

Usporedba točnosti određivanja 3D pomaka terestričkom i satelitskom metodom izmjere

Mladen ZRINJSKI, Antonio TUPEK, Marko BUTERIN, Krunoslav ŠPOLJAR¹

SAŽETAK

Određivanje pomaka i deformacija zahtijeva visoku razinu točnosti geodetskih mjerenja. U radu je provedena usporedba točnosti određivanja 3D pomaka terestričkom i relativnom statičkom GNSS metodom izmjere. Na kalibracijskoj bazi Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu obavljena su mjerenja primjenom precizne geodetske mjerne stanice i GNSS-a. Dvema neovisnim metodama izmjere određeni su iznosi pomaka, koji su uspoređeni s poznatom vrijednošću simuliranog 3D pomaka.

Ključne riječi:

kalibracijska baza, precizna geodetska mjerna stanica, GNSS, 3D pomak, točnost.

1. Uvod

Određivanje pomaka i deformacija zahtijeva puno veću točnost mjerenja od većine drugih geodetskih zadataka, a time je vremenski zahtjevnije, ekonomski skuplje te kompleksnije. Točnost mjerenja pomaka funkcija je propisanih tolerancija pri izgradnji ili teorijski očekivanih pomaka izgrađenog ili prirodnog objekta. Zahtijevana točnost položaja svake opažane točke pri određivanju pomaka dana je izrazom (Novaković 2006):

$$P_{95\%} = k \cdot D_{\max} \quad (1)$$

gdje su:

$P_{95\%}$ – položajna nesigurnost opažanih točaka na objektu uz razinu povjerenja 95%,

D_{\max} – očekivani maksimalni pomak točke,

k – koeficijent maksimalnog pomaka.

Razvoj tehnologije uvelike je utjecao na napredak svih grana geodezije pa tako i na određivanje pomaka i deformacija. Mjerenja postaju sve kvalitetnija, brojnija i brža, pri čemu se najviše ističu globalni navigacijski satelitski sustavi (engl. *Global Navigation Satellite Systems – GNSS*), koji danas omogućuju mjerenje velikog broja geoprostornih podataka s centimetarskom ili boljom točnošću. Takva razina točnosti postignuta je ponajviše zbog uspostave novih globalnih satelitskih sustava, tako da su danas dostupni GPS, GLONASS, BeiDou i Galileo i to sva-

¹ Prof. dr. sc. Mladen Zrinjski, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: mladen.zrinjski@geof.unizg.hr

Antonio Tupek, mag. ing. geod. et geoinf., Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: antonio.tupek@geof.unizg.hr

Marko Buterin, mag. ing. geod. et geoinf., Geo Zadar d.o.o., HR-23000 Zadar, Hrvatska, e-mail: marko@geozadar.hr

Krunoslav Špoljar, mag. ing. geod. et geoinf., Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: krunoslav.spoljar@geof.unizg.hr

ki na više frekvencija, što povećava točnost pozicioniranja i navigacije (Zrinjski i dr. 2019).

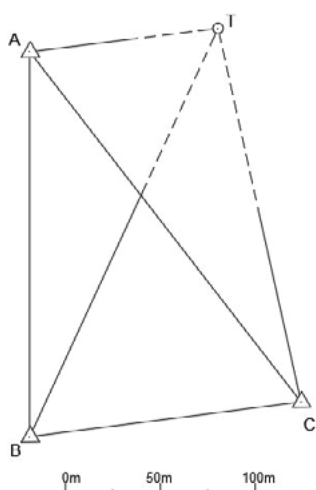
U nastavku rada opisana je usporedba točnosti određivanja 3D pomaka terestričkom i satelitskom (GNSS) metodom izmjere na kalibracijskoj bazi Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, koja je obavljena u okviru izrade diplomskog rada Marka Buterina (Buterin 2022). Mentor diplomskog rada bio je Mladen Zrinjski, a voditelj Antonio Tupek.

Slika 1. Kalibracijska baza Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu (Zrinjski i dr. 2022).



2. Uspostava geodetske mreže i terenska izmjera

Kao testni poligon za simuliranje pomaka i obavljanje terenskih mjerenja odabrana je kalibracijska baza Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu (slika 1), koja se nalazi na nasipu oteretnog kanala Sava – Odra u Donjoj Lomnici. Uspostavljena geodetska mreža za potrebe terestričkih mjerenja ima oblik geodetskog četverokuta (slika 2). Sastoji se od referentne mreže u obliku trokuta koju čine točke A, B i C te kontrolne točke T, pomak koje je simuliran. Za stabilizaciju točka A i T odabrana su dva stupa kalibracijske baze, a točke B i C stabilizirane su na južnom nasipu oteretnog kanala.



Slika 2. Skica uspostavljene referentne mreže i kontrolne točke.



Za simulaciju pomaka kontrolne točke T izrađena je metalna ploča na koju su postavljene dvije podnožne ploče na određenom razmaku (slika 3). Upotrijebljen je pribor za prisilno centriranje s prizmom Topcon, koja ima mogućnost postavljanja dodatne opreme i instrumentarija na vrh prizme, u konkretnom slučaju GNSS antene, što omogućuje istovremeno obavljanje terestričkih i satelitskih mjerenja. Horizontalni pomak simuliran je na način da se po završetku terestričkih i satelitskih mjerenja u epohi E0 prizma zajedno s antenom postavlja na drugu podnožnu ploču (epoha E1), a za simuliranje visinske (vertikalne) komponente

pomaka upotrijebljen je metalni nastavak koji se umeće ispod prizme. Simulirani 3D pomak izmjeren je pomičnim mjerilom sa submili-metarskom točnošću te njegova horizontalna komponenta iznosi 128,3 mm, a visinska komponenta 100,0 mm.

Prilikom terestričkih mjerenja mjereni su horizontalni pravci u dva girusa te zenitni kutovi i kose duljine pri čemu su na svakom stajalištu dva opažača (Marko Buterin i Antonio Tupek) neovisno izmjerila po jedan girus. Mjerenja su obavljena sa stajališnih točaka A, B i C prema kontrolnoj točki T u dvije epohe (E0 i E1). Terestrička mjerenja obavljena su primjenom precizne geodetske mjerne stanice Leica TC2003 (slika 4a) i odgovarajućega pribora za prisilno centriranje (slika 4b).



Slika 3. Način simulacije 3D pomaka točke T.



a)



b)

Slika 4. Način stabilizacije točaka referentne mreže: a) točka A; b) točke B i C.

Satelitska mjerenja obavljena su samo na kontrolnoj točki T relativnom statičkom GNSS metodom pozicioniranja primjenom GPPS-a CROPOS-a, s trajanjem sesije od minimalno dva sata, intervalom registracije mjerenja 15 sekundi te elevacijskom maskom 10°. Za satelitska mjerenja primijenjena je GNSS antena Trimble Zephyr Geodetic 2 (Solarić i dr. 2009) i GNSS prijamnik Trimble NetR5.

Terestrička i satelitska mjerenja obavljena su 5. svibnja 2022. godine u dvije epohe mjerenja, prije simulacije pomaka – epoha E0 te nakon simulacije pomaka – epoha E1. Na slici 5 prikazan je način stabilizacije točke T u epohi E0, a na slici 6 stabilizacija točke T nakon simulacije pomaka u epohi E1.

Trajanje satelitskih mjerenja u epohi E0 iznosilo je 159 minuta, a mjerenja u epohi E1 trajala su 131 minutu (ukupno od 9:35 do 14:30 sati po lokalnom vremenu s prekidom 5 minuta između epoha).



Slika 5. Stabilizacija točke T u epohi E0.



Slika 6. Stabilizacija točke T nakon simulacije pomaka u epohi E1.

3. Obrada mjernih podataka

Nakon obavljene terenske izmjere pristupilo se obradi mjernih podataka. Podaci terestričkih i satelitskih mjerenja obrađivani su zasebno, neovisno jedni od drugih.

3.1. Obrada podataka terestričkih mjerenja

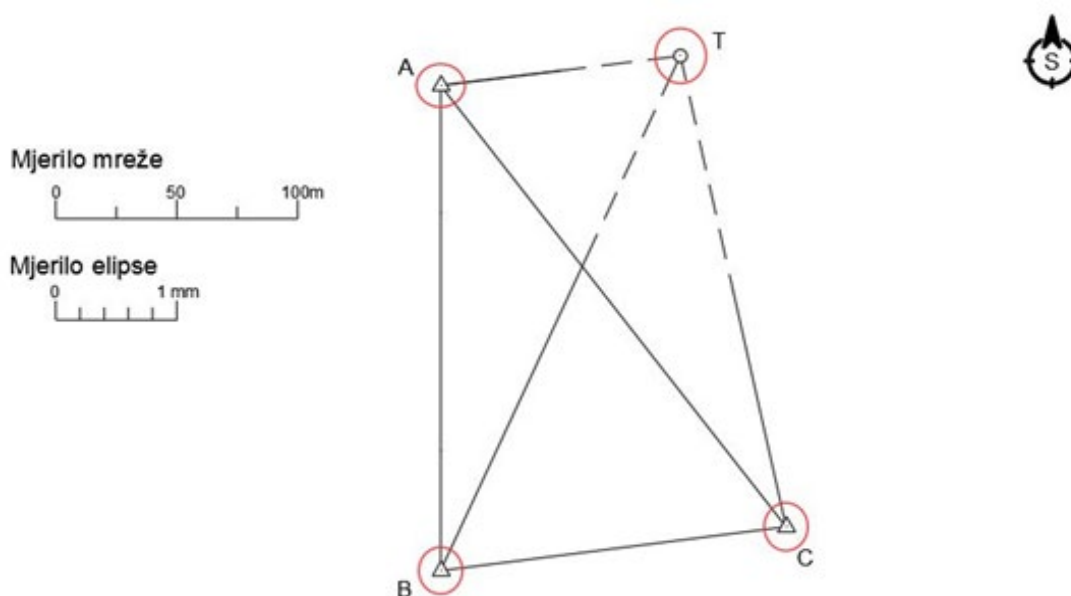
Preobrada podataka terestričkih mjerenja obavljena je primjenom Microsoft Office Excela 2016, a izjednačenje geodetske mreže i određivanje pomaka provedeno je primjenom softvera JAG3D (URL 1). Definiran je lokalni trodimenzionalni (3D) pravokutni koordinatni sustav kojemu je os x definirana na točkama B i A, os H smjerom vertikale, a

os y na način da zatvara desno orijentirani koordinatni sustav. Točki B dodijeljena je trojka koordinata ($y=1000$, $x=500$, $H=100$).

U tablici 1 navedene su izjednačene koordinate točaka A, B, C i T te pripadna standardna odstupanja u epohi E0. Na slici 7 dan je prikaz izjednačene geodetske mreže s elipsama pouzdanosti uz razinu povjerenja 95%.

Tablica 1. Izjednačene koordinate točaka geodetske mreže sa standardnim odstupanjima u epohi E0.

Točka	y [m]	x [m]	H [m]	S_y [mm]	S_x [mm]	S_H [mm]
A	1000,0001	702,9459	100,2107	0,22	0,20	0,73
B	1000,0005	500,0005	99,9987	0,18	0,20	0,79
C	1142,8257	518,3228	100,0511	0,18	0,21	0,80
T	1099,1497	715,3119	100,1796	0,23	0,25	0,86

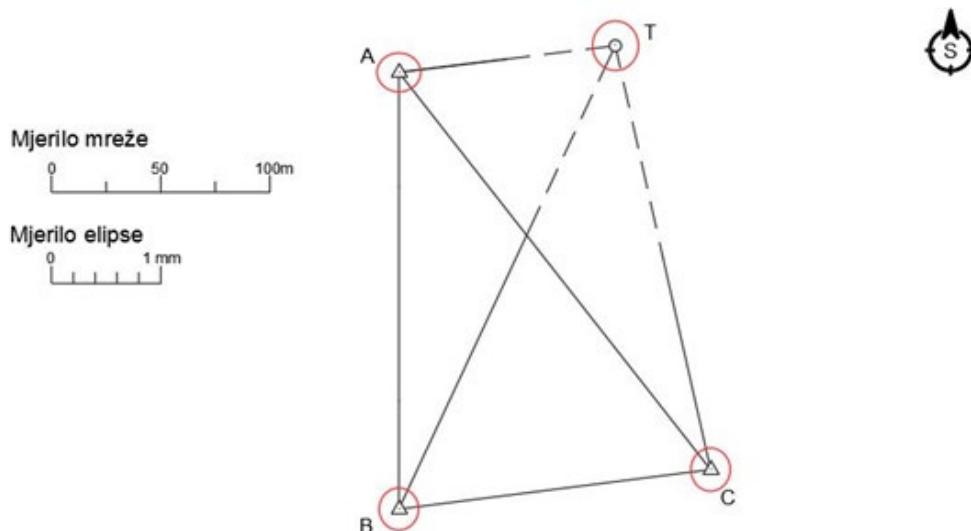


Slika 7. Skica geodetske mreže s elipsama pouzdanosti – epoha E0.

U tablici 2 navedene su izjednačene koordinate točaka A, B, C i T te pripadna standardna odstupanja u epohi E1. Na slici 8 dan je prikaz izjednačene geodetske mreže s elipsama pouzdanosti uz razinu povjerenja 95%.

Tablica 2. Izjednačene koordinate točaka geodetske mreže sa standardnim odstupanjima u epohi E1.

Točka	y [m]	x [m]	H [m]	S_y [mm]	S_x [mm]	S_H [mm]
A	999,9469	702,9273	100,1854	0,20	0,18	0,66
B	999,9937	499,9823	99,9737	0,16	0,18	0,72
C	1142,8146	518,3377	100,0265	0,17	0,19	0,73
T	1099,2208	715,3337	100,2544	0,21	0,23	0,78



Slika 8. Skica geodetske mreže s elipsama pouzdanosti – epoha E1.

Usporedbom standardnih odstupanja izjednačenih koordinata u epohama E0 i E1 (tablice 1 i 2) uočava se da su dobivene gotovo iste vrijednosti što ukazuje na homogenost geodetske mreže te visoku kvalitetu provedenih mjerenja.

Kako bi se odredio pomak provedeno je zajedničko izjednačenje rezultata dviju geodetskih mreža iz epoha E0 i E1. Provedenim statističkim testiranjem utvrđeno je da je točka T nestabilna (tablica 3) te se za nju detektirao pomak. Iznosi pomaka po koordinatnim osima s pripadnim standardnim odstupanjima određivanja pomaka dani su u tablici 4.

Tablica 3. Podaci statističkog testiranja stabilnosti točke T između epoha E0 i E1.

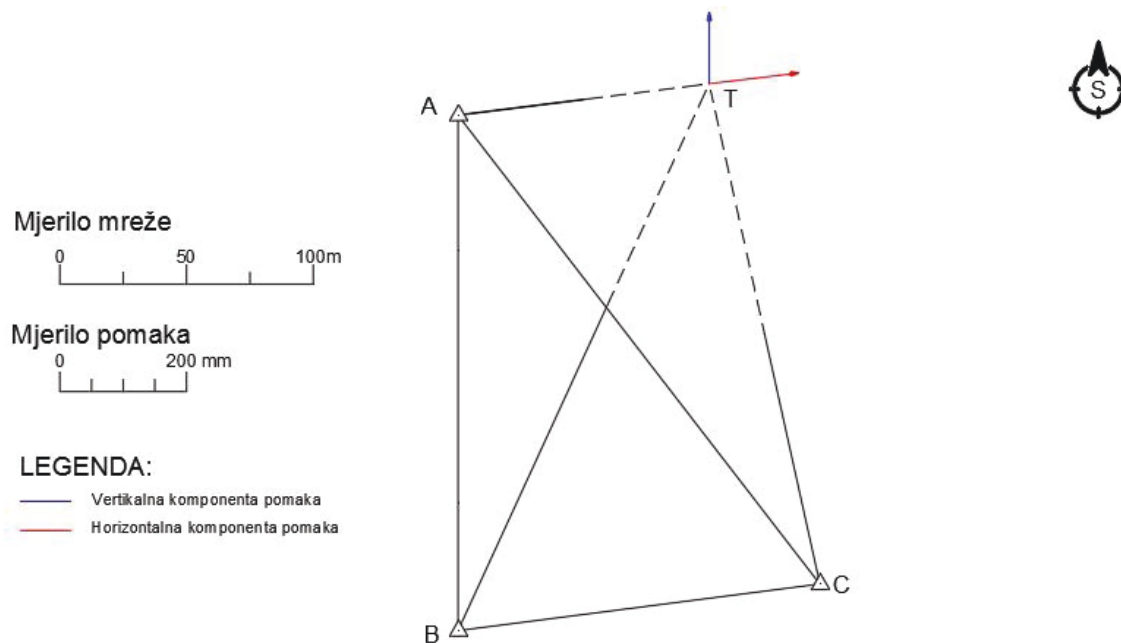
Epoha E0	Epoha E1	T_{prio}	T_{post}	Ocjena
T	T	17354,09	21469,64	nestabilna

Tablica 4. Rezultati određivanja pomaka točke T iz terestričkih mjerenja.

Epoha E0	Epoha E1	Δ_y [m]	Δ_x [m]	Δ_H [m]	S_y [mm]	S_x [mm]	S_H [mm]
T	T	127,3	17,2	99,9	0,55	0,43	1,39

Obradom podataka terestričkih mjerenja utvrđeno je da horizontalna komponenta pomaka iznosi 128,5 mm, a visinska kom-

ponenta pomaka 99,9 mm. Skica rezultata pomaka određenog iz terestričkih mjerenja u lokalnom pravokutnom koordinatnom sustavu prikazana je na slici 9.



Slika 9. Skica pomaka određenog iz terestričkih mjerenja.

3.2. Obrada podataka satelitskih mjerenja

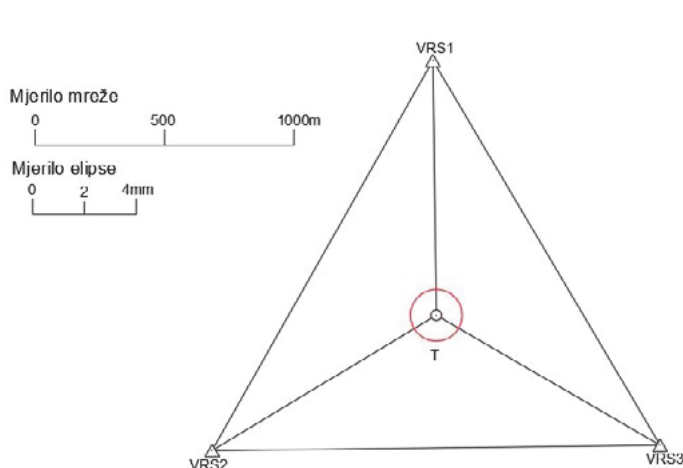
Obrada podataka satelitskih mjerenja u cijelosti je obavljena primjenom softvera TBC 5.0 (engl. Trimble Business Center), a sastojala se od obrade baznih linija, optimiranja vektora i izjednačenja geodetske mreže. GPPS CROPOS-a upotrijebljen je za preuzimanje podataka VRS-a (engl. Virtual Reference Station) putem interneta (URL 2).

Precizne efemeride preuzete su s NASA-ina servisa CDDIS (URL 3) u formatu *.sp3.

Konačni rezultat izjednačenja su izjednačene koordinate E i N točke T u referentnom sustavu HTRS96/TM i visina H u sustavu HVRS71 s pripadnim standardnim odstupanjima za epohe E0 (tablica 5) i E1 (tablica 6).

Tablica 5. Izjednačene koordinate točke T – epoha E0.

Točka	E [m]	N [m]	H [m]	S_E [mm]	S_N [mm]	S_H [mm]
T	461823,050	5063126,749	159,801	1,0	1,0	1,0



Slika 10. Skica geodetske mreže s elipsom pouzdanosti – epoha E0.

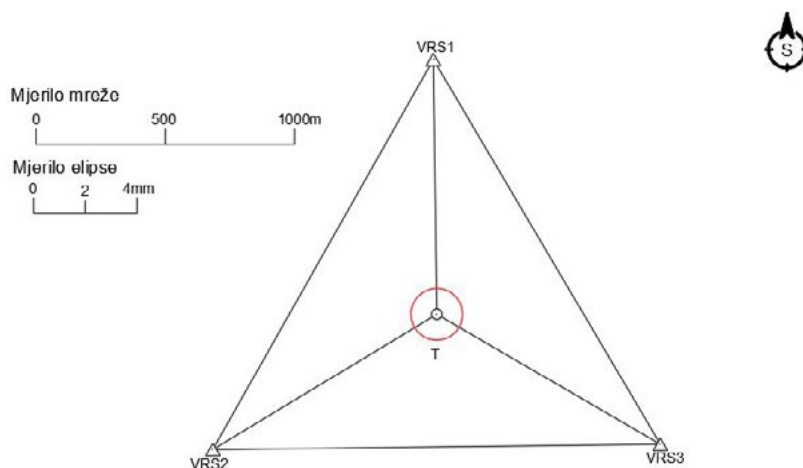


Skica geodetske mreže s elipsom pouzdanosti, uz razinupovjerenja 95%, za epohu E0 prikazana je na slici 10.

Skica geodetske mreže s elipsom pouzdanosti, uz razinupovjerenja 95%, za epohu E1 prikazana je na slici 11.

Tablica 6. Izjednačene koordinate točke T – epoha E1.

Točka	E [m]	N [m]	H [m]	S_E [mm]	S_N [mm]	S_H [mm]
T	461823,169	5063126,709	159,895	1,0	1,0	1,0



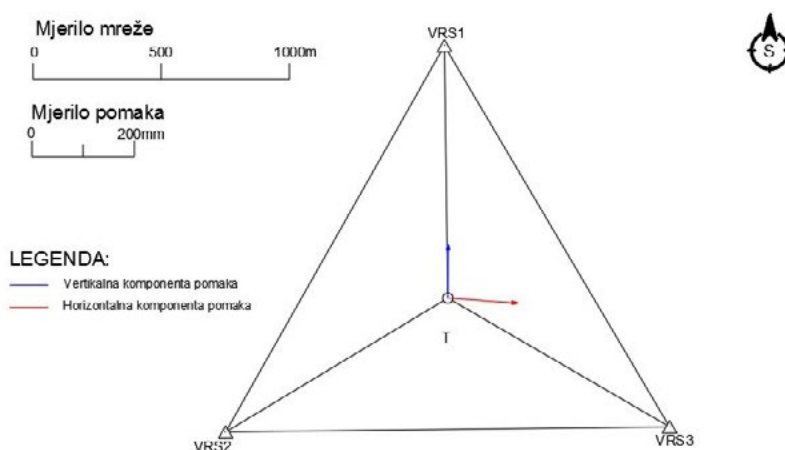
Slika 11. Skica geodetske mreže s elipsom pouzdanosti – epoha E1.

Određivanje pomaka iz satelitskih mjerenja provodi se računanjem razlike koordinata dobivenih izjednačenjem geodetske mreže u dvjema epohama mjerenja. Razlike koordinata točke T po koordinatnim osima između epoha E1 i E0 dane su u tablici 7.

Utvrđeno je da horizontalna komponenta pomaka iznosi 125,5 mm, a visinska komponenta pomaka 94,0 mm. Skica rezultata pomaka određenog iz satelitskih (GNSS) mjerenja u službenome državnom koordinatnom sustavu prikazana je na slici 12.

Tablica 7. Razlike koordinata točke T iz epoha mjerenja E1 i E0.

Epoha E0	Epoha E1	ΔE [mm]	ΔN [mm]	ΔH [mm]
T	T	119,0	-40,0	94,0



Slika 12. Skica pomaka određenog iz satelitskih mjerenja.

4. Analiza rezultata

Završetkom obrade svih mjernih podataka provedena je usporedba točnosti određivanja pomaka iz terestričkih i satelitskih mjerenja. Razlika pomaka određenog iz terestričkih mjerenja i simuliranog pomaka dana je u tablici 8, a razlika pomaka određenog iz satelitskih mjerenja i simuliranog pomaka dana je u tablici 9.

Tablica 8. Razlika pomaka određenog terestričkim mjerenjima i simuliranog pomaka.

	Horizontalna komponenta [mm]	Visinska komponenta [mm]	3D pomak [mm]
Simulirani pomak	128,3	100,0	162,7
Izmjeren pomak	128,5	99,9	162,8
Razlika	0,2	-0,1	0,1

Tablica 9. Razlika pomaka određenog satelitskim mjerenjima i simuliranog pomaka.

	Horizontalna komponenta [mm]	Visinska komponenta [mm]	3D pomak [mm]
Simulirani pomak	128,3	100,0	162,7
Izmjeren pomak	125,5	94,0	156,8
Razlika	-2,8	-6,0	-5,9

Tablica 10. Točnost određivanja 3D pomaka pojedine metode izmjere.

Metoda	σ [mm]
Terestrička	0,1
GNSS	5,9

Za konačnu procjenu ostvarene točnosti određivanja 3D pomaka izračunata standardna odstupanja ukupnog pomaka za svaku pojedinu metodu izmjere i dana su u tablici 10.

Za konačnu procjenu ostvarene točnosti određivanja 3D pomaka izračunata standardna odstupanja ukupnog pomaka za svaku pojedinu metodu izmjere i dana su u tablici 10.

5. Zaključak

Cilj je rada bio na temelju obavljenih terestričkih mjerenja utvrditi i usporediti točnost terestričke i satelitske (GNSS) metode izmjere pri određivanju pomaka (3D). Odabrane su dvije, potpuno neovisne metode, koje karakterizira različit instrumentarij, različit pristup obavljanju mjerenja i različita obrada mjernih podataka.

Analizom dobivenih rezultata utvrđeno je da se terestričkom metodom pomak može odrediti sa submilimetarskom točnošću. Ostvareno proizlazi jer je za terestrička mjerenja primijenjena precizna geodetska mjerna stanica i pribor za prisilno centriranje, pa su dobiveni mjerni podaci visoke razine točnosti.

Za neovisna satelitska mjerenja primijenjena je relativna statička GNSS metoda uz primjenu GPPS-a CROPOS-a. Provedenom analizom utvrđeno je da se GNSS mjerenjima pomak može odrediti s milimetarskom točnošću. Povećanju točnosti GNSS metode može pridonijeti povećanje trajanja pojedine epohe mjerenja.

Literatura

Buterin, M. (2022): Usporedba točnosti određivanja 3D pomaka terestričkim i satelitskim metodama izmjere, diplomski rad, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.

Novaković, G. (2006): Geodetske mreže posebnih namjena, skripta, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.

Solarić, N., Solarić, M., Zrinjski, M. (2009): GPS-antena Zephyr Geodetic, Geodetski list, Vol. 63 (86), No. 4, 329–352.

Zrinjski, M., Barković, Đ., Matika, K. (2019): Razvoj i modernizacija GNSS-a, Geodetski list, Vol. 73 (96), No. 1, 45–65.

Zrinjski, M., Barković, Đ., Špoljar, K. (2022): Pregled metoda preciznog umjeravanja kalibracijskih baza, Geodetski list, Vol. 76 (99), No. 1, 25–52.

Mrežne adrese

URL 1: JAG3D,

<https://software.applied-geodesy.org/en/>, (1.9.2024.).

URL 2: GNSS – CROPOS,

<https://gnss.cropos.hr/>, (5.9.2024.).

URL 3: NASA – CDDIS,

<https://cddis.nasa.gov/>, (5.9.2024.).

Accuracy Comparison of Terrestrial- and Satellite-Based Geodetic 3D Displacement Determination Methods

ABSTRACT. . *The determination of displacements and deformations requires a high accuracy level of geodetic measurements. In this paper results on accuracy comparison of terrestrial and satellite-based geodetic 3D displacement determination methods are presented. Precise total station and GNSS geodetic surveys have been performed at the calibration baseline of the Faculty of Geodesy of the University of Zagreb in Zagreb, Croatia. By means of two independent geodetic methods, 3D displacements were determined and compared with known simulated values.*

Keywords: *calibration baseline, precise total station, GNSS, 3D displacement, accuracy.*