

GEODETSKE OSNOVE ZA POTREBE TUNELOGRADNJE

Damir Topić, Branko Božić
Tehnički fakultet Bihać, Ulica dr. Irfana Ljubijankića bb, 77000 Bihać,
Bosna i Hercegovina, tfb@bih.net.ba

Ključne riječi: tunelogradnja, tačnost proboja, geodetska osnova.

SAŽETAK:

U tunelogradnji je potrebno osigurati tačnost proboja ne samo u horizontalnom nego i u visinskom smislu. Dopuštenim odstupanjima u tački proboja definirani su parametri za izračun koordinata tačaka geodetske osnove. U svrhu prijenosa visina u tunel, zbog izgradnje podzemnih građevina, potrebno je na površini u blizini tunela razviti visinsku geodetsku osnovu. U ovome radu se prikazuje može li primjena GPS-a u tunelogradnji u potpunosti zamijeniti do sada primjenjivane načine razvijanja mreža, bez nužnosti izvođenja terestričkih mjerenja, a da se pri tom garantuje proboj tunela u okviru dopuštenih odstupanja. Rad obuhvaća načine opažanja, izvore pogrešaka te analizu i interpretaciju konkretnih rezultata dobivenih tijekom rada na projektu tunela "Sveti Rok". U svim izjednačenjima mjerenja korišten je Gauss-Markovljev model posrednih mjerenja uz načelo najmanjih kvadrata.

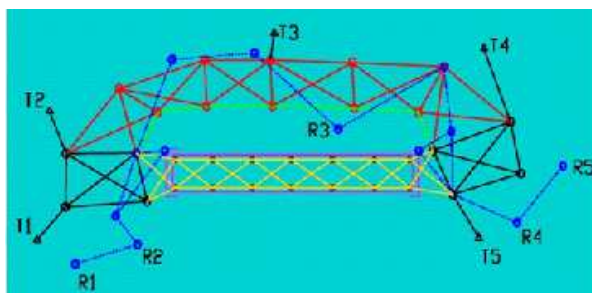
1. UVOD

Pouzdana stabilizacija tačaka geodetske osnove je temelj za sva mjerenja koja se s njih odvijaju bilo da se radi o iskolčenju, pomaku i deformaciji. Dakle, tom poslu treba prići s velikom odgovornošću. Apsolutna stabilnost tačaka geodetske osnove nije moguća zbog različitih uzroka pomaka, ali se, poznavajući uzroke pomaka i iskustvom, može značajno pridonjeti kvaliteti stabilizacije tačke mreže. Vrlo je važno stabilizaciju geodetske osnove izvršiti na vrijeme, kako bi se vlastiti pomaci što je više moguće smanjili. Geodetski radovi pri projektiranju tunelske trase obuhvaćaju radove na površini i u tunelu. Kako je tunel izdužen objekt, nadzemnu geodetsku osnovu tunela u pravilu čine dvije samostalne mreže na ulaznom i izlaznom portalu. Svrha uspostave tunelskih mreža je da se matematički definirana prostorna os, opisana određenim brojem tačaka s pripadajućim koordinatama i visinama, prenese u narav iskolčenjem. Za sva izjednačenja najčešće se koristi Gauss-Markovljev model posrednih mjerenja uz primjenu metode najmanjih kvadrata (Feil 1990). Podzemnu geodetsku osnovu čine u pravilu dva slobodno vođena poligonska vlaka od ulaznih portala duž jedne i druge strane tunela. Nakon izvršenog proboja izračunaju se koordinate spojne tačke iz slijepih vlakova podzemne geodetske osnove, te se na osnovi toga računa tačnost proboja. U nizu obavljenih računanja, kako bi se došlo do optimalnog broja tačaka u mikromrežama na ulaznom i izlaznom portalu, tačnost proboja računana je u odnosu na cjelovitu geodetsku osnovu, a zatim je geodetska osnova reducirana izbacivanjem jedne po jedne tačke iz svake pojedine mikromreže, do minimuma geodetske osnove, odnosno do dvije tačke na svakom portalu. Tako su izvršena računanja tačnosti proboja tunela iz geodetske osnove s dvije, tri, četiri, pet i šest tačaka na različitim udaljenostima.

2. GEODETSKA OSNOVA I TAČNOST PROBOJA

Uvažavajući unaprijed postavljene zahtjeve tačnosti proboja tunela i ekonomske zahtjeve izabire se optimalna varijanta u pogledu oblika mreža i postupka mjerenja. To je moguće postići pomoću ispitivanja pojedinih varijanti primjenom računskog modela ta za optimiranje mreže. Geodetski radovi vezani uz tunelogradnju dijele se na nadzemne geodetske radove koji prethode projektiranju, a obuhvaćaju predradnje za idejni i glavni projekt, na nadzemne radove za određivanje geodetske osnove radi proračunavanja elemenata iskolčenja, zatim na geodetske radove u tunelu kao što su iskolčenje tunelske trase i objekata pod zemljom tijekom gradnje, te kontrolu izgradnje (Cvetković 1970). Pri projektiranju geodetske osnove za potrebe izgradnje bilo kojeg tunela temeljno je polazište dopušteno odstupanje pri probodu tunela, što znači da geodetska osnova mora zadovoljiti najveće zahtjeve u vezi s preciznošću i pouzdanošću. Osnova koja služi za projekt geodetske mikromreže je idejni projekt tunela, koji osim trase tunela sadržava i plan organizacije gradilišta s tačno lociranim objektima. Cjelokupna geodetska osnova projektira se na kartografskim podlogama odgovarajućih mjerila na kojima su nanoseni svi relevantni podaci. Pri projektiranju je potrebno uzeti u obzir sljedeće parametre:

- projekt mreže radi se na projektu tunela, gdje su već projektirani i svi pomoćni objekti koji će služiti u tijeku građenja,
- projekt mreže mora pokrivati cijelo gradilište tunela i udovoljavati svim njegovim potrebama do kraja građenja,
- mreža u pogledu tačnosti mora biti homogena za cijelo gradilište tunela i odgovarati tačnosti koja je potrebna za označavanje tačaka tunelske osi pri probijanju tunela,
- radi što lakšeg računanja koordinata raznih objekata koji se nastavljaju na tunel mreža tačaka uklapa se u jedinstveni koordinatni sustav s osi tunela i osi ceste.



Slika 1. Geodetska osnova tunela

Budući da se geodetska osnova za potrebe izgradnje tunela računa u lokalnom koordinatnom sustavu, potrebno je pri izradi projekta uključiti i nekoliko tačaka poznatih po koordinatama u državnom koordinatnom sistemu, kako bi se geodetska osnova mogla uklopiti u koordinatni sistem u kojem je izrađen projekt tunela, slika 1.

2.1. GPS mjerenja

U satelitskoj geodeziji informacije koje sadrže mjerene vrijednosti prenose se elektromagnetskim valovima, udaljenosti od stajališta do satelita određuje se na osnovu mjerenja vremena puta signala.. Prilikom projektiranja mreže geodetske osnove za potrebe izgradnje tunela uvažavaju se zahtjevi da geodetska osnova bude podesena kako za GPS mjerenja tako i za klasična terestička mjerenja. Osim toga mreža mora zadovoljiti postavljene zahtjeve tačnosti prilikom proboja tunela. Za optimalno planiranje GPS opažanja nekoliko je parametara koje treba uzeti u obzir, kao što su konfiguracija satelita, broj i top prijemnika koji nam stojne na raspoloaganju, te svakako i ekonomski aspekt.

2.2. Uspostava geodetske osnove

Uvažavajući postavljene zahtjeve tačnosti proboja tunela i ekonomske zahtjeve izabire se optimalna varijanta u pogledu oblika mreže i postupka mjerenja. To je moguće postići pomoću ispitivanja pojedinih varijanti primjenom računskog modela za optimiranje mreže. I pri najbrižljivijem biranju položaja pojedinih tačaka mreže mora se računati s mogućom promjenom položaja tačke u vertikalnom i horizontalnom smislu zbog slijeganja tla, iskopa, miniranja, transporta teških građevinskih strojeva itd. Podzemna poligonometrija omogućava prijenos ne samo osi tunela, nego i osi različitih uređaja koji se koriste u tunelogradnji (laseri). Priključak podzemne poligonometrije izvodi se na tačke vanjske geodetske osnove neposredno kroz portale, ili kroz vertikalna okna, bočne štolne ili kose rovove.

Podzemnu poligonometriju karakterizira:

- oblik vlakova ovisi o obliku tunela,
- dužine poligonskih strana ovisе o obliku tunela i mogu biti vrlo različite,
- vlakovi podzemne poligonometrije su slijepi, priključeni samo na jednom kraju (radi kontrole mogu se unutar tunela postavljati zatvoreni poligonski vlakovi),
- potpuni priključak i izjenačenje poligonskih vlakova u tunelu može se izvršiti nakon proboja tunela.

Podzemna poligonometrija unutar tunela dijeli se na radnu, koja služi za određivanje smjera kopanja i osnova je za unutarnja snimanja, a karakteriziraju je kratke strane ovisno o obliku tunela i napredovanju bušenja, i glavnu, u kojoj se tačke postavljaju na većim udaljenostima od 150-500 m. Stabilizacija i izbor položaja tačaka u podzemnoj poligonometriji ovisi o obliku trase i unutarnjoj vidljivosti. Izborom glavnih tačaka dobivaju se teorijski povoljniji vlakovi s većim dužinama, što smanjuje poprečnu pogrešku mjerenog vlaka.

2.3. Optimiranje mreža

Poboljšanje projekta mreže moguće je samo u fazi planiranja, pri popunjavanju mreže ili ukoliko se vrše nova mjerenja. Ako se u projektu mreže pokaže loša prognoza za tačku proboja, potrebno je pronaći odgovor na pitanje koji dio mreže je potrebno preciznije odrediti. Promjena prognoze tačnosti proboja je moguća optimiranjem mreže, dakle promjenom konfiguracije mreže ili promjenom mjerne preciznosti izborom kvalitetnijeg instrumenta ili drugačijeg postupka mjerenja i to:

- u nadzemnoj mreži,
- u podzemnoj mreži.

Postupkom optimiranja modificira se projekt oblika mreže s ciljem njenog poboljšanja pa se sukladno načinu modificiranja optimiranje može podijeliti na (Ninkov 1989):

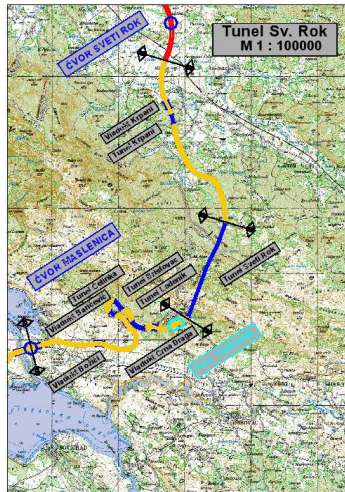
- optimiranje nultog reda- fiksni A, P, slobodni x, Q_{xx}
- optimiranje prvog reda- fiksni P, Q_{xx} , slobodni A
- optimiranje drugog reda- fiksni A, Q_{xx} , slobodni P
- optimiranje trećeg reda- fiksni Q_{xx} , slobodni P, A.

U okviru optimiranja nultog reda provodi se određivanje optimalnog referentnog koordinatnog sistema, u kojem je određen položaj tačaka geodetske osnove.

3. TUNEL »SVETI ROK«

Prvi dio radova na uspostavi geodetske osnove za potrebe izgradnje tunela "Sveti Rok", u prvoj fazi obuhvatili su stabilizaciju mikromreža na ulaznom i izlaznom portalu, izmjeru tačaka mikromreže GPS-tehnologijom i njihov priključak geometrijskim nivelmanom na tačke državne visinske mreže, te obradu podataka i izračun koordinata i visina nakon toga. U tu svrhu provedena je revizija postojeće trigonometrijske mreže i izabrano je pet tačaka na temelju kojih su izračunani parametri transformacije. Nakon toga pristupilo se uspostavi cjelovite geodetske osnove koja je trebala poslužiti za iskolčenje i periodične kontrole iskopa tunela. Prvobitna geodetska osnova pretrpjela je promjene

zbog uznapredovalih radova na gradilištu, prouzročene uništenjem nekih tačaka u neposrednoj blizini gradilišta- II faza. Osim toga, kao rezultat optimiranja, na pogodnijim lokacijama stabilizirane su zamjenske ili potpuno nove tačke kako bi se poboljšala kvaliteta mreže. Za sva izjednačenja korišten je Gauss-Markovljev model posrednih mjerenja uz princip najmanjih kvadrata.

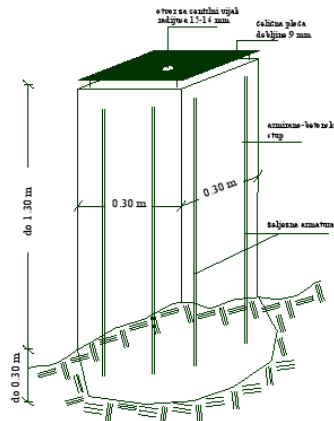


Slika 2. Pregledna karta sa položajem tunela Sveti Rok

Radovi na uspostavi geodetske osnove podijeljeni su na terenske (organizacija i izvođenje mjerenja) i uredske radove (obrađa podataka i interpretacija rezultata).

3.1. Stabilizacija tačaka geodetske osnove tunela " Sveti Rok"

Posebnu pažnju bilo je potrebno posvetiti stabilizaciji i signalizaciji tačaka geodetske osnove radi osiguranja visoke tačnosti koja je nužna u tunnelskim mikromrežama i geodetskim radovima koji se na njih stavljaju.

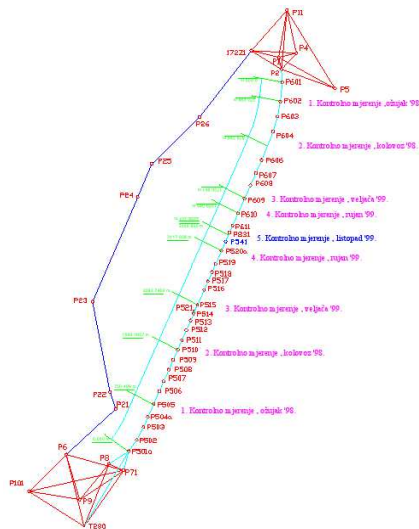


Slika 3. Primjer stabilizacije tačaka geodetske osnove

Tačke se stabiliziraju u stubovima na koje se postave uređaji za prisilno centriranje instrumenata i signala kako bi se smanjio utjecaj sistemskih pogrešaka .

3.2. Geodetska osnova tunela „Sveti Rok“

Prilikom projektiranja mreže geodetske osnove uvažavani su zahtjevi da geodetska osnova bude podesna kako za GNSS-mjerenja tako i za klasična terestrička mjerenja.



Slika 4. a) Geodetska osnova tunela »Sveti Rok« b)Elektronički instrument LEICA TC 1800

Mjerenje duljina u geodetskoj osnovi tunela "Sveti Rok" izvršeno je istovremeno s mjerenjem pravaca, s istim instrumentom i priborom, u istom vremenskom razdoblju, a mjerenja su izvršili isti stručnjaci. Mjerna nesigurnost elektroničkog instrumenta LEICA TC 1800 je 1" (pravci) i 1mm + 2ppm (duljine). Kao medij za pohranu mjernih podataka služila je PCMIA memorijska kartica. (b)

3.3. Računanje podzemne poligonometrije

Na osnovi razlika koordinata tačke P541 dobivene iz slijepoga poligonskog vlaka s južne i sjeverne strane izračunana su odstupanja u smjeru osi tunela, odnosno u smjeru okomitom na os tunela. S obzirom na to da su za visinske tačke u podzemnoj poligonometriji uzete gornje površine željeznih ploča koje su ubetonirane na betonskim stubovima, čija je primarna uloga da služe kao uređaj za prisilno centriranje, mogla se izvršiti usporedba tačnosti proboja u spojnoj tački P541 određene iz trigonometrijskog i geometrijskog nivelmana.

4. ANALIZA REZULTAT

Svi modeli izjednačenja i računanja tačnosti proboja u podzemnoj poligonometriji analizirani su radi donošenja odluke koji je od njih najprikladniji kao definitivno rješenje. Za svaki model ispitana je tačnost proboja kod različitog broja tačaka mikromreža na ulaznom (sjevernom), odnosno izlaznom (južnom) portalu. Ostvarenjem proboja tunela omogućen je izračun stvarno postignute tačnosti proboja tunela po položaju i visini. To je obavljeno računanjem koordinata tačke P541 iz slijepih poligonskih vlakova s južne i sjeverne strane, koja je uzeta kao tačka u kojoj je izveden spoj slijepih poligonskih vlakova. Na osnovi razlika koordinata tačke P541 dobivene iz slijepoga poligonskog vlaka s južne i sjeverne strane izračunata su odstupanja u smjeru osi tunela, uzdužno odstupanje L, i u smjeru okomitom na os tunela, poprečno odstupanje Q.

Stvarno odstupanje pri probouju tunela računa se u odnosu na srednju vrijednost koordinate za spojnu tačku, a ono karakterizira tunel »Sveti Rok« kao sigurno jedan od najuspješnije probijenih tunela vođenih iz dva smjera.

Na osnovi razlika visina točke P541 dobivenih geometrijskim nivelmanom sa sjeverne i južne strane omogućen je izračun visinskog odstupanja dh probouja tunela, tablica 1.

Tablica 1. Tačnost probouja u spojnoj tački P541

Br. tačke	ΔY (m)	ΔX (m)	Q (m)	L (m)	dh (m)
P541	Y=5553624,879	X=4904442,177	H=560,6201	dobiveno sa sjeverne strane	
P541	Y=5553624,882	X=4904442,143	H=560,6108	dobiveno sa južne strane	
P541	0.013	0.034	0.009	0.024	0.0093
Odstupanje od srednje vrijednosti za spojnu tačku P541					
Br.tačke	ΔY (m)	ΔX (m)	Q (m)	L (m)	dh (m)
P541	0.006	0.017	0.005	0.012	0.0047

Tačnost probouja tunela znatno nadmašuje dopuštena odstupanja u tačnosti probouja tunela propisane Pravilnikom o tehničkim normativima i uvjetima za projektiranje i gradnju tunela na cestama, čl.53 Zakona o normizaciji (NN 55/96-2336). Dopuštena odstupanja po položaju i visini, u skladu s Pravilnikom, za eventualno mimoilaženje tunelskih osi vođenih iz dva smjera iznose:

$$\text{po osi } mm \pm 60L \qquad \text{po niveleti } mm \pm 23 L,$$

gdje je L- duljina tunela izražena u kilometrima.

Kako je u slučaju tunela Sveti Rok $L \approx 6$ km, dopuštene razlike iznose:

$$\text{po osi } \pm 147 \text{ mm} \qquad \text{po niveleti } \pm 56 \text{ mm.}$$

5. ZAKLJUČAK

Specifične geodetske osnove su se još donedavna, kako u svijetu tako i u nas, određivale klasičnim metodama triangulacijom, trilateracijom, preciznom poligonometrijom i preciznim nivelmanom. Iz obavljenih računanja i provedene analize podataka proizlazi da postignuti rezultati u tačnosti probouja tunela pomoću GNSS-om određene mreže, izjednačene s minimalnom prisilom fiksiranjem koordinata tačke P71, prema postignutim rezultatima u pogledu tačnosti zadovoljavaju, odnosno uveliko nadmašuju unaprijed postavljene zahtjeve tačnosti. Budući da su tuneli najčešće locirani na teško pristupačnim terenima i da je za terestričko određanje mreže potrebno ostvariti međusobna dogledanja između tačaka mikromreže i povezati mikromreže na ulaznom i izlaznom portalu, GNSS tehnologija nameće se sama po sebi kao ekonomičnije i lakše rješenje. Posebna prednost primjene GNSS tehnologije, prilikom razvijanja geodetske osnove, nasuprot klasičnom terestričkom načinu očituje se u naknadnim izmjenama projekta, kada je potrebno obaviti dodatna mjerenja, budući da se GNSS mjerenja mogu izvesti vrlo brzo, neovisno o vremenskim uvjetima, te uklopiti u već postojeću mrežu.

6. LITERATURA

- [1] Božić B.: *Tunelogradnja*, Univerzitet u Bihaću, Tehnički fakultet Bihać, Bihać, 2012.
 [1] Cvetković, Č. (1970): *Primena geodezije u inženjerstvu*, Građevinska knjiga, Beograd.
 [2] Feil, L. (1990): *Teorija pogrešaka i račun izjednačenja* - drugi dio, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
 [3] Grgić, I. (2003): *Specifičnosti geodetske osnove u tunelogradnji*, Magistarski rad, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.