе се на основу статистика добијених изравнањем мреже по моделу посредних мерења и минималним бројем датих услова.

² Мере тачности мреже изводе се на основу статистика добијених изравнањем мреже по моделу посредних мерења када је број датих услова већи од неопходног.

митета за геодезију и картографију који је новембра 2000. године (ICSM, 2000) донео стандард у области контролних мрежа (Standards and Practices for Control Surveys – SP1). Овај стандард је посебно важно истаћи јер у великој мери садржи критеријуме тачности и услове при мерењу кинематичким методама GPS мерења које су по својој тачности достигле високе захтеве иманентне контролним мрежама.

Без обзира на тип мерења, квалитет геодетских радова постиже се (CGCC, 1996):

- елиминацијом или редукицијом познатих извора систематских утицаја,
- планирањем сувишних мерења ради документовања тврдње о тачности,
- адекватном анализом и обрадом података и
- верификацијом постигнутих резултата на основу адекватно припремљене техничке документације.

Постојећи стандарди (на пример, ICSM, 2000 или FGCS, 1994) прописују примену кинематичке GPS методе у значајном броју геодетских радова чак и при успостављању математичке основе. На пример, према (ICSM, 2000), класификација тачности премера врши се на основу статистичких показатеља: 1) из изравнања (по методи најмањих квадрата) и 2) из анализе поновљених мерења. У оквиру прве издвајају се два случаја, и то: први – изравнањем са минималним бројем датих услова и други – када је број датих услова већи од неопходног броја. У оба случаја као критеријуми квалитета постигнутих резултата користе се *релативне елипсе грешака* при чему се врши упоређење вредности велике полуосе релативне елипсе грешака и дозвољене вредности која се рачуна по формули (1σ вредност)

$$r = c(d + 0.2), \quad (1)$$

где су: r – максимална дозвољена вредност велике полуосе у mm, c - емпиријски фактор који зависи од тачности премера, а d - међусобно растојање између две тачке у km.

Израз (1) користи се код утврђивања квалитета *хоризонталне* и *вертикалне* компо-

ненте добијених оцена након чега се установљава припадност *класи*³ и *реду*⁴ геодетске основе премера (мреже контролних тачака – геодетске мреже). Дефинисање тачности мреже врши се у пројектном задатку и изражава се *редом* неопходне тачности који подразумева квалитет односа са околним датим тачкама и ограничен је постигнутом *класом* тачности мреже. Према датим стандардима тачности врши се избор методе мерења и начина обраде података.

Према стандарду (ICSM, 2000) метода кинематике са накнадном обрадом и РТК метода могу се користити свуда где захтевана тачност премера дозвољава да фактор c у изразу (1) буде једнак и већи од **7.5** ($c \geq 7.5$; 1σ вредност). То практично значи, ако је растојање између тачака $d = 1 \text{ km}$, а $c = 7.5$ (класа А, ред 1), при нивоу поверења од 95%, дозвољена вредност велике полуосе релативне положајне елипсе грешака не сме прећи износ $r = 7.5 \cdot (1 + 0.2) \times 2.45 = 2.20 \text{ cm}$.

Друга врсте анализе квалитета оцена, према стандарду (ICSM, 2000), врши се преко сагласности поновљених мерења. Ова врста анализе посебно је важна код кинематичких метода GPS мерења јер се нове тачке одређују тзв. радијалним мерењима са базне станице. Применом кинематичких техника мерења, дужине између нових тачака не мере се директно, а обрада не врши применом МНК методе. У том случају, тестирање сагласности појединих оцена серија мерења сматра се сасвим довољним. При томе треба имати у виду да се као минималан захтев поставља услов

³ Класа је функција планиране и остварене прецизности мреже и зависи од: облика мреже, методе мерења, инструмената и начина редукиције мерења; везана је за опажања и одређује се из изравнања по моделу посредних мерења и минималним бројем датих услова.

⁴ Ред је функција класе премера, конформности нове у односу на постојећу мрежу и тачности трансформације из једног у други координатни систем; везан је за тачке и одређује се из изравнања по моделу посредних мерења када је број датих услова већи од неопходног.

двоструког независног запоседања непознатих тачака и коришћење најмање две базне станице. Величине које се тестирају на сагласност јесу резултате 2D координата тачака добијене као разлике оцена параметара – координата из двоструких запоседања уз коришћење две базе.

2.3. Тестирање квалитета оцена добијених кинематичким методама GPS мерења

У радијалном премеру (кинематички, RTK, брза статика са два пријемника при чему је један базни, а други се помера) вектори између непознатих тачака нису мерене величине. У тим случајевима нема мерења између непознатих тачака и не примењује се изравнање по МНК методи, па се као критеријум квалитета позиционирања може користити дозвољена разлика оцена параметара независних мерења (ако се користи једна база и један покретни пријемник) или грешка затварања фигуре (ако се користе две или више базе). Без обзира на ниво захтеване тачности координата, регистрација се на детаљним тачкама мора вршити најмање два пута, независно и са две базе.

На слици 1 илустрован је пример мерења неколико дискретних тачака оперативног полигона замишљеног линијског објекта (А, В, С...) са две базе. Очекивано стандардно одступање оцена положаја тачака A_1 и A_2 може се срачунати на основу а приори стандарда тачности GPS мерења базне линије (ICSM, 2000). Ако стандардна одступања оцена базних линија d_1 и d'_1 означимо са σ_{d1} и $\sigma_{d'1}$, тада се очекивано стандардно одступање по хоризонталном положају (2D) $\sigma_{\Delta A}$ може срачунати као $\sigma_{\Delta A} = \sqrt{\sigma_{d1}^2 + \sigma_{d'1}^2}$, а максимална вредност одступања по хоризонталном положају као $\Delta_{\Delta A} \leq 2.45 \times \sigma_{\Delta A}$.

Уколико је разлика по положају из два запоседања мања од $\Delta_{\Delta A}$, са нивоом поверења од 95% можемо тврдити да су вектори d_1 и d'_1 сагласни унапред декларисаној тачности. У том случају дефинитивни положај тачке А

рачуна се као проста аритметичка средина. Уколико је разлика већа од дозвољене, средња вредност положаја рачуна се као општа аритметичка средина или се спроводе неопходна додатна мерења. Ако претпоставимо да стандардна одступања положаја датих тачака (базне станице) нису значајна, стандардно одступање средње вредности дефинитивних координата положаја тачке А износи

$$\sigma_{A_{def}} = \sqrt{(\sigma_{d1}^2 + \sigma_{d'1}^2) / 2^2}. \quad (2)$$

На сличан начин тестира се квалитет добијених оцена положаја и осталих тачака полигона. Тестирање квалитета оцена вектора између новоодређених тачака добијених кинематичком методом, према (ICSM, 2000), врши се преко стандардних одступања дефинитивних положаја крајњих тачака. Очекивано стандардно одступање оцене вектора АВ кинематичком методом рачуна се као

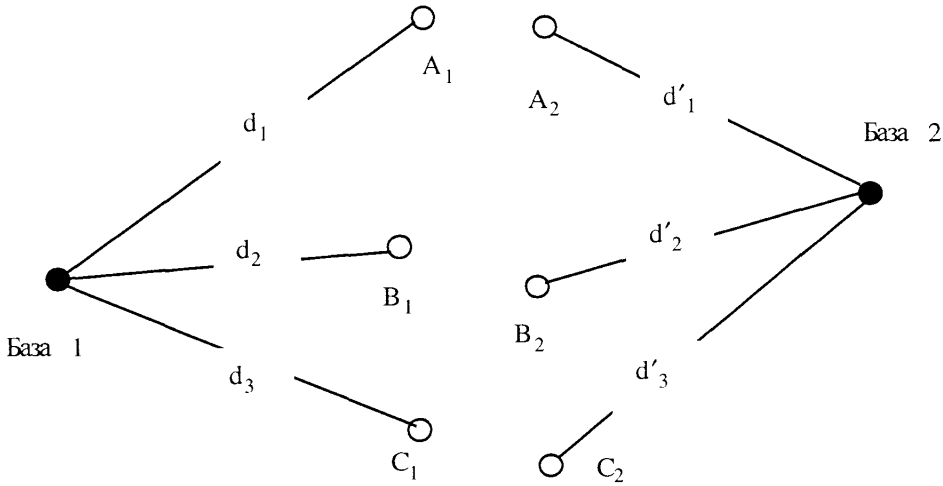
$$\sigma_{AB} = \sqrt{(\sigma_{A_{def}}^2 + \sigma_{B_{def}}^2)}. \quad (3)$$

При нивоу поверења од 95%, дозвољена вредност разлике износи $\Delta_{AB} = 2.45 \times \sigma_{AB}$.

Према (ICSM, 2000), уколико је разлика већа од дозвољене вредности, неопходно је поступити на један од следећих начина:

1. одабрати ближе базне тачке,
2. користити прецизнији инструмент,
3. одабрати трећу базу,
4. допунски (три пута) запоседнути нове тачке, и
5. директно мерити дужине између нових тачака.

Ако су тачке у низу, четврта варијанта даје најбоље решење, а уколико су тачке неправилно распоређене, препоручује се трећа опција. У случају избора пете опције, тада се уместо кинематичке методе (или RTK) користи метода брзе статике.



Слика 1: Положај тачака кинематичког мерења

3. РЕЗУЛТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТА

3.1. Показатељи а priori анализе

3.1.1. А priori тачност оцена положаја тачака кинематичком методом мерења

У експерименту који је изведен, на основу а priori тачности мерења и удаљености базних инструмената од центра радилишта, према (ICSM, 2000), може се срачунати очекивана тачност GPS оцена кинематичком методом, по хоризонталном положају, висини и вектора између две новоодређене тачке (нека је дозвољена вредност $\Delta_{AB} = 5 \text{ cm}$).

За претпостављени стандард тачности кинематичке методе од $1 \text{ cm} + 0,2 \text{ cm/km}$, удаљености базе ТРС: $d_1 = 3 \text{ km}$ и базе П2: $d'_1 = 0,1 \text{ km}$, претпостављене оцене стандарда мерења износе $\sigma_{d1} = 1,6 \text{ cm}$ и $\sigma_{d'1} = 1,0 \text{ cm}$, а априори стандардно одступање положаја поједине тачке износи

$\sigma_{\Delta A} = \sqrt{\sigma_{d1}^2 + \sigma_{d'1}^2} = 1,9 \text{ cm}$. Уколико су разлике по положају мање или једнаке $\Delta_A = 2,45 \cdot 1,9 \text{ cm} = 4,6 \text{ cm}$, тада са нивоом поверења од 95% можемо рећи да су GPS ме-

рења изведена сагласно спецификацији произвођача. У том случају положај тачке А рачуна се као проста аритметичка средина. Уз претпоставку о безначајности утицаја грешака координата базних тачака, стандардно одступање оцене дефинитивног положаја тачке А износи $\sigma_{Adef} = 0,94 \text{ cm}$. На исти начин могу се срачунати дозвољена одступања положаја и за остале тачке полигона.

3.1.2. А priori тачност оцене вектора кинематичком методом мерења

Дозвољено одступање посредног мерења вектора између две новоодређене тачке може се извести на основу дефинитивних вредности оцена појединих тачака. А priori стандардно одступање оцене вектора између две новоодређене тачке износи

$\sigma_{AB} = \sqrt{(\sigma_{Adef}^2 + \sigma_{Bdef}^2)} = 1,33 \text{ cm}$. Са нивоом поверења од 95% можемо тврдити да доња граница тачности оцене вектора (срачунат из GPS оцена координата положаја крајњих тачака са две базе) није мања од $\Delta_{AB} = 2,45 \cdot 1,33 \text{ cm} = 3,26 \text{ cm}$.

3.2. Резултати а posteriori анализе

3.2.1. Основни показатељи о изведеном експерименту

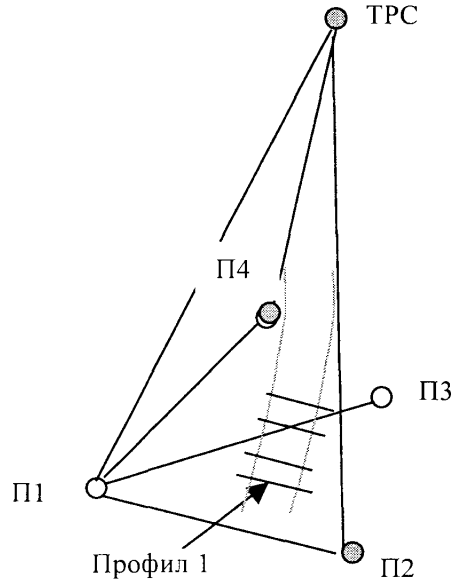
Мерења су изведена на привременом полигону димензија 100 m x 100 m у једном дању, од 10:00 од 16:00 часова. Тачке су привремено обележене. У експерименту су коришћени следећи инструменти: три GPS пријемника (један двофреквентни Trimble 5700 и два једнофреквентна 4600LS), један нивелир Zeisse Theo 025 и две тоталне станице – Topcon и Sokkia. Број датих тачака у мрежи износио је 5 (4 полигонске и једна тачка (стуб) на згради Грађевинског факултета чије су координате одређене у Државној референтној мрежи Србије - SREF). Обележено је десет профила са 13 тачака у сваком профили, што чини укупно 130 тачака (слике 2 и 3). Профили су постављени на међусобном растојању од око 10m.

У оквиру експеримента извршена су следећа мерења:

- геометријски нивелман,
- GPS мерења (статика и кинематика),
- тригонометријски нивелман са обе тоталне станице, и
- снимање тачака профила поларном методом са тоталним станицама Sokkia и Topcon.

Геометријским нивелманом одређене су висинске разлике између тачака мреже (П1, П2, П3 и П4) као и висине 130 детаљних тачака свих десет профила. Резултати мерења висинских разлика овим нивелманом представљају референтне вредности у поступку анализе тачности GPS висинских разлика добијених кинематиком методом.

GPS мерења су изведена у две фазе. У првој фази, статичком методом, полигон је повезан са SREF мрежом (преко тачке на крову Грађевинског факултета - TRS) чиме је успостављен координатни референтни систем премера детаља. Након тога, са две базе у две независне серије, извршен је кинематички премер тачака, по профилима. У првој серији базне тачке су биле П2 и TRS, а у другој TRS и П4 (слика 2).



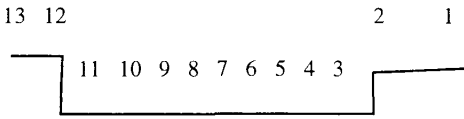
Слика 2: Референтна основа премера

Мерења тоталним станицама (хоризонтални углови, вертикални углови и дужине) извршена су са станице П3 на сваку детаљну тачку профила. Сва мерења су сведена у локални систем (дефинисан трансформацијом GPS координата у локални систем радилишта) и срачунате су разлике GPS оцена у односу на оцене добијене обрадом мерења тоталним станицама ($y, x, \Delta H$).

3.2.2. Квалитет добијених резултата

Анализом оцена положаја тачака из две серије GPS мерења констатовано је да у разликама нема систематских утицаја, а оцене стандардних одступања разлика координата по хоризонталном положају и висини износе: $\sigma_{\Delta x} = 1,3 \text{ cm}$, $\sigma_{\Delta y} = 2,0 \text{ cm}$, и $\sigma_{\Delta H} = 2,3 \text{ cm}$ ($f = 81$ степени слободe).

Средња вредност разлике висинских разлика, добијена као проста аритметичка средина из GPS мерења и геометријског нивелмана, износи $\Delta_{\text{дн}} = - 0,1 \text{ cm}$, а стандардно одступање поједине разлике висинских разлика износи $\sigma_{\Delta H} = 2,0 \text{ cm}$ ($f = 109$ степени слободe).



Слика 3: Распоред тачака у профилу

На основу резултата мерења тоталним станицама (поларном методом) срачунате су координате и висине детаљних тачака и оцењена су њихова стандардна одступања у односу на GPS резултате (по хоризонталном положају и висини) и она износе:

- **Topcon GTS311**

$\sigma_{\Delta X} = 1,3 \text{ cm}$, $\sigma_{\Delta Y} = 1,0 \text{ cm}$ ($f = 97$ степени слободе) и $\sigma_{\Delta H} = 2,0 \text{ cm}$ ($f = 100$ степени слободе).

- **Sokkia 530R**

$\sigma_{\Delta X} = 1,5 \text{ cm}$, $\sigma_{\Delta Y} = 2,8 \text{ cm}$, и $\sigma_{\Delta H} = 1,9 \text{ cm}$ ($f = 103$ степени слободе).

4. ЗАКЉУЧЦИ

На основу приказаних оцена имајући у виду да је претпостављена оцена тачности мерења кинематичком методом $(1-2) \text{ cm} + (1-2) \text{ mm/km}$, може се закључити да су а posteriori оцене хоризонталних положаја и висина тачака у очекиваним границама тачности и да се кинематичка GPS метода мерења може веома успешно користити у геодетским радовима. У којој мери и када ће се примењивати зависиће од: **захтеване тачности хоризонталног положаја и висина тачака премера (у складу са донетим стандардима тачности), карактеристика терена, обучености оператора и техничких карактеристика GPS инструмената.**

5. ЛИТЕРАТУРА:

1. Becker, J.M., Heister, H., Slaboch, V.: New technical standards improving the quality in positioning and measurement, NLS, Sweden, 2000.
2. Божић, Б.: Глобални систем позиционирања, Виша грађевинско-геодетска школа, Београд, 2001.
3. Чинкловић, Н.: Анализа и претходна оцена тачности метода прецизних геодетских мерења, Научна књига, Београд, 1978.
4. РГЗ: Правилник о садржини, начину, условима, надзору и контроли вршења геодетских радова у инжењерско-техничким областима, СГ РС 59/2002.
5. Gottwald, R.: Prüfung und Kalibrierung von Vermessungsinstrumenten, Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, p. 409-413, 1998.
6. Federal Geodetic Control Committee: Standards and Specifications for Geodetic Control Networks, U.S. Department of Commerce, 1984.
7. Federal Geodetic Control Committee: Geometric Geodetic Accuracy Standards and Specifications for Using GPS Relative Positioning Techniques, version 5.0, U.S. Department of Commerce, 1989.
8. Federal Geodetic Control Committee: Standards for Geodetic Control Networks, U.S. Department of Commerce, 1994.
9. Inter-governmental advisory committee on Surveying and Mapping: Standards and practices for control surveys (SP1), ICSM Publication No. 1, Australia, 2000.
10. Перовић, Г.: Рачун изравнања – књига I теорија грешака мерења, Научна књига и Грађевински факултет, Београд, 1989.
11. Staiger, R.: Zur Überprüfung moderner Vermessungsgeräte, Allgemeine Vermessungsnachrichten (AVN), 365-372, 1998.