

MIKROMREŽA TUNELA "STRAŽEVICA" U RESNIKU (BEOGRAD) GEODETIC NETWORK FOR TUNEL "STRAŽEVICA" IN RESNIK (BEOGRAD)

Slobodan Isailović, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – GEODEZIJA I GEOMATIKA

Kratak sadržaj – Tunel je najčešće saobraćajni ili hidrotehnički objekat koji se nalazi u zemljištu, na jednom ili oba kraja izlazi na površinu, ili uopšte ne izlazi na površinu. U radu je opisan projekat i realizacija projekta mikromreže za tunel "Straževica" u Beogradu.

Abstract – The tunnel is most often a traffic or hydratechnical facility located in the land of the hill, on one or both ends it comes to the surface or does not reach the surface. This paper describes the project and realization of the geodetic network project for the tunnel "Straževica" in Belgrade.

Ključne reči: mikromreža, realizacija projekta

1. UVOD

Osnovni zadatak mikromreža kod inženjerskih objekata je da omogući prostorno pozicioniranje i ostvarivanje geometrije objekta u granicama tolerancije građenja. Kvalitetna mikromreža je prvi uslov da će neki inženjerski objekat biti dobro izveden i urađen u zadatim tolerancijama. Mikromreža za tunele treba da je udaljena od vertikalne ose tunela i na stabilnom tlu da ne bi došlo do pomeranja u toku gradnje. Merenja u mikromreži mogu se izvršiti na klasičan način (mereći pravce i dužine) i GNSS uređajima mereći vektore između tačaka. Visine tačaka treba odrediti geometrijskim nivelmanom. Ovo su precizna merenja pa treba koristiti instrumente odgovarajuće tačnosti, kao i pribor i softvere za obradu merenih podataka. Merenja na tunelu "Straževica" su realizovana totalnom stanicom Wild TC2000 (merenje pravaca i dužina) i nivelnirom Koni 007 (visinske razlike).

2. GEODETSKA MREŽA OBJEKTA

Na tunelu Straževica planirana su klasična merenja pa je bilo potrebno definisati metodu merenja, broj girusa kao i raspored i način izvođenja merenja. Standardno odstupanje pravca iznosi 0.5", dok je standardno odstupanje dužina $2 + 2 \text{ ppm}$ [mm], kada se radi o instrumentu WILD T2000, kod koga je domet merenja do prizme 2.5 km.

Merenja u geometrijskom nivelmanu realizovana instrumentom Koni 007 (slika 1, desno) sa invarskim letvama. Standardno odstupanje merene visinske razlike je 0,7 mm/km.

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Zoran Sušić, docent.



Slika 1. Korišćeni instrumenti

2.1. Specifičnosti geodetske mreže na tunelu Straževica

Tunel Straževica je dugačak 745 m i uglavnom je u stenovitom delu brda. Deo je Koridora 10, obilaznice oko Beograda. Specifičnost tunela Straževica jeste da se nalazi ispod naselja Resnik i da geodetska mreža mora biti prilagođena toj situaciji, tako da se mreža ne nalazi iznad tunela već je pomerena u stranu. Realizovanu mikromrežu čini sistem trouglova koji su povezani sa po 2 date tačke u blizini ulaznog i izlaznog portala.

2.2. Rekognosciranje i stabilizacija tačaka

Kod izvođenja radova na ovako značajnim objektima veoma je važno dobro postaviti i stabilizovati geodetske tačke mikromreže. Najbolje rešenje su stubovi za prisilno centrisanje, ali kada to nije moguće, koriste se i dobro stabilizovane belege, jer ova mreža treba da se koristi za izvođenje, kao i za kasniji monitoring tunela.

3. PROJEKTOVANJE I REALIZACIJA GEODETSKIH MREŽA

Geodetsku mrežu čini skup geodetskih tačaka/repera, datih tako i traženih, sa skupom l_1, l_2, \dots, l_n merenih veličina i ako se između tih n merenih veličina može naći q ($q \leq u \leq n$) nezavisnih, koje su neophodne, tako da bilo koji element u mreži, čija vrsta je merena veličina, može da se izrazi preko q veličina. Geodetske mreže delimo na : jednodimenzionalne (H), dvodimenzionalne (yx) i trodimenzionalne mreže (xyz). U zavisnosti od teritorije koju pokrivaju mreže mogu biti državne i lokalne. Metode koje se koriste za određivanje mreža su još jedna podela i mreže mogu biti određene:

- terestrička – merenja površi Zemlje se vrše triangulacijom, trilateracijom ili nivelmanskom metodom;
- satelitska – merenja se vrše GNSS(GPS) uređajima;
- kombinacijom prethodne dve metode.

U zavisnosti kako vršimo definisanje datuma mreže, mreže mogu biti slobodne (date veličine se biraju proizvoljno) i neslobodne (postojeće geodetske mreže) [2].

3.1. Lokalne geodetske mreže

Lokalne geodetske mreže su skup tačaka istog reda koje formiraju geometrijske figure (trouglove, četvorouglove, kombinovano trouglovi i četvorouglovi). Ovakve mreže nazivamo još i geodetskim mikro-mrežama ili geodetskim mrežama objekata. Lokalne mreže su namenjene za određene objekte i služe za pozicioniranje objekta u prostoru, obeležavanje karakterističnih tačaka, linija i površi, kao i kontrolu geometrije objekta i monitoring u toku opterećenja i kasnije eksplo-atacije objekta. Model mreže zavisi od objekta koji se gradi i konfiguracije terena na kom se objekat nalazi, uz uslove da mora da zadovolji i geometriju mreže [2].

3.2. Uspostavljanje lokalne geodetske mreže

Uspostavljanje geodetske mreže ima više faza i vrši se kroz projekat mreže gde definišemo oblik i broj tačaka mreže, veličine, i sa kojom tačnošću se mere, zatim ide postupak realizacije mreže koji podrazumeva rekognosciranje, stabilizaciju i merenje na terenu, kao i obradu i analizu geodetske mreže (tačnost merenja i tačnost nepoznatih parametara (koordinata i visina) [2].

4. MATEMATIČKI MODELI IZRAVNANJA GEODETSKIH MREŽA

Prvo treba eliminisati sistematske i grube greške da bi smo prešli na izravnjanje geodetske mreže. Za jednoznačne ocene koordinata tačaka, merenih veličina i ocene tačnosti iz suvišnih merenja, vrši se izravnjanje mreže po metodi najmanjih kvadrata (MNK) [3,4].

4.1. Metod najmanjih kvadrata

Izravnjanje geodetskih mreža se zasniva na metodi najmanjih kvadrata. Primenom metode najmanjih kvadrata omogućava se jednoznačnost ocene koordinata tačaka geodetske mreže. Svaka metoda izravnjanja ima komponente:

- Merene veličine
- Stohastički model
- Funkcionalni model
- Algoritam izravnjanja
- Ocena parametara i njihova tačnost
- Kontrola kvaliteta

Linearni funkcionalni model : $\mathbf{v} = \mathbf{A} \cdot \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{f}$

Stohastički model $\mathbf{K}_f = \sigma_o^2 \mathbf{Q}_f$

Primenom metode najmanjih kvadrata dobijamo:

Normalne jednačine: $\mathbf{N}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{n} = 0$;

Matrica koeficijenata normalnih jednačina : $\mathbf{N} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A}$

Vektor koeficijenata slobodnih članova normalnih jednačina: $\mathbf{n} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{f}$;

Vektor ocene nepoznatih parametara : $\hat{\mathbf{x}} = -\mathbf{N}^{-1} \mathbf{n} = -\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}} \mathbf{n}$.

Defekt geodetske mreže je nedostajući broj parametara potreban za definisanje datuma geodetske mreže i u zavisnosti je od merenih veličina. Minimalni broj parametara za definisanje mreže u prostoru ili definisanje relativnog položaja mreže u odnosu na neki ranije definisan sistem nazivamo datum mreže. Svaki datum mreže

definiše koordinatni sistem određen koordinatnim početkom, orijentacijom koordinatnih osa i razmerom. Na osnovu datumskih parametara mreže sledi da se parametri mreže odnose na translaciju po koordinatnim osama, rotacije koordinatnih osa i faktor razmere. Postoji još varijanti definisanja datuma ali najčešći su klasično definisan datum ili datum definisan minimalnim tragom kovarijacione matrice na sve tačke ili na deo tačaka mreže [3].

4.2. Analiza tačnosti lokalnih 3D mreža

Eksperimentalna standardna devijacija jedinice težine je globalna mera koja daje ocenu tačnosti merenih veličina nakon izravnjanja geodetskih mreža [3]:

$$s_o = \sqrt{\frac{\mathbf{v}^T \mathbf{Q}_1^{-1} \mathbf{v}}{\text{trag} \mathbf{Q}_1^{-1} \mathbf{Q}_v}} \quad (1)$$

Eksperimentalna standardna devijacija ocena merenih veličina je:

$$s_{i_i} = s_o \cdot \sqrt{\mathbf{Q}_{i_i}} \quad (2)$$

Ocena tačnosti nepoznatih parametara nakon izravnjanja daju eksperimentalne standardne devijacije nepoznatih parametara:

$$s_{x_i} = s_o \cdot \sqrt{\mathbf{Q}_{x_i}} \quad (3)$$

4.3. Analiza pouzdanosti

Pouzdanost daje mogućnost otkrivanja grubih grešaka unutar samih merenja (unutrašnja pouzdanost) ili utvrđivanje njihovog uticaja na ocene nepoznatih parametara ukoliko nisu otkrivene grube greške (spoljašna pouzdanost).

4.3.1. Unutrašnja pouzdanost

Uticaj rezultata merenih veličina i njihovih grešaka na vektor popravaka \mathbf{v} ostvaruje se preko matrice koeficijenata \mathbf{R} [3]:

$$\mathbf{R} = \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{v}}} \mathbf{P} = (\mathbf{P}^{-1} - \mathbf{A} \mathbf{Q}_x \mathbf{A}^T) \quad (4)$$

Članovi r_{ij} predstavljaju udeo grešaka j -tog opažanja na ocenu i -te popravke. Koeficijenti r_{ij} su lokalna mera unutrašnje pouzdanosti, pri čemu je: $0 \leq r_{ij} \leq 1$. Ako je $r_{ij} > 0.3$, smatra se da postoji dobra kontrola unutar samih merenja.

4.3.2. Metode identifikacije grubih grešaka

U konvencionalne metode otkrivanja grubih grešaka spadaju *Data Snooping* test [6] i τ test (Pope, 1976). Ove metode su bazirane na pretpostavci da je samo jedno opažanje opterećeno grubom greškom.

Za uspešno otkrivanje eventualnih grubih grešaka u merenim veličinama kod geodetskih mreža primenjuju se globalni i lokalni statistički testovi. Oblik globalnog testa statistike je [3]:

$$T = \frac{\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v}}{r \sigma_o^2} = \frac{s_o^2}{\sigma_o^2} \sim F_{r, \infty} \left(\cong \frac{\chi_r^2}{r} \right) \quad (5)$$

Ako je globalna test statistika manja od kvantila Fišerovog ili χ^2 rasporeda, neophodno je proveriti da li postoje grube greške i da li je uzeta odgovarajuća tačnost opažanja kao i odgovarajući funkcionalni model opažanja.

Za lokalni test na grube greške koristimo iterativni *Data snooping* test. [6]:

Data snooping test statistika je oblika:

$$\omega_i = \frac{-v_i}{\sigma_{v_i}} = \frac{-v_i}{\sigma_o \sqrt{Q_{v_i, v_i}}} = \frac{-v_i}{\sigma_{l_i} \cdot \sqrt{r_{ii}}} \quad (6)$$

Ukoliko je neko merenje ω_i veće od kvantila standardizovane normalne raspodele, to merenje je odskačuce i izbacuje se samo ono merenje koje najviše odstupa, a ceo algoritam izravnjanja se ponavlja.

4.4. Kriterijumi osetljivosti geodetskih mreža

Osetljivost u kontrolnim geodetskim mrežama je određivanje najmanjeg inteziteta pomeranja, koji se primenom testova o podudarnosti mreža u metodama određivanja pomeranja, za dati nivo značajnosti α i moć kriterijuma $1-\beta$, može otkriti. Ako se parametar necentralnosti λ izjednači sa teorijskom vrednošću $\lambda_o = f(h, \alpha_o, \beta_o)$, može se odrediti najmanja vrednost pomeranja u pravcu zadatog vektora g [1]:

$$a_{min} = \sigma_o \sqrt{\frac{\lambda_o}{g^T Q_d^+ g}} \quad (7)$$

Tabela 1. Najmanji intenzitet pomeranja koji se može otkriti u pravcu velike poluose ($1-\alpha=0.95$, $1-\beta=0.80$)

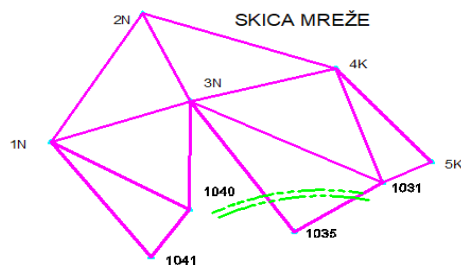
Br.	dy [mm]	dx [mm]	d [mm]	σd [mm]
1	6.451	11.152	12.883	4.151
2	15.046	6.718	16.478	5.308
3	9.358	4.316	10.306	3.320
4	11.953	0.288	11.957	3.852
5	9.228	5.879	10.942	3.525
1031	8.295	2.893	8.785	2.830
1035	10.007	0.202	10.009	3.225
1040	6.819	2.602	7.298	2.351
1041	10.875	1.407	10.966	3.533

5. MERENJA GEODETSKE MREŽE ZA TUNEL STRAŽEVICA

Tunel Straževica je prvi put počeo da se radi 1991. godine i tada je urađeno oko 100 m tunela da bi radovi bili konzervirani do 2004 godine, kada se ponovo krenulo sa radovima. Prva mikromreža je urađena 1989 god. a kasnije (2004. godine) je obnovljena-dopunjena i ponovo je izvršeno merenje u okviru mreže. Rekognosciranje tačaka mikromreže je izvršeno sa ortofoto snimaka i direktno na terenu, a stabilizacija mreže je izvršena stubovima za prisilno centrisanje i betonskim belegama. Mreža za ovaj objekat ima 4 date tačke i 5 novih tačaka.

5.1. Merenje pravaca i dužina

Realizacija merenja u okviru mikromreže na tunelu Straževica podrazumevala je merenje pravaca i dužina koji su mereni totalnom stanicom Wild TC 2000 uglovne tačnosti (Hz i V) je 0,5" a tačnost dužina je 2 mm+2 ppm i jednom prizmom se može meriti do 2,5 km. Uglovi su mereni u 3 girusa. Mreža (slika 2) je izravnata kao lokalna.



Slika 2. Skica geodetske mreže tunela

5.2. Merenje visinskih razlika

Visine tačaka su određene u postupku obrade merenja metodom geometrijskog nivelmana, pri čemu je korišćen instrument Koni 007 sa invarskim letvama. Visinske razlike su određene merenjima napred-nazad. Tačnost nivelira je 0,7 mm/km. Određene su visine repera kao i ploča na stubovima za prisilno centrisanje.

5.3. Računanje položajnih koordinata (X,Y)

Sva merenja koja smo izvršili treba obraditi da bi došli do koordinata (X,Y) tačaka geodetske mreže. Pošto je trebalo odrediti položajne koordinate izvršeno je izravnjanje 2D mreže u programu *Netxpert*. Prethodno je u okviru obrazaca TO1 i TO18e izvršena obrada rezultata merenja i kontrola merenih podataka [5].

Tabela 2. Elementi apsolutnih elipsi gresaka ($\alpha = 0.05$)

Broj tačke	A[mm]	B[mm]	Θ [°]	[']	["]
1	7.184	4.093	30	2	55.79
2	9.188	4.578	65	56	23.15
3	5.747	3.191	65	14	22.72
4	6.667	3.867	88	37	4.633
5	6.101	4.158	57	29	55.43
1031	4.898	1.777	70	46	19.46
1035	5.581	3.312	88	50	27.45
1040	4.07	2.364	69	6	33.76
1041	6.115	1.913	82	37	47.06

5.4. Računanje visina tačaka geodetske mreže (H)

Kod 1D geodetskih mreža nepoznati parametri u izravnjanju su visine tačaka, a preko izravnjanja se određuju empirijske standardne devijacije koje nam pokazuju tačnost izravnatih vrednosti visina tačaka.

Osnovne komponente metode izravnjanja su: merene veličine, stohastički model, funkcionalni model, algoritam izravnjanja, ocene parametara, ocene tačnosti i kontrola kvaliteta. Kod izravnjanja geodetskih mreža najčešće se koriste metode izravnjanja po modelu posrednih merenja i po modelu uslovnih merenja.

Podaci merenja (za tunel Straževica) u geometrijskom nivelmanu su prvo obrađeni, uz kontrole koje su direktno realizovane na terenu, a zatim je izvršeno 1D izravnjanje u programu *Netxpert*. Visine tačaka su određene milimetarskom tačnošću [5-7]. U postupku kontrole kvaliteta merenja visinskih razlika konstatovano je da nema grubih grešaka.

6. ZAKLJUČAK

Geodetske mreže inženjerskih objekata, kao što su tuneli, moraju da imaju pokazatelje kvaliteta (tačnost i pouzdanost) koji treba da zadovolje najzahtevnije radove u postupku građenja tunela (tačnost proboja, merenje konvergencije, monitoring). Kada znamo zahtevanu tačnost obeležavanja objekta možemo da definišemo i tačnost mreže koja je neophodno da bude određena sa 3-5 puta boljom tačnošću u odnosu na tačnost obeležavanja. Mreža na tunelu "Straževica" merena je klasično (pravci i dužine) dok su visine određene geometrijskim nivelmanom, gde je merenje izvršeno optičkim instrumentom Koni 007. Na oblik mreže je uticala blizina naselja tako da su tačke postavljene dalje od objekta koji se izvodi. Merenja (pravaca i dužina) su vršena u ranim jutarnjim satima da bi se postigli što bolji uslovi opažanja. Tunel Straževica je predviđen za drumski saobraćaj i deo je Koridora 10 – obilaznice oko Beograda. Dužina desne tunelske cevi je 745 m, dok je površina poprečnog preseka tunela 110 m^2 . Leva cev je u fazi izgradnje. Kroz jednu cev je predviđen prolazak 15.000 vozila dnevno. Tačnost proboja tunela je bila 5 cm. Prezentovana mikromreža je zadovoljila tražene uslove i objekat je uspešno izveden i pušten u eksploataciju.

7. LITERATURA

- [1] Ašanin S., Inženjerska geodezija 1, Ageo d.o.o, Beograd 2003., 297 str.
- [2] Ninkov T., Projektovanje geodetskih mreža u inženjerskoj geodeziji (skripta), Fakultet Tehničkih nauka, Novi Sad, 2012.
- [3] Mihailović K., Aleksić I., Koncepti mreža u geodetskom premeru, Privredno društvo za katrografiju Geokarta d.o.o, Beograd 2008.
- [4] Begović A., Inženjerska geodezija 2, Građevinski fakultet, Beograd 1990., 308 str.
- [5] Elaborat o realizaciji geodetske mreže za tunel Straževica u Beogradu 2004 god. (obilaznica oko Beograda).
- [6] Baarda, W (1968): A Testing Procedure for Use in Geodetic Networks, Publication of Geodesy, New Series 2, no.5., Netherlands Geodetic Commission, Delft.
- [7] Pope, A. (1976): The statistics of Residuals and the Detection of Outliers, NOAA Technical Report, NOS 65, NGS 1, Rockville, MD.

Kratka biografija:



Slobodan Isailović rođen je u Beogradu 1962 god. Diplomski rad odbranio je 2014. god. na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Geodezije i geomatike. Zaposlen i radi u preduzeću za projektovanje puteva.