

ISPITIVANJE TAČNOSTI ROBOTIZOVANE TOTALNE STANICE TRIMBLE S5

TESTING THE ACCURACY OF THE ROBOTIC TOTAL STATION TRIMBLE S5

Jovan Bačić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – GEODEZIJA I GEOINFORMATIKA

Kratak sadržaj – U okviru teorijskih osnova master rada obrađene su metode za merenje i greške koje se javljaju pri merenju horizontalnih pravaca i dužina. Takođe, opisana je konstrukcijski korišćena totalna stanica i odgovarajući postupak ispitivanja i rektifikacije totalne stanice, kao i primenjeni matematički modeli obrade podataka realizovanih merenja. U okviru praktičnog primera izvršena je obrada podataka i prikaz rezultata u vidu numeričkih, grafičkih i tabelarnih priloga..

Ključne reči: Girusna metoda, Robotizovana totalna stanica, MNK, JAG3D.

Abstract – As part of the theoretical foundations of the master's thesis, methods for measurement and errors that occur during the measurement process of horizontal directions and lengths are covered. Also, the constructionally used total station and the appropriate procedure for testing and rectifying the total station are described and the applied mathematical models for data processing of the measurements. In the practical example, the collected data were processed and the results were presented as numerical, graphic, and tabular appendices.

Keywords: Gyrus method, Robotic total station, LSA, JAG3D.

1. UVOD

Za poslove inženjerske geodezije, totalne stanice su danas nezamenljivi instrumenti sa mnoštvom pogodnosti i pomoćnih opcija koje prvenstveno olakšavaju i višestruko ubrzavaju obavljanje poslova. Postoji novi napredak u geodetskoj industriji sa dodatkom robotizovane totalne stanice, kojom se može upravljati na daljinu, što znači da je potreban samo jedan operater na terenu, a ne tradicionalni tim od dve osobe, odnosno geodete i pomoćnika. Aktiviranjem samo jednog funkcijskog tastera može se izvršiti više različitih funkcija (izmeri se kosa dužina, na ekranu se prikaže kosa i hor. dužina i visinska razlika, sračunaju se koordinate vizurne tačke...).

Podaci koji su dobijeni za potrebe ovog master rada su snimljeni pomoću robotizovane totalne stanice Trimble S5. Lokacija izvođenja eksperimentalnih istraživanja je Univerzitetski kampus, tačnije Trg Dositeja Obradovića 3. Cilj ovog rada je da se dobiju nezavisna merenja ispitivanja robotizovane totalne stanice pre i nakon kalibracije instrumenta, a da se zatim uz pomoć formula izračunaju i uporede vrednosti snimanja.

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Marko Marković, vanr. prof.

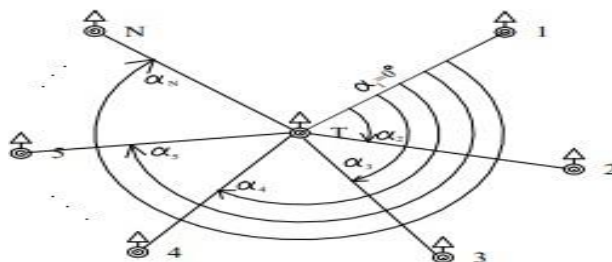
2. METODE I PRINCIPI MERENJA HORIZONTALNIH PRAVACA I DUŽINA

2.1. Metode merenja horizontalnih pravaca

Postoji više postupaka rada, odnosno različitih metoda merenja horizontalnih uglova. One se razlikuju po tačnosti i ekonomičnosti, a to su: prosta, girusna, Šrajberova, Francuska, Švajcarska, metoda zatvaranja horizonta, metoda dvostrukih kombinacija itd. U radu će biti objašnjena samo girusna metoda.

2.1.1. Girusna metoda

Girusna metoda predstavlja metodu merenje uglova u oba položaja durbina. Opažaju se pravci, a uglovi se dobijaju kao razlike vrednosti odgovarajućih pravaca (Slika 1.). Pre početka merenja, mora se odabrati tačka za početnu vizuru. U trigonometrijski obrazac br.1 (T.O.1), upisuju se topografske oznake, brojevi tačaka i ostali podaci (datum, vreme, podaci o instrumentu i dr.). U prvom girusu, u I položaju durbina opažaju se pravci u smeru kretanja kazaljke na satu, redom od početne tačke 1 do poslednje N, a na kraju se uzima završna vizura na početnoj tački 1 u cilju kontrole. U II položaju durbina, opažanja se obavljaju suprotno kretanju kazaljke na satu, polazeći od početne tačke 1 na kojoj se obavlja merenje u cilju kontrole, a zatim slede redom opažanja pravaca ka ostalim tačkama od N do 1.



Slika 1. Girusna metoda

Za svaki mereni pravac u I i II položaju durbina, računa se dvostruka kolimaciona greška po formuli:

$$2C = (II \pm 180^\circ) - I = (KD \pm 180^\circ) - KL \quad (1)$$

Ukoliko ona prelazi dozvoljeno odstupanje, merenja se trebaju ponoviti, a ukoliko je u dozvoljenim granicama, računa se srednja vrednost opažanog pravca. Na vrednost čitanja podele u I položaju durbina algebarski se doda vrednost kolimacione greške C. Redukovana sredina se dobija kada se od vrednosti sredine pravaca oduzme sredina početnog pravca po formuli:

$$\text{Red_sredina}_i = \text{Sredina}_i - \text{Sredina}_1 \quad (2)$$

Potrebni uglovi se dobijaju razlikom redukovane sredine levog i desnog pravca po formuli:

$$\text{Ugao} = \text{Red_sredina}_{\text{levi}} - \text{Red_sredina}_{\text{desni}} \quad (3)$$

2.2. METODE MERENJA DUŽINA

Osnovni princip merenja dužina baziran je na merenju vremena prostiranja elektromagnetne oscilacije, čija je brzina poznata, kako bi se odredio pređeni put tj. izmerilo rastojanje, na osnovu formule:

$$S = \frac{v \cdot \Delta t}{2} \quad (4)$$

Fazni metod rastojanja se uglavnom koristi u geodeziji. Pomoću njega se mere dužine sa visokom tačnošću. Ne meri se vreme neposredno, kao što je slučaj kod impulsnog načina merenja, nego se određuje razlika faze modulacije u predajniku i prijemniku, u slučaju kada je osnovni signal prešao dvostruko rastojanje daljinomer-reflektor. Kod impulsnog načina merenja rastojanja, neposredno se meri vreme koje je potrebno da emitovani talas pređe dvostruko dužinu merenog rastojanja. Pošto je brzina prostiranja elektromagnetnih talasa vrlo velika, to je vreme za koje talasa pređu veliko rastojanje za kratko vreme [1].

3. GREŠKE PRI MERENJU TOTALNOM STANICOM

3.1. Greške pri merenju dužina elektrooptičkim daljinomerima

1. Greška jedinice mere i brzine svetlosti u vakumu
2. Greške koje potiču od instrumenta (periodična i aperiodična greška, centrisanje i nestabilnost instrumenta, određivanje adicione konstante...)
3. Greške koje potiču od reflektora (centrisanje i nestabilnost signala, greška orijentacije signala)
4. Greške izazvane spoljašnjim uslovima (refleksija talasa, nedovoljna jačina signala...)

Greške se mogu podeliti prema [1]:

1. Izvoru nastanka (instrumentalne, greške operatera, greške uticaja spoljne sredine)
2. Zakonitosti pojave (grube, sistematske, slučajne)
3. Značaju uticaja na merenje

3.2. Greške pri merenju horizontalnih uglova

1. Greške vezane za teodolit (greške limba, kolimacija, centrisanje i nestabilnost instrumenta, ekscentricitet vizure/centra hor.limba/obrtne ose limba, pomeranje limba pri okretanju alhidade...)
2. Greške vezane za signal za viziranje (torzija, greška centrisanja signala, nestabilnost signala)
3. Greške operatera (greška viziranja)
4. Greške izazvane spoljnim uslovima (refrakcija, treperenje vazduha, uticaj temperature)

4. ISPITIVANJE I REKTIKACIJA USLOVA KOD TOTALNE STANICE

Svi geodetski instrumenti koji se koriste u merenju, pre same upotrebe moraju proći detaljnu kontrolu kvaliteta i ispravnosti, kako bi bili sigurni u kvalitet dobijenih podataka. Pregled i kontrola geodetskih instrumenata se vrši u ovlašćenim metrološkim laboratorijama, dok ispitivanje i rektifikaciju sprovodi sam korisnik na terenu.

4.1. Podešavanje totalne stanice

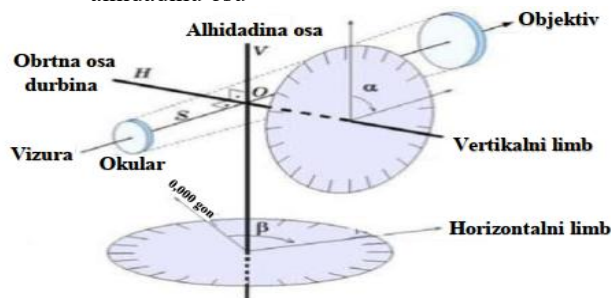
Glavne ose totalne stanice su: osa cevaste libele (OL), alhidadina osa (AO), vizurna osa (VIZ) i obrtna osa durbina (OO). Uslovi koje totalna stanica mora da ispuni prilikom rada su: uslovi za horizontalne i vertikalne

uglove, optički i laserski viskovi, adiciona i multiplikaciona konstanta.

4.1.1. Uslovi za horizontalne uglove

Pri merenju horizontalnih pravaca, horizontalni limb mora biti u horizontalnoj ravni, a vertikalni limb u vertikalnoj ravni. Uslove koje je potrebno ispuniti (Slika 2.) :

1. Osa libele mora biti upravna na alhidadinu osu
2. Vizura mora biti upravna na obrtnu osu durbina
3. Vertikalna crta končanice treba da je zaista vertikalna
4. Obrtna osa durbina mora biti upravna na alhidadinu osu



Slika 2. Glavna ose totalne stanice [2]

4.1.2. Uslovi za vertikalne uglove

Totalne stanice imaju vertikalni limb koji se koristi za merenje vertikalnih ili zenitnih uglova. Obrtna osovina i vertikalni limb moraju biti strogo centrični, tako da se centar podele limba nalazi tačno na obrtnoj osi durbina. Nepomičnost indeksa za čitanje podele vertikalnog limba se postiže pomoću cevaste libele. Prilikom čitanja podele vertikalnog limba mora se dovesti mehur libele da vrhuni.

5. TOTALNA STANICA

Tahimetri ili totalna stanica (engl. *Total Station*) su instrumenti kojima se mere horizontalni, vertikalni uglovi i kose dužine. Osnovna svojstva su domet, brzina i tačnost. Dele se na: jednostavne električne, standardne električne, univerzalne električne i precizne električne. Sastavni delovi totalne stanice su: ručka za nošenje, oznaka visine instrumenta, baterija, korekcionni zavrtnji, sferna libela, displej, objektiv, prsten za fokusiranje, poklopac končanice, okular optičkog viska i durbina, mikrometerski zavrtnj alhidade i durbina, cevasta libela, prsten za unutrašnje fokusiranje durbina, optički nišan itd.

5.1. Glavne komponente totalne stanice

- Elektronski teodolit – komponenta za merenje pravaca i uglova
- Elektronski daljinomer (EDM – komponenta za merenje dužina)
- Mikroprocesor – uređaj za određivanje tačaka čije su koordinate nepoznate, vertikalnih dužina, visinskih razlika, visina nepristupačnih objekata [3]

5.2. Robotizovana totalna stanica Trimble S5

Trimble S5 je robotizovana totalna stanica koja se koristi u inženjerskoj geodeziji. Bazirana je na Trimble tehnologijama, odnosno Trimble, SurePoint u MagDrive, kao i daljinomeru DR Plus EMD. Proizvodi se u Autolock verziji, koja omogućava automatsko traženje prizme, kao i Robotic verziji, koja omogućava automatski rad i ne zahteva da uz stanicu bude prisutan operater [4].

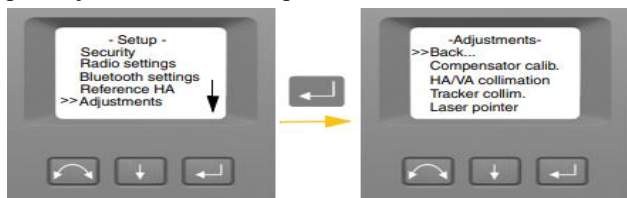
Tabela 1. Specifikacije totalne stanice Trimble S5

Tačnost merenja uglova	1"
Minimalno čitanje	0.1"
Merenje dužine	1mm+2ppm na prizmu, 2mm+2ppm bez prizme
Vreme merenja	1.2sek na prizmu, 1-5sek bez prizme
Domet merenja	0.2m-2500m sa prizmom, 1m-1300m bez prizme
Rasipanje zraka	Horizontalno 4cm/100m, vertikalno 8cm/100m
Rotacija durbina	2.6sek
Vidno polje durbina	2.6m na 100m
Vreme lociranja prizme	< 3sek
Vreme određivanja pozicije prizme	15-30sek
Autolock preciznost na 100m	< 2mm

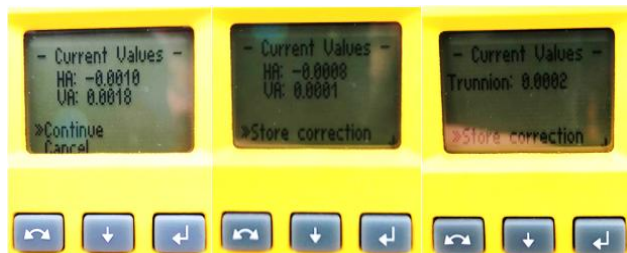
5.2.1 Postupak ispitivanja i rektifikacija

Kalibracija se vrši u njenom meniju za podešavanje (engl. *Adjustment Menu*), koji je prikazan na slici 3. Da bi se počelo sa postupkom kalibracije kompezatora (engl. *Compensator calibration*), neophodno je da instrument bude centrisan, a nakon toga instrument automatski proverava da li je kompenzator u dometu. Ova kalibracija kalibriše elektronski nivo za očitavanje kada se instrument okreće. Vrednosti horizontalne i vertikalne kolimacije (engl. *HA/VA collimation*) i korekcija nagiba ose ugla (engl. *Trunnion*) su izmerene i sačuvane u instrumentu u fabrici. U novom instrumentu vrednosti bi trebale biti blizu nule. *Trunnion* predstavlja nagib obrtne ose durbina u odnosu na alhidadinu osu. Na slici 4 su prikazane vrednosti ovih kolimacija pre i posle kalibracije.

Autolock collimation je jedinica koja je namenjena praćenju instrumenta, a dizajnirana je tako da je koaksijalna sa poprečnom osom instrumenta. Test se vrši na udaljenosti ne manjoj od 100 m. Prizma treba da bude mirna dok test traje i da je ona odlično vidljiva bez ikakvih ometanja. Instrument se tačno usmeri u horizontalni i vertikalni centar prizme. Kalibracija se sprovodi da bi se ispravio položaj svih tačaka izmerenih uz pomoć ove funkcije. Instrument će automatski izmeriti prizmu u oba položaja durbina, a zatim prikazati trenutne vrednosti.



Slika 3. Meni za podešavanje kalibracije [4]



Slika 4. Vrednosti HA/VA kolimacije i nagiba ose ugla

6. MATEMATIČKI MODEL IZRAVNANJA 2D GEODETSKIH MREŽA

6.1 Uvod

Osnovne komponente metoda izravnjanja su: merene veličine, stohastički i funkcionalni model, algoritam izravnjanja, ocene parametara, ocena tačnosti i kontrola kvaliteta. Ocena tačnosti dobijenih rezultata iz izravnjanja obavlja se nakon primene algoritma izravnjanja. Najčešće se koriste sledeće metode izravnjanja po metodi: posrednih merenja, uslovnih merenja, uslovnih merenja sa nepoznatim parametrima i posrednih merenja kada su parametri u određenim matematičkim uslovima.

6.2 Stohastički model

Stohastički model je identičan za sve metode izravnjanja jer se odnosi na vektor merenih veličina l . Kada su merene veličine u geodetskim mrežama stohastički zavisne, onda treba koristiti kovarijacionu matricu K_l ili matricu kofaktora Q_l .

$$K_l = \sigma_0^2 \cdot Q_l \quad (5)$$

gde je σ_0 standardna devijacija jedinice težine (a priori standardna devijacija) merenih veličina. Kada su merene veličine stohastički nezavisne, onda su svi elementi van glavne dijagonale matrice K_l jednaki nuli, pa se koristi matrica težina merenih veličina P_l po formuli:

$$P_l = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_l^2} \quad (6)$$

gde je σ_l a priori varijansa opažanja l_i [5].

6.3 Funkcionalni model

Definiše funkcionalnu vezu između merenih veličina l i nepoznatih parametara X . U opštem slučaju funkcije veze su nelinearne i pišu se u implicitnom vektorskom obliku:

$$\hat{l} = l + v = F(\hat{X}) \quad (7)$$

gde je $\hat{l}$ vektor izravnatih veličina, l vektor merenih veličina, v vektor popravaka merenih veličina, $F(\hat{X})$ vektor nelinearnih matematičkih funkcija, $\hat{X}$ vektor izravnatih parametara [5]. Broj merenja n je uvek veći od broja nepoznatih parametara u . Razlika $f = n - u$ definiše se kao broj stepeni slobode, odnosno broj suvišnih merenja. Nelinearne funkcije veze linearizuju se razvojem u Tejlorov red u okolini približnih vrednosti nepoznatih parametara [6]:

$$l_i + v_i = a_{ij}\Delta x_1 + \dots + a_{iu}\Delta x_u + l_i^0 \quad (8)$$

$$v_i = a_{ij}\Delta x_1 + \dots + a_{iu}\Delta x_u + f_i \quad (9)$$

gde su v_i popravke merenih veličina, l_i^0 približne vrednosti merenih veličina, $f_i = l_i^0 - l_i$ slobodni članovi, a_{ij} koeficijenti koji se dobijaju diferenciranjem funkcija veze po nepoznatim parametrima:

$$a_{ij} = \frac{\partial F_i}{\partial X_j}, j \in \{1, 2, \dots, u\}.$$

Jednačine popravaka mogu se predstaviti u matričnom obliku:

$$v = Ax + f \quad (10)$$

6.4 Algoritam izravnjanja – Metod najmanjih kvadrata

Sistemi linearnih jednačina koji se formiraju u okviru funkcionalnih modela sadrže vektor popravaka v i vektor

nepoznatih parametara $\hat{x}$. Primenom MNK obezbeđuju se jednoznačni rezultati primenom uslova minimuma:

$$v^T P_1 v = \min \rightarrow \text{nezavisne merene veličine} \quad (11)$$

$$v^T Q_1^{-1} v = \min \rightarrow \text{zavisne merene veličine} \quad (12)$$

gde je: v vektor popravaka merenih veličina, P_1 matrica težina merenih veličina, Q_1 matrica kofaktora merenih veličina. Na osnovu optimizacije uslova, dobijaju se normalne jednačine [6]:

$$N\hat{x} + n = 0 \rightarrow \hat{x} = -Q_x n \quad (13)$$

gde je N matrica koef. normalnih jednačina, a n vektor koef. slobodnih članova normalnih jednačina. Rešavanjem sistema normalnih jednačina određuje se vektor prirastaja nepoznatih parametara:

$$\hat{x} = -N^{-1} n \quad (14)$$

gde je Q_x kofaktorska matrica nepoznatih parametara. Određuju se kofaktorska matrica izravnatih merenih veličina Q_i i popravaka merenih veličina $Q_{\hat{v}}$, prema:

$$Q_i = A(A^T P_1 A)^{-1} A^T \quad (15)$$

$$Q_{\hat{v}} = Q_1 - (A^T P_1 A)^{-1} A^T \quad (16)$$

A posteriori disperzioni koef. koji predstavlja najbolju procenu a priori disperzionog faktora određuje se kao:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{v^T P_1 v}{f} \quad (17)$$

7. JAG3D

Za izravnjanje mreže korišten je besplatan tzv. *open-source* (OS) softver JAG3D. To je jedan od najpopularnijih OS softvera za izravnjanje geodetskih mreža. Mogu se kombinovati različita merenja poput nivelmana, merenja pravaca, dužina, vertikalnih uglova i GNSS vektora. Omogućava izravnjanje u 1D, 2D i 3D sistemu. Nezavisan je od operativnog sistema i nema instalacije. Unos merenja se vrši pomoću običnog tekstualnog fajla. Izravnjanje se vrši metodom najmanjih kvadrata (MNK) po *Gauss-Markovom* modelu koji se smatra standardnim modelom u izravnjanju geodetskih mreža. Glavni uslov je da suma kvadrata popravaka bude minimalna (formula 11.). U radu je izvršeno 2D izravnjanje geodetske mreže.

8. PRAKTIČAN PRIMER

Na terenu je razvijena mreža (Slika 5.) čije tačke predstavljaju temena trougla. Opažanje je izvršeno girusnom metodom u tri girusa. Korišćena je robotizovana totalna stanica *Trimble S5*, koja je centrisana i horizontirana na jednoj tački, dok su na druge dve tačke postavljene prisilno centrisane prizme, koristeći drajfuse. Nakon završetka opažanja sa sve tri tačke, izvršena je kalibracija, potom se nastavilo sa opažanjem tačaka sa poslednje stanice, odnosno u suprotnom smeru nego pre kalibracije instrumenta.



Slika 5. Skica 2D mreže

9. ANALIZA REZULTATA

Parametri pouzdanosti prikazani na slici 6., zadovoljavaju zahteve u pogledu tačnosti, odnosno dobijena je dobra kontrola za deset merenja, stim da je samo za dva merenja pravaca dobijena dovoljna kontrola jer se koeficijent r nalazi u opsegu $0.10 \leq r < 0.30$.

Stanica	Vizura	Pravci				Dužine			
		Q_{α} [mm ²]	Q_{β} [mm ²]	r	G	Q_{α} [mm ²]	Q_{β} [mm ²]	r	G
3	2	0.32825	0.67175	0.34	4.81	0.72473	0.27527	0.70	3.35
3	1	0.21036	0.67175	0.38	4.55	0.74500	0.25500	0.71	3.33
2	1	0.25928	0.74072	0.41	5.03	0.73238	0.26762	0.67	3.42
2	3	0.25928	0.74072	0.20	6.27	0.72473	0.27527	0.70	3.35
1	3	0.21036	0.78964	0.18	6.60	0.74500	0.25500	0.71	3.33
1	2	0.21036	0.78964	0.33	4.88	0.73238	0.26762	0.67	3.42

Slika 6. Ocena i kriterijumi kvaliteta i tačnosti projektovanih pravaca i dužina

Tačka	σ_y [mm]	σ_x [mm]	σ_p [mm]	A [mm]	B [mm]	θ [°]	A/B
1	0.17	0.16	0.23	0.638	0.495	177.01955	1.289
2	0.17	0.14	0.22	0.713	0.457	10.84565	1.562
3	0.08	0.09	0.12	0.754	0.514	167.84999	1.467

Slika 7. Ocena tačnosti i elementi standardne elipse grešaka

Na osnovu sračunatih vrednosti parametara elipse grešaka prikazanih na slici 7, može se zaključiti da elipse teže krugovima, odnosno $A/B \rightarrow 1$. Na osnovu zadatih (teorijskih) vrednosti kriterijuma kvaliteta i tačnosti projektovanih pravaca i dužina, može se zaključiti da parametri zadovoljavaju zahteve u pogledu tačnosti.

10. ZAKLJUČAK

Obradom podataka utvrđeno je da ne postoji greška nezatvaranja trouglova i dvostruka kolimaciona greška, zato što je neposredno pre merenja izvršena kalibracija, čime je omogućeno da se prilikom realizacije merenja automatski uvođe popravke merenja horizontalnih i vertikalnih uglova. Takođe, merenja su izvršena u idealnim uslovima (dan je bio bez kiše i vetra), dužine vizura su iznosile od 80m do 120m, nije bilo ometanja od strane prolaznika i vozila u saobraćaju, stativi za prisilno centrisanje prizme su postavljeni na čvrstoj i stabilnoj podlozi. Glavni razlog dobrih rezultata merenja je to što se za realizaciju merenja koristio nov i veoma precizan instrument, tačnosti od 1".

11. LITERATURA

- [1] Mihajlović, K., „Geodezija II“, Zavod za udžbenike, Beograd, 2008.
- [2] https://www.ucg.ac.me/skladiste/blog_6810/objava_19186/fajlovi/%C4%8Cetvrto%20predavanje%20geodezija%20_%20gra%C4%91evinarstvo.pdf (pristupljeno u oktobru 2022.)
- [3] Ašanin, S., „Inženjerska geodezija 1“, Beograd, 2003.
- [4] <https://www.solitech.bg/uploads/assets/manual-trimble-total-stations-s5.pdf> (pristupljeno u junu 2022.)
- [5] Aleksić, I., Mihailović, K., „Koncepti mreža u geodetskom premeru“, Beograd, 2008.
- [6] Batilović, M., „Robusna ocena deformacija u slobodnim geodetskim mrežama primenom evolutivnih optimizacija algoritma“, Novi Sad, 2020.

Kratka biografija: Jovan Bačić rođen je u S. Mitrovici 1997. godine. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Geodezija i geoinformatika – Geodetsko inženjerstvo odbranio je 2024. godine. Kontakt: bacicjovan97@gmail.com

