

Primljeno / Recived: 21.10.2020.
Prihvaćeno / Accepted: 23.11.2020.

UDK 528.481
Pregledni naučni rad / Review article

ODREĐIVANJE DEFORMACIJA POMOĆU SATELITSKIH METODA

DEFORMATION MONITORING USING SATELLITE METHODS

Esad Vrce, Džanina Omićević, Dževad Krdžalić

SAŽETAK

Praćenje deformacija pomoću Global Navigation Satellite Systems (GNSS) danas je pouzdana tehnika, ali zahtijeva najstrože standarde u obradi i analizi podataka. Opisan je postupak određivanja preciznog pozicioniranja i deformacijske analize u testnoj mreži u okolini Olimpijskog stadiona Koševo u Sarajevu, površine oko 1 km². Opažanja su izvršena dvofrekventnim GNSS prijemnicima a obrađeni softverom Trimble Business Center v4.00. Analiza je fokusirana na usporedbu nekoliko varijanti procesiranja opažanja: GPS L1, GPS L1+L2 i GNSS (GPS + GLONASS). Za deformacijsku analizu korišten je OS softver JAG3D. Rezultati pokazuju da je pouzdanost procjene deformacija na osnovu GPS L1 varijante upitna jer nije otkrila pomake na svim tačkama. Druga varijanta je dala bolje rezultate, srednje vrijednosti razlika određenih i simuliranih pomaka su po komponentama: 3 mm, 3 mm i 6 mm. Rezultati određeni pomoću treće varijante, tj. GNSS, su najbolji, a srednje vrijednosti razlika pomaka su: 4 mm, 3 mm i 2 mm, što ukazuje na preporuku korištenja spomenute metode kod projekta gdje se traži visoka preciznost.

Ključne riječi: *deformacijska analiza, GNSS sistemi, izjednačenje 3D mreža*

ABSTRACT

Deformation monitoring using Global Navigation Satellite Systems (GNSS) is a reliable technique today but requires strict standards in data processing and analysis. The procedure for determining the precise positioning and deformation analysis in the test network located nearby the Olympic stadium Koševo in Sarajevo, with an area of about 1 km square, is described. The observations are carried out using dual-frequency GNSS receivers and data are processed using by Trimble Business Center v4.00 software. The analysis is focused on comparing several variants of observation processing: GPS L1, GPS L1 + L2 and GNSS (GPS + GLONASS). Software OS JAG3D is used for deformation analysis. The results show that the reliability of the deformation estimated based on the GPS L1 variant is questionable since it does not detect displacements at all points. The second variant gives better results. The mean values of the differences of the determined simulated displacements are by components: 3 mm, 3 mm and 6 mm. The results determined using the third variant, i.e. GNSS, are the best, when the mean values of the displacement's differences are: 4 mm, 3 mm and 2 mm, what indicates the recommendation to use this method in a project where high precision is required.

Keywords: *deformation analysis, GNSS systems, adjustment of 3D networks*

1 UVOD

Razvoj globalnih navigacijskih satelitskih sistema (GNSS) uveliko su doprinijeli poboljšanju tačnosti određivanja položaja tačaka, prije svega statičkom metodom pozicioniranja. Savremene satelitske geodetske metode omogućuju prikupljanje geoprostornih podataka s velikom tačnošću koje nisu bile zamislive prije 10-15 godina. GNSS osiguravaju globalno pozicioniranje s tačnošću ispod 1 cm (Mulić, Silnović, Krdžalić, 2020). Dok su u prošlosti bili dostupni signali samo sa GPS satelita, i to na dvije frekvencije, sada su na raspolaganju signali sa GPS, GLONASS, GALILEO i BEIDOU satelita, i to na više frekvencija. Uvođenjem novih frekvencija u upotrebu, smanjuje se uticaj atmosfere na tačnost određivanja položaja. Prednost postojanja više satelitskih sistema naročito je izražena u kanjonima, gradovima ..., gdje dolazi do pojave visokog DOP-a. U otežanim uslovima prijem signala sa više satelita omogućava smanjenje uticaja loše geometrije satelita na tačnost pozicioniranja.

Izbor mjesta za tačke značajno utiče na tačnost određivanja položaja tačaka kao i pomaka i deformacija. Noviji GNSS prijemnici imaju posebne hardverske komponente, kao i algoritme za smanjenje uticaja multipath-a, koji predstavlja jedan od glavnih izvora grešaka kod primjene GNSS tehnologije. Međutim, uticaj multipath-a je još uvijek nemoguće u potpunosti eliminirati tako da je u slučaju primjene GNSS-a kod kontrolnih mreža u inženjerstvu potrebno strogo voditi računa o mjestima na kojima se stabiliziraju tačke na kojima će se vršiti GNSS opažanja.

Kao alternativno rješenje za klasični pristup određivanju pomaka i deformacija, područje ili objekat od interesa može se pokriti mrežom GNSS stanica. Kampanje mjerenja se onda ponavljaju u određenim intervalima. Ovo je rješenje najčešće odabrano u slučaju malih područja, poput monitoringa klizišta. U posljednjih nekoliko godina, broj permanentnih stanica stalno se povećava, iako ne jednoliko, na lokalnom, regionalnom i globalnom nivou (Piras, Roggero i Fantino, 2009). Mreže kontinuiranog rada GNSS-a imaju različite primjene, geodetske, geodinamičke, na nacionalnom ili lokalnom nivou i osmišljene su za rad u realnom vremenu. Osim što GNSS ima razne prednosti u praćenju deformacija Zemljine kore, u svijetu postoje istraživanja gdje se pomoću GNSS pokušavaju predvidjeti veliki zemljotresi (Gu, 2013). Mjerenja za monitoring objekata i deformacijsku analizu zahtijevaju upotrebu vrlo precizne geodetske opreme i metoda analize, što svakako GNSS može ispuniti (Levent, 2008).

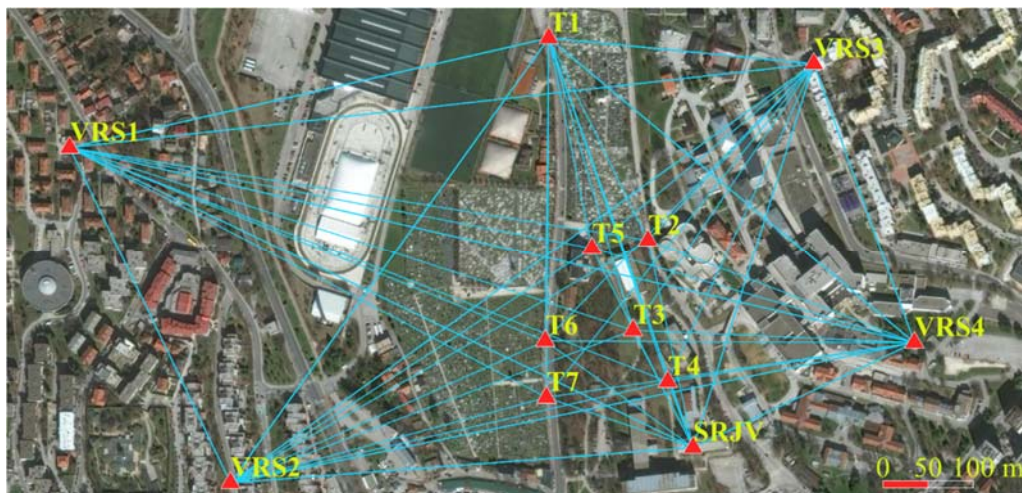
2 METODOLOGIJA

Osim što se GNSS sistemi koriste za istraživanje i određivanje deformacija Zemljine kore, oni se također koriste kao sistemi za određivanje lokalnih deformacija. U nastavku je prikazan postupak praćenje deformacija pomoću GNSS tehnologije na lokalnom nivou. Na lokalitetu Građevinskog fakulteta okolini Olimpijskog stadiona Koševo u Sarajevu stabilizirana je testna, kontrolna geodetska mreža (Slika 1) koja će se koristiti za testiranje određivanja pomaka i deformacija pomoću GNSS tehnologije. Prije same uspostave mreže izvršen je obilazak terena, te su odabrana mjesta za stabilizaciju budućih tačaka mreže.

Mreža se sastoji od sedam novopostavljenih tačaka, na četiri mjesta nisu simulirani pomaci (T1, T5, T6 i T7). Na tri mjesta postavljene su duple tačke (T2, T3 i T4). U drugoj epohi na spomenute

tri tačke, simulirani su pomaci, različiti po smjeru, veličini i visini. Osim ovih sedam tačaka mrežu čini još i pet dodatnih tačaka, a to su EUREF permanentna stanica SRJV, kao i četiri virtuelne referentne stanice (VRS), dobivene pomoću BIHPOS servisa za kreiranje VRS-ova. Ove tačke će služiti kao datumske tačke prilikom računanja pomaka.

Lokacije geodetskih tačaka izabrane su tako da na nekim tačkama nema smetnji u prijemu GNSS signala, dok na drugim ima manje ili više smetnji. To je urađeno kako bi se testirao uticaj mjesta tačke na preciznost određivanja deformacija GNSS-om. Većinom su objekti koji se ispituju deformacijskom analizom na takvim mjestima na kojima je prijem GNSS signala otežan. Obzirom da su za mjerenja u ovom radu korišteni najnoviji prijemnici, cilj je bio da se ispituju njihove mogućnosti u otežanim uslovima prijema signala (interferencija, multipath, zaklonjen horizont, itd.). Posebno će se ispitati ponašanje prijemnika na tačkama (T1, T5, T6 i T7), koje su blizu kontaktne mreže za trolejbus. Na terenu su izmjerene dvije epohe. U prvoj epohi, tačke su označene s dodatkom malog slova "a", a drugoj epohi s dodatkom malog slova "b".



Slika 1. Skica testne mreže za određivanje pomaka i deformacija, GNSS-om

Na osnovu GNSS mjerenja, jednim od modela deformacijske analize određeni su 3D pomaci (horizontalni i vertikalni). Na osnovu rezultata izvršit će se analiza i usporedba dobijenih (određenih, izračunatih) i simuliranih pomaka, obzirom na tačnost i pouzdanost. Na kraju su izvedeni odgovarajući zaključci obzirom na upotrebljivost predloženih metoda mjerenja i modela obrade.

2.1 Instrumentarij i pribor za mjerenje

Za mjerenja su korišteni prijemnici nove generacije tipa Trimble R8s sa Trimble TSC3 kontrolerom (Slika 2). Ovi prijemnici imaju mogućnost prijema signala sa svih postojećih satelitskih sistema. Osim toga primaju i signale na svim frekvencijama. Korišteni su na sedam novopostavljenih tačaka. Osim ovih prijemnika na permanentnoj stanici SRJV je instaliran Trimble NET R5 prijemnik sa Zephyr geodetic antenom (Slika 3).

Na VRS stanicama, odnosno na BIHPOS permanentnim stanicama su postavljeni prijemnici Leica GRX 1200 + GNSS i antene Leica AR25 (Slika 4).

Važno je napomenuti da prijemnik instaliran na SRJV stanici kao i prijemnici BIHPOS-a trenutno primaju GPS i GLONASS signale, dok se signali sa ostalih satelitskih sistema ne registrišu. Ostala oprema korištena prilikom mjerenja je: stativi Trimble, drajfusi sa optičkim viskom koji su prethodno ispitani i rektificirani, tuljci sa cjevastom libelom za precizno horizontiranje, a koji su također ispitani i rektificirani i štap za mjerenje visine antene sa milimetarskom podjelom.

Od velike je važnosti ispitivanje i rektifikacije pomoćne opreme i pribora. Ukoliko se žele postići najbolji rezultati onda je veoma važno da sva oprema bude ispitana i po potrebi rektificirana. Ovaj aspekt se vrlo često u praksi zanemaruje i smatra se da je oprema ispravna što vrlo često nije slučaj, te za posljedicu ima rezultate upitne kvalitete.



Slika 2. Prijemnici i kontroleri korišteni za mjerenje



Slika 3. Prijemnik (lijevo) i antena (desno) na stanici SRJV



Slika 4. Prijemnik (lijevo), (Leica-geosystems, 2020) i antena (desno) na BIHPOS stanicama (Leica-geosystems, 2020)

2.2 Izvođenje mjerenja

Mjerenja na kontrolnim tačkama su izvedena pomoću prijemnika Trimble R8s. Prije izvođenja mjerenja izvršena je adekvatna priprema u smislu planiranje opažanja, kako bi se vidjelo koliki broj satelita će biti dostupan u planiranom periodu opažanja. U slučaju da taj broj nije zadovoljavajući onda se period mjerenja prilagođava vremenu u kojem će biti više dostupnih satelita. Obzirom da korišteni prijemnici primaju signale sa svih satelitskih sistema, manja je vjerovatnoća da će u nekom periodu biti nedovoljan broj dostupnih satelita. Međutim kako pravila struke nalažu da se izvrši planiranje to je i urađeno (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger, Collins, 2001).

Za predviđeni vremenski period opažanja izvršena je provjera dostupnosti satelita pomoću online Trimble softvera za planiranje <https://www.gnssplanning.com>. Pomenuti online softver ima mogućnost nosa prepreka koje se nalaze u okruženju tačke na kojoj se vrše mjerenja, tako da se planiranje izvrši na najbolji mogući način. Broj dostupnih satelita za prvi dan opažanja kretao se od minimalno 5 (samo GPS) do čak 25 i više kada se koriste svi dostupni sateliti. Veliki broj dostupnih satelita utiče i na geometriju, odnosno DOP. Najveća vrijednost GDOP-a je bila oko 8 h i iznosila je oko 2,5, što je veoma dobro. I za ostale dane izvršena je ista priprema.

Mjerenja na terenu su trajala pet dana i to u periodu od 09.10.2017. do 13.10.2017. godine. Mjerene su dvije epohe. Kao bazna tačka u obje epohe izabrana je tačka T1, prije svega zbog lokacije (izvan simuliranog područja gdje se dešavaju deformacije), te zbog otvorenosti horizonta. Također u blizinu tačke T1 se nalazi kontaktna mreža od trolejbusa. Ovo je interesantna činjenica i prilika da se ispita uticaj interferencije na konačne rezultate. Dužina sesije je bila dva sata.

2.3 Obrada GNSS mjerenja

GNSS mjerenja su obrađena softverom Trimble Business Center v4.00. U spomenutom softveru se za računanje vektora koristi Trimble HD algoritam za procesiranje baznih linija (Trimble survey division, 2020). Tradicionalno, procesiranje se vršilo u dva koraka:

- prvo se računa "float" rješenje pomoću kodnih i faznih mjerenja,
- u drugom koraku se vrši rješavanje ambigviteta, da bi se dobilo "fiksno" rješenje.

Ovakav pristup ima nekoliko nedostataka, pogotovo kod RTK metode. Korisnik mora čekati izvjestan vremenski period dok se ne postigne "fiksno" rješenje. Također postoji mogućnost, u nepovoljnom okruženju, netačnog određivanja ambigviteta što vodi do pogrešnog "fiksno" rješenja. Trimble HD algoritam koristi prije svega poboljšanja hardverskih komponenti (prijemnika i antena). Danas se ne koristi više gore navedeni tradicionalni pristup u dva koraka. Za eliminaciju uticaja atmosfere na kratke bazne linije koriste se fazna mjerenja. Eliminacije uticaja jonosfere se vrši korištenjem tzv. Iono-free linearnih kombinacija, dok se kod kratkih baznih linija koristi tzv. narrow lane kombinacija (Trimble survey division, 2020). Za statička mjerenja kraća od jednog sata koristi se Hopfield model troposfere, dok se za statička mjerenja duža od jednog sata i bazne linije duže od 2 km koristi Hopfield model troposfere sa Niell mapping funkcijom.

Prilikom obrade mjerenja u softveru su podešeni sljedeći parametri: elevaciona maska 15° , precizne efemeride i samo "fiksno" rješenje. Mjerenja su obrađena u nekoliko različitih kombinacija ili varijanti:

- **Varijanta 1**, GPS L1, samo L1 frekvencija,
- **Varijanta 2**, GPS više frekvencija,
- **Varijanta 3**, GPS+GLONASS.

Obrada je vršena iterativno. Svaka bazna linija je analizirana procesirana nekoliko puta, sve dok se nisu dobili zadovoljavajući rezultati. Za svaku epohu su izračunate tri varijante: GPS L1, GPS dvofrekventni i GPS+GLONASS. Treba napomenuti da su obrađeni svi vektori, odnosno nije se vodilo računa o međusobnoj zavisnosti vektora. U nastavku je data (dio, 3 vektora od 96 vektora) tabele sa dobivenim rješenjima za varijantu 1 (Tabela 1).

Tabela 1

Vektori, epoha 1 (GPS L1, početak)

Od	Do	dx [m]	dy [m]	dz [m]	s_x [m]	s_y [m]	s_z [m]
T6a	T1a	-215,6986	-67,6848	247,8521	0,0330	0,0174	0,0332
T5a	T1a	-139,3975	-97,0148	166,2992	0,0289	0,0200	0,0355
T1a	T2a	118,8502	155,7160	-154,8381	0,0363	0,0155	0,0307

Nakon procesiranja vektora izračunato je odstupanje u okviru figura (trouglova). Najveće odstupanje po visini iznosi 45,2 mm, dok je odstupanje po položaju 7,7 mm (Tabela 2). Ovo potvrđuje činjenicu da se sa GPS-om općenito dobija lošija tačnost visina u odnosu na položaj.

Tabela 2

Zatvaranje figura, epoha1 (GPS L1)

	Dužina [m]	$\Delta 3D$ [m]	Δ horiz [m]	Δ vert [m]	ppm
Najbolja vrijednost		0,0002	0,0000	0,0000	0,081
Najlošija vrijednost		0,0453	0,0077	0,0452	46,329
Prosječna vrijednost	1572,2913	0,0125	0,0022	0,0120	8,533
Standarda greška		0,0164	0,0026	0,0161	7,901

Nakon računanja sa GPS L1, napravljena su računanja sa GPS L1+L2.

Tabela 3

Vektori-epoha1 (GPS L1+L2, početak)

Od	Do	dx [m]	dy [m]	dz [m]	s_x [m]	s_y [m]	s_z [m]
T6a	T1a	-215,7006	-67,6855	247,8483	0,0049	0,0027	0,0050
T5a	T1a	-139,3974	-97,0147	166,3005	0,0039	0,0028	0,0047
T1a	T2a	118,8491	155,7150	-154,8388	0,0098	0,0043	0,0085

Vidljivo je iz Tabele 1 i Tabele 3 da su korištenjem dvije frekvencije smanjene standardne devijacije komponenti vektora. Međutim odstupanja zatvaranja figura su ostala gotovo nepromijenjena. Najveće odstupanje zatvaranja figure po visini iznosi 44,7 mm dok je po položaju 8,8 mm.

Tabela 4

Zatvaranje figura-epoha1 (GPS L1+L2)

	Dužina [m]	$\Delta 3D$ [m]	Δ horiz [m]	Δ vert [m]	ppm
Najbolja vrijednost		0,0002	0,0000	0,0000	0,076
Najlošija vrijednost		0,0450	0,0088	0,0447	52,182
Prosječna vrijednost	1572,2920	0,0127	0,0024	0,0122	8,693
Standarda greška		0,0163	0,0029	0,0160	7,525

Treća varijanta predstavlja obradu GPS+GLONASS.

Tabela 5

Vektori-epoha1 (GPS+GLONASS, početak)

Od	Do	dx [m]	dy [m]	dz [m]	s_x [m]	s_y [m]	s_z [m]
T6a	T1a	-215,7031	-67,6847	247,8445	0,0039	0,0023	0,0038
T5a	T1a	-139,3985	-97,0156	166,2994	0,0032	0,0024	0,0041
T1a	T2a	118,8561	155,7123	-154,8335	0,0075	0,0036	0,0070

Odstupanja zatvaranja figura i u trećoj varijanti su ostala praktično ista, dok su razlike u komponentama vektora po nekoliko milimetara u odnosu na prethodne dvije varijante.

Tabela 6

Zatvaranje figura-epoha1 (GPS+GLONASS)

	Dužina [m]	$\Delta 3D$ [m]	Δ horiz [m]	Δ vert [m]	ppm
Najbolja vrijednost		0,0003	0,0000	0,0000	0,131
Najlošija vrijednost		0,0430	0,0107	0,0427	44,221
Prosječna vrijednost	1572,2920	0,0123	0,0026	0,0117	8,451
Standarda greška		0,0158	0,0032	0,0155	7,376

Nakon obrade baznih linija u prvoj epohi, izvršena je obrada baznih linija i u drugoj epohi, sa identičnim parametrima obrade (rezultati nisu prikazani). Odstupanja zatvaranja figura po visini u drugoj epohi su smanjena u odnosu na prvu epohu. Prosječna odstupanja položaja su nešto veća u odnosu na prvu epohu i iznose 12,7 mm.

Prilikom izravnjanje mreže provedeni su testovi otkrivanja grešaka mjerenja te su sva pogrešna mjerenja eliminirana iz dalje računске obrade i računanja pomaka i deformacija.

3 MODELI IZRAVNANJA I DEFORMACIJSKE ANALIZE U JAG3D

Za izravnjanje mreže i deformacijsku analizu korišten je besplatan tzv. Open source (OS) softver JAG3D. To je jedan od najpopularnijih OS softvera za izravnjanje geodetskih mreža. Dizajniran je tako da se mogu kombinirati različita mjerenja poput nivelmana, mjerenja pravaca, dužina, vertikalnih uglova, kao i GNSS vektora. Softver je razvijen tako da omogućava izravnjanje u 1D, 2D i 3D sistemu (Lösler, 2020).

Softver se odlikuje jednostavnošću. Nezavisan je od operativnog sistema i nema instalacije. Unos mjerenja se vrši pomoću običnog tekstualnog fajla. Izravnjanje se vrši metodom najmanjih kvadrata po Gauss-Markovom modelu (GMM), koji se smatra standardnim modelom u izravnjanju geodetskih mreža. Glavni uslov je da suma kvadrata popravaka bude minimalna

$$\Omega = \mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v} = \min \quad (1)$$

gdje je \mathbf{v} vektor popravaka a \mathbf{P} matrica težina.

Obično se u proces izravnjanja uvode različite vrste mjerenja (dužine, pravci, visinske razlike, GNSS vektori, itd.). Ova mjerenja se razlikuju u tačnosti (npr. često su uglovi tačniji od dužina ili obrnuto), ali i mjerenja istog tipa mogu imati različitu tačnost (npr. uglovi mjereni sa različitim instrumentima). Cilj je da se kroz stohastički model izvrši homogeniziranje uticaja mjerenja različite tačnosti na konačni rezultat. Kao mjera kvalitete opažanja uvodi se a-priori standardna devijacija mjerenja σ_0 odnosno kovarijans matrica mjerenja \mathbf{C}_1 . Ukoliko su mjerenja nezavisna varijans-kovarijans matrica ima elemente samo na dijagonalni.

$$\mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_i^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_n^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Inverzijom varijans-kovarijans matrice dobiva se matrica težina. A-priori varijans faktor σ_0^2 nije obavezan, ali smanjuje vrijeme računanja. Ukoliko nije unijet uzima se da je $\sigma_0^2 = 1$. Dalje je

$$\mathbf{C}_1 = \sigma_0^2 \mathbf{Q}_1 = \sigma_0^2 \mathbf{P}^{-1} \quad (3)$$

gdje je \mathbf{Q}_1 matrica kofaktora mjerenja.

Stohastički model za 3D GNSS vektor ima oblik

$$\mathbf{C}_b = \begin{bmatrix} \sigma_{\delta y}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\delta x}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\delta z}^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Veza između vektora mjerenja \mathbf{l} i vektora nepoznatih veličina \mathbf{x} ima uobičajenu formu

$$\mathbf{l} + \mathbf{v} = \hat{\mathbf{l}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} \quad (5)$$

gdje je \mathbf{A} prva dizajn matrica, odnosno Jacobian matrica, \mathbf{l} vektor mjerenja, $\hat{\mathbf{l}}$ vektor izravnatih mjerenja a $\hat{\mathbf{x}}$ vektor izravnatih nepoznatih veličina. Funkcionalni model za 3D GNSS vektor je

$$\mathbf{b}_{3D} = \begin{bmatrix} \delta y \\ \delta x \\ \delta z \end{bmatrix} = m\mathbf{R} \begin{bmatrix} y_2 - y_1 \\ x_2 - x_1 \\ z_2 - z_1 \end{bmatrix} = m\mathbf{R} \begin{bmatrix} \Delta y \\ \Delta x \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (6)$$

gdje su: m – mjerilo, \mathbf{R} – matrica rotacije i $\Delta y, \Delta x$ i Δz komponente vektora u lokalnom topocentričkom koordinatnom sistemu (ili "east", "north" i "up"). Mjerilo i matrica rotacije se uzimaju kada se GNSS mjerenja kombiniraju sa terestričkim mjerenjima. Ukoliko se radi samo o GNSS mjerenjima, pretpostavka je da su mjerenja istog mjerila i u istom koordinatnom sistemu. Detaljan matematički model se može pronaći na zvaničnoj web stranici softvera <https://software.applied-geodesy.org/wiki/start>.

U JAG3D softveru su implementirane standardne metode za testiranje mjerenje na prisustvo grubih grešaka. Prvo se provodi globalni test modela za svaku epohu posebno

$$T_G = \frac{\hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2} \sim F_{f,\infty} \quad (7)$$

gdje je: $f = n - u + d$, n broj mjerenja, u broj nepoznatih i d defekt mreže. Ukoliko globalni test nije prošao, uzrok može biti: prisustvo grubih grešaka, pogrešan funkcionalni model ili preoptimističan stohastički model. Zbog toga je osim globalnog testa potrebno provesti i lokalne testove. U JAG3D je implementirana Baarda metoda testiranja (Lösler, 2020).

JAG3D metoda deformacijske analize se sastoji od više faza.

U prvoj fazi se vrši izravnaje mjerenja iz dvije epohe, i to nezavisno metodom indirektnog izravnjanja. Testiranje homogenosti mjerenja vrši se kao i kod metode Pelcer-a (Sušić, Batilović, Ninkov, Aleksić i Bulatović, 2015).

U sljedećoj fazi se ispituje kongruencija (podudarnost, stabilnost) tačaka osnovne mreže. Ukoliko postoje nestabilne tačke osnovne mreže, one se otkrivaju u ovom koraku. Postavlja se nulta i alternativna hipoteza

$$H_0: E(\nabla_{R,j}) = 0 \text{ naspram } H_A: E(\nabla_{R,j}) \neq 0 \quad (8)$$

gdje su indeks j odnosi na tačku osnovne mreže. Zatim se formira test statistika

$$T_{prio,j} = \frac{\nabla_{R,j}^T \mathbf{Q}_{\nabla\nabla_{R,j}}^{-1} \nabla_{R,j}}{m\sigma_0^2} \sim F_{m,\infty} \text{ a-priori} \quad (9)$$

i

$$T_{post,j} = \frac{\nabla_{R,j}^T \mathbf{Q}_{\nabla\nabla_{R,j}}^{-1} \nabla_{R,j}}{m\hat{\sigma}_j'^2} \sim F_{m,f-m} \text{ a-posteriori} \quad (10)$$

gdje su:

$\nabla_{R,j}$ – vektor pomaka tačaka osnovne mreže

$\mathbf{Q}_{\nabla\nabla_{R,j}}$ – kofaktor matrica procijenjenih pomaka tačaka osnovne mreže

m – dimenzija geodetske mreže (1D, 2D ili 3D)

σ_0^2 – a-priori varijans faktor

$$\hat{\sigma}_j'^2 = \frac{\Omega - \nabla_{R,j}^T \mathbf{Q}_{\nabla\nabla_{R,j}}^{-1} \nabla_{R,j}}{f-m} \text{ – redukovana a-posteriori varijansa}$$

gdje je Ω kvadratna forma. U slučaju kada je zadovoljen uslov

$$T_{prio,j} < F_{m,\infty} \text{ ili } T_{post,j} < F_{m,f-m} \quad (11)$$

prihvata se nulta hipoteza, odnosno tačke su stabilne, ili u suprotnom se prihvata alternativna hipoteza. Gauss-Markov model zajedničkog izravnjanja obje epohe dat je kao (Lösler, 2020)

$$\begin{bmatrix} \mathbf{l}_1 \\ \mathbf{l}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{R,1} & \mathbf{A}_{O,1} & 0 \\ \mathbf{A}_{R,2} & 0 & \mathbf{A}_{O,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_R \\ \mathbf{x}_{O,1} \\ \mathbf{x}_{O,2} \end{bmatrix} \quad (12)$$

gdje su:

\mathbf{l}_1 – vektor mjerenja nulte epohe

\mathbf{l}_2 – vektor mjerenja kontrolne epohe

\mathbf{x}_R – vektor tačaka osnovne mreže čija je stabilnost potvrđena (uslovno stabilne tačke)

$\mathbf{x}_{O,1}, \mathbf{x}_{O,2}$ – vektori položaja tačaka koje se ispituju

Nakon zajedničkog izravnjanja određuju se nestabilne tačke. Da bi se one odredile postavljaju se nulta i alternativna hipoteza

$$H_0: E(\nabla_k) = 0 \text{ naspram } H_A: E(\nabla_k) \neq 0 \quad (13)$$

gdje indeks k predstavlja pojedinu tačku u mreži. Test statistika se provodi prema (Lösler, 2020)

$$T_{prio,k} = \frac{\nabla_k^T \mathbf{Q}_{\nabla\nabla_k}^{-1} \nabla_k}{m\sigma_0^2} \sim F_{m,\infty} \quad (14)$$

i

$$T_{post,k} = \frac{\nabla_k^T \mathbf{Q}_{\nabla\nabla,k}^{-1} \nabla_k}{m\hat{\sigma}_0^2} \sim F_{m,f-m} \quad (15)$$

gdje su:

$$\nabla_k = \mathbf{F}_k \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{O,1} \\ \mathbf{x}_{O,2} \end{bmatrix} - \text{vektor pomaka}$$

$$\mathbf{Q}_{\nabla\nabla,k} = \mathbf{F}_k \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{\mathbf{x}_{O,1},\mathbf{x}_{O,1}} & \mathbf{Q}_{\mathbf{x}_{O,1},\mathbf{x}_{O,2}} \\ \mathbf{Q}_{\mathbf{x}_{O,2},\mathbf{x}_{O,1}} & \mathbf{Q}_{\mathbf{x}_{O,2},\mathbf{x}_{O,2}} \end{bmatrix} \mathbf{F}_k^T - \text{kofaktor matrica pomaka}$$

$$\mathbf{F}_k = [0 \quad \dots \quad 0 \quad -\mathbf{I}_k \quad 0 \quad \dots \quad 0 \quad \mathbf{I}_k \quad 0 \quad \dots \quad 0].$$

Ako je

$$T_{prio,k} < F_{m,\infty} \text{ ili } T_{post,k} < F_{m,f-m} \quad (16)$$

onda se nulta hipoteza prihvata, odnosno tačke su stabilne, u suprotnom se prihvata alternativna hipoteza.

4 REZULTATI, ANALIZA I DISKUSIJA

Simulirani pomaci na tačkama T2, T3 i T4 su određeni s tačnošću od 1 mm i dati su u Tabeli 7.

Tabela 7

Veličina simuliranih pomaka po komponentama

Tačka	δy [mm], "east"	δx [mm], "north"	δz [mm], "up"
T2	8	-19	12
T3	24	6	11
T4	30	11	11

Tabela 8

Pomaci na osnovu GPS L1 vektora

Tačka	y [mm]	x [mm]	z [mm]	σ_y [mm]	σ_x [mm]	σ_z [mm]	Komentar
T1	0	1	1	0,7	0,8	4,7	Stabilna
T2	12	-24	1	4,9	5,3	12	Stabilna
T3	21	8	-10	3,7	4,4	8,7	Stabilna
T4	29	8	-6	3,2	3,5	9,3	Nestabilna
T5	-1	-4	4	1,9	2,4	9,8	Stabilna
T6	-3	-1	5	1,6	1,8	10,6	Stabilna
T7	3	1	-1	1,7	2,2	9,6	Stabilna

Nakon izvršene analize rezultata izravnjanja utvrđeno je da virtualne referentne stanice loše utiču na konačne rezultate, te su iz tog razloga izbačene iz dalje obrade. Pomaci su određeni na osnovu tri varijante. Prva varijanta vektora pomaka dobijena je korištenjem samo GPS L1 frekvencije kod obrade vektora. Druga varijanta vektora pomaka dobivena je korištenjem GPS L1+L2, dok je treća varijanta vektora pomaka dobivena obradom svih raspoloživih frekvencija sa svih satelita GPS+GLONASS. Kao datumska tačka u svim varijantama izabrana je EUREF permanentna stanica SRJV.

U Tabeli 8 su prikazani rezultati deformacijske analize za varijantu GPS L1.

Vidljivo je da je pomak otkriven samo na tački T4, dok na druge dvije tačke nisu otkriveni pomaci (gdje su simulirani pomaci). Obzirom da nisu otkriveni pomaci na tačkama T2 i T3, nisu se uspoređivali rezultati sa simuliranim pomacima. Ova varijanta je odbačena iz dalje analize.

Tabela 9

Pomaci na osnovu GPS L1+L2 vektora

Tačka	y [mm]	x [mm]	z [mm]	σ_y [mm]	σ_x [mm]	σ_z [mm]	Komentar
T1	1	1	0	0,5	0,6	2,4	Stabilna
T2	14	-23	2	3,0	3,2	7,1	Nestabilna
T3	21	8	9	1,4	1,6	3,1	Nestabilna
T4	30	8	4	1,5	1,7	3,8	Nestabilna
T5	-1	-6	-7	1,5	1,8	4,8	Stabilna
T6	-2	-1	0	1,4	1,6	5,7	Stabilna
T7	2	0	-1	1,4	1,8	5,9	Stabilna

Kada su pomaci izračunati sa vektorima dobivenim na osnovu obrade dvofrekventnih GPS mjerenja rezultati su se značajno poboljšali (Tabela 9). Standardne devijacije tačaka T1, T5, T6 i T7 (tačke blizu kontaktne mreže za trolejbusa) ne odstupaju značajnije od standardnih devijacija ostalih tačaka. U Tabeli 10 je data usporedba GPS L1+L2 i simuliranih pomaka.

Tabela 10

Razlike u pomacima određenim GPS L1+L2 varijantom i simuliranih pomaka

Tačka	GPS L1+L2			Simulirani			Razlike		
	δy [mm]	δx [mm]	δz [mm]	δy [mm]	δx [mm]	δz [mm]	δy [mm]	δx [mm]	δz [mm]
T2	14	-23	2	8	-19	12	6	4	10
T3	21	8	9	24	6	11	3	2	2
T4	30	8	4	30	11	11	0	3	7

Na kraju su pomaci određeni i sa trećom varijantom (Tabela 11). I u ovoj varijanti su pomaci otkriveni na tačkama T2, T3 i T4. Razlika u odnosu na prethodnu varijantu je prije svega u tome što su pomaci po visini, odnosno "up" komponenti, puno bolje određeni (ako se usporede sa simuliranim pomacima kao referentnim vrijednostima).

Tabela 11

Pomaci na osnovu GNSS vektora

Tačka	y [mm]	x [mm]	z [mm]	σ_y [mm]	σ_x [mm]	σ_z [mm]	Komentar
T1	1	1	2	0,5	0,6	2,2	Stabilna
T2	17	-24	9	2,4	2,7	5,8	Nestabilna
T3	20	8	13	1,3	1,5	2,8	Nestabilna
T4	30	8	12	1,8	1,8	4,2	Nestabilna
T5	-1	-5	2	1,4	1,7	4,2	Stabilna
T6	-2	-1	7	1,3	1,5	4,8	Stabilna
T7	2	2	4	1,6	1,9	5,3	Stabilna

Također, kao i u prethodnoj varijanti, vrijedi zaključak da standardne devijacije tačaka T1, T5, T6 i T7, ne odstupaju značajnije od standardnih devijacija ostalih tačaka. U Tabeli 12 je data usporedba GNSS varijante i simuliranih pomaka.

Tabela 12

Razlike u pomacima određenim GNSS varijantom i simuliranih pomaka

Tačka	GNSS			Simulirani			Razlike		
	δy [mm]	δx [mm]	δz [mm]	δy [mm]	δx [mm]	δz [mm]	δy [mm]	δx [mm]	δz [mm]
T2	17	-24	9	8	-19	12	9	5	3
T3	20	8	13	24	6	11	4	2	2
T4	30	8	12	30	11	11	0	3	1

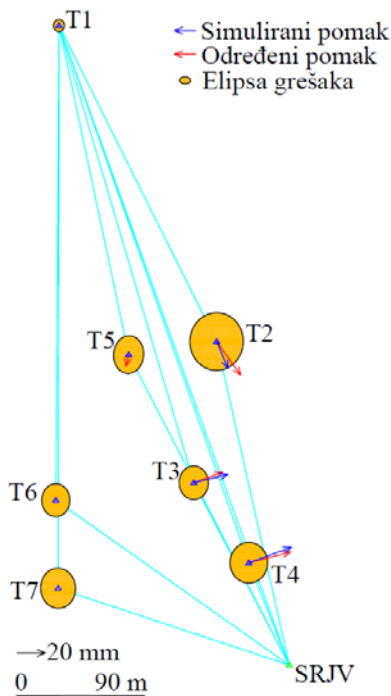
Analiza rezultata pojedinačnih varijanti:

Varijanta 1, GPS L1. Pomaci određeni pomoću ove varijante su prilično upitni. Standardne devijacije tačaka su prilično velike, npr. za "up" komponentu idu i preko 10 mm. I druge dvije komponente imaju veće standardne devijacije, do 5,3 mm. Što se tiče pomaka, samo je otkriven pomak na jednoj tački T4 (najveći simulirani), dok na druge dvije tačke nisu otkriveni pomaci. Zato nije rađena ni usporedba sa simuliranim pomacima. Spomenuta varijanta se ne može koristiti u većini projekata određivanja pomaka i deformacija gdje se traži visoka preciznost.

Varijanta 2, GPS L1+L2. Pomaci određeni pomoću ove varijante su prilično dobri. Standardne devijacije tačaka su oko 5 mm (najveće za "up" komponentu do 7,1 mm), dok su standardne devijacije za druge dvije komponente manje od 3,2 mm. Najveće standardne devijacije su za tačku T2 (nalazi se na mjestu sa zaklonjenim horizontom i puno reflektujućih površina). Što se tiče pomaka, otkriveni su statistički značajni pomaci na svakoj tački na kojoj su i izazvani pomaci, dok na drugim tačkama nisu otkriveni pomaci. Urađena je usporedba sa simuliranim pomacima iz koje možemo vidjeti da je najveća razlika po položaju ponovo za tačku T2 i iznosi 6 mm. Interesantno je da su razlike visina za sve tačke za koje je utvrđen pomak relativno velike i iznose od 2 do 10 mm. Ipak možemo zaključiti da su se rezultati dobiveni na osnovu druge varijante značajno poboljšali u odnosu na prvu varijantu. Spomenuta varijanta se može koristiti u projektima određivanja pomaka i deformacija gdje se traži preciznost od 1cm.

Varijanta 3, GNSS. Pomaci određeni pomoću ove varijante su najbolji. Standardne devijacije tačaka su gotovo sve manje od 5 mm (najveće za "up" komponentu do 6 mm), dok su standardne devijacije za druge dvije komponente manje od 2,7 mm. Najveće standardne devijacije su za tačku T2 (vrijedi isti komentar kao i kod varijante 2). Što se tiče pomaka, otkriveni su statistički značajni pomaci na svakoj tački na kojoj su i izazvani pomaci, dok na drugim tačkama nisu otkriveni pomaci. Poslije provedene usporedbe sa simuliranim pomacima možemo vidjeti da je najveća razlika po položaju ponovo za tačku T2 i iznosi 9 mm. Interesantno je da razlike visina za sve tačke imaju male iznose do 3 mm. Može se zaključiti da su rezultati dobiveni na osnovu treće varijante bolji u odnosu na drugu, i značajno bolji u odnosu na prvu varijantu. Spomenuta varijanta se može koristiti u većini projekata određivanja pomaka i deformacija gdje se traži preciznost od 5 mm. Navedeni komentar vrijedi uz pretpostavku da su uslovi mjerenja odlični da imamo dovoljan broj satelita, mali GDOP, da nema reflektujućih površina u blizini tačke i da imamo otvoren horizont. Dakle, odabrana je treća varijanta.

Određeni pomaci na osnovu **varijante 3**, skupa sa elipsama grešaka prikazani su na Slici 5. Sa slike se jasno vidi da se vektor pomaka na tačkama T2, T3 i T4 ne nalazi u elipsi grešaka. Za razliku od ove tri tačke, vektor pomaka na ostalim tačkama se nalazi u elipsi grešaka, što sugerira da su spomenute tri tačke nestabilne (pomaci tačaka dati u Tabeli 11, kolona 2, 3 i 4), a ostale stabilne. Određeni pomaci pomoću varijante 3, za tačke T3 i T4 su skoro identični simuliranim pomacima (manje od 4 mm, po komponentama). Pomaci se razlikuju najviše za tačku T2 (za $\delta y = 9$ mm). To je prvenstveno zbog samog položaja tačke T2 koja se nalazi na mjestu koje nije pogodno za GNSS mjerenja. Tačka se nalazi na mjestu sa zaklonjenim horizontom i puno reflektujućih površina koje izazivaju multipath efekat.



Slika 5. Pomaci, varijanta 3, GNSS

5 ZAKLJUČAK

Primjena GNSS tehnologije u određivanju pomaka i deformacija itekako je moguća. Prvo pitanje koje se mora postaviti jeste "kolika je tražena tačnost određenog pomaka"? Naime ukoliko se želi postići visoka preciznost, onda je to svakako veoma teško primjenom samo GNSS tehnologije i bez primjene najstrožijih standarda u postupku mjerenja, obradi i analizi rezultata mjerenja.

Za tačke je potrebno birati pogodna mjesta. U testnom primjeru vidljivo je da se rezultati najviše razlikuju na tački T2. To je prvenstveno zbog samog položaja tačke T2 koja se nalazi na mjestu koje nije pogodno za GNSS mjerenja. Tačka se nalazi na mjestu sa zaklonjenim horizontom i puno reflektujućih površina koje izazivaju multipath efekat.

Interesantna je činjenica da u testnoj mreži prijemnici na tačkama (T1, T5, T6 i T7), koje su blizu kontaktne mreže za trolejbus, nisu pokazali značajnije odstupanje rezultata od ostalih tačaka sa aspekta smetnji prilikom prijema signala.

Rezultati dobijeni pomoću varijante GPS L1 su upitni jer nisu otkriveni pomaci na svim tačkama. Pomak je otkriven samo na jednoj tački (T2, pomak veći od 30 mm)

Pomaci određeni pomoću varijante GPS L1+L2 su dobri, otkriveni su pomaci na svakoj tački na kojoj su i izazvani pomaci. Srednje vrijednosti razlika određenih i simuliranih pomaka su po komponentama: 3 mm, 3 mm i 6 mm.

Pomaci određeni pomoću varijante GNSS su najbolji. Standardne devijacije tačaka su gotovo sve manje od 5,8 mm (visina), dok su standardne devijacije za druge dvije komponente manje od 2,7 mm. Poslije provedene usporedbe vidi se da su srednje vrijednosti razlika određenih i simuliranih pomaka po komponentama: 4 mm, 3 mm i 2 mm. Zanimljiva je činjenica da se pomaci više razlikuju po položaju nego po visini.

Period od dva sata mjerenja je očigledno dovoljan (za varijante GPS L1+L2 i GNSS) da se odrede pomaci s tačnošću od 1 cm, čak i boljom.

LITERATURA

Gu, G., (2013). *Advantages of GNSS in Monitoring Crustal Deformation for Detection of Precursors to Strong Earthquakes*. Positioning. DOI: 10.4236/pos.2013.41003.

Leica-geosystems, (2020, 10. juli). *Leica GR50 & GR30 GNSS Reference Server*. Dostupno na: https://hds.leica-geosystems.com/en/Leica-GRX1200-Series_5547.htm

Leica-geosystems, (2020, 17. juli). *Leica AR25 GNSS Antenna*. Dostupno na: <https://leica-geosystems.com/products/gnss-reference-networks/antennas/leica-ar25>

Lösler, M. (2020, 7. septembar). *Java·Applied·Geodesy·3D*. Dostupno na: <https://software.applied-geodesy.org/en/>

Lösler, M. (2020, 21. septembar). *Prüfung auf Modellstörungen*. Dostupno na: <https://software.applied-geodesy.org/wiki/least-squares-adjustment/outlier>

Lösler, M. (2020, 21. septembar). *Deformationsanalyse*. Dostupno na: <https://software.applied-geodesy.org/wiki/least-squares-adjustment/deformationanalysis>

Levent, T. (2008). Dam deformation measurements with GPS. *Geodezija ir Kartografija* 34(4), 116-121. DOI: 10.3846/1392-1541.2008.34.116-121.

Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Collins, J. (2001). *Global Positioning System: Theory and Practice*. (5th ed.) Wien: Springer-Verlag.

Mulić, M., Silnović, A., Krdžalić, D. (2020). Accuracy Analysis of the Heights in Reference Networks in Bosnia and Herzegovina. U S. Avdaković, A. Mujčić, A. Mujezinović, T. Uzunović,

I. Volić (ur.), *Advanced Technologies, Systems, and Applications IV -Proceedings of the International Symposium on Innovative and Interdisciplinary Applications of Advanced Technologies (IAT 2019), IAT 2019, Lecture Notes in Networks and Systems, vol 83*. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-24986-1_16

Piras, M., Roggero, M., Fantino, M. (2009). Crustal Deformation Monitoring by GNSS: Network Analysis and Case Studies. *Advances in Geosciences, Volume 13: Solid Earth (SE)*, 87-103, DOI: 10.1142/9789812836182_0007.

Sušić, Z., Batilović, M., Ninkov, T., Aleksić, I., Bulatović, V. (2015). Identification of movements using different geodetic methods of deformation analysis. *Geodetski vestnik*, 59(3), 537-553. DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2015.03.537-553.

Trimble survey division (2020, 21. septembar). *Trimble hd-gnss processing*. Dostupno na: http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-629483/022543-550_Trimble%20HD-GNSS%20White%20Paper%20-%20English.pdf

Autori:

Doc. dr. sc. Esad Vrce, dipl. inž. geod.

Građevinski fakultet, Univerzitet u Sarajevu
Patriotske lige 30, 71000 Sarajevo
Bosna i Hercegovina
E-mail: esad_vrce@gf.unsa.ba

Doc. dr. sc. Džanina Omićević, dipl. inž. geod.

Građevinski fakultet, Univerzitet u Sarajevu
Patriotske lige 30, 71000 Sarajevo
Bosna i Hercegovina
E-mail: dzanina.omicevic@gf.unsa.ba

Viši asist. Dževad Krdžalić, dipl. inž. geod.

Građevinski fakultet Univerziteta u Sarajevu
Patriotske lige 30, Sarajevo
Bosna i Hercegovina
E-mail: dzevadkrdzalic@gmail.com