

UDK 528.41:528.283:624.19(497.5)

Izvorni znanstveni članak

Nezavisna astronomska kontrola vanjske geodetske mreže tunela “Mala Kapela”

Nikola SOLARIĆ, Drago ŠPOLJARIĆ – Zagreb*

SAŽETAK. Opisana je automatizirana astronomska kontrola vanjske geodetske mreže tunela “Mala Kapela” i moguće povećanje točnosti proboja tunela, osobito ako su strane za orijentaciju poligonskih vlakova kojima se ulazi u tunel kratke i strme.

U dosadašnjim primjenama nezavisne astronomske kontrole geodetskih mreža iznad tunela automatizirano je određivan samo astronomski azimut. Komponente otklona vertikalne računane su iz topografskih masa ili geoida, što je manje točno od komponenti određenih astrogeodetskim mjerenjima. U jesen 2003. prvi put je u cijelosti primijenjena automatizirana astronomska kontrola GPS mreže iznad tunela “Mala Kapela” duljine 6 km.

Nakon proboja tunela iz kontrolnih je mjerenja dobiveno poprečno odstupanje od osi 1,0 cm. Uzme li se u obzir utjecaj otklona vertikalne poprečno odstupanje iznosi 0,2 cm. Da su strane za orijentaciju poligonskih vlakova kojima se ulazi u tunel bile strme npr. 30° i azimut strane 144°, utjecaj otklona vertikalne bio bi 20,2 cm. Takvo znatno odstupanje od osi prouzročilo bi dodatni trošak od približno 1 800 000 US\$ za reprofiliranje i betoniranje dviju tunelskih cijevi. Prema tomu, uzmemo li u obzir utjecaj otklona vertikalne možemo smanjiti dodatne troškove betoniranja. Pravilnikom o tehničkim normativima za projektiranje i gradnju tunela u Republici Hrvatskoj dopuštena su velika odstupanja pri proboju tunela, koja mogu prouzročiti dodatni financijski trošak. Danas se dopuštena odstupanja mogu smanjiti ako se pri određivanju smjera proboja tunela primijeni dodatna nezavisna astronomska kontrola i ako se uzme u obzir otklon vertikalne.

Ključne riječi: nezavisna kontrola vanjske geodetske mreže tunela, automatizirano astronomsko određivanje azimuta, automatizirano određivanje astronomske širine i duljine.

*Prof. emer. dr. sc. Nikola Solarić, doc. dr. sc. Drago Špoljarić, Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, e-mail: nikola.solaric@geof.hr, drago.spoljaric@geof.hr

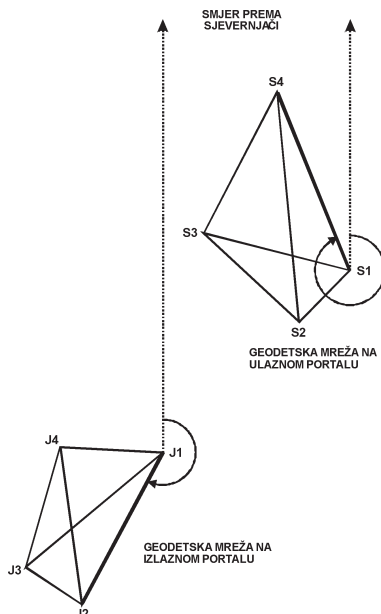
1. Uvod

Nezavisna astronomska kontrola geodetske mreže iznad tunela i orijentacija poligonskih vlakova kojima se ulazi u tunel sastoje se od određivanja astronomske širine i duljine stajališnih točaka i određivanja astronomske azimuta strana u blizini ulaza u tunel i izlaza iz njega. Prije su astronomska opažanja i obradba mjerenja bila dugotrajna i neekonomična, no automatizacijom mjerenja moguće ih je uspješno primijeniti pri nezavisnoj kontroli klasičnih i GPS geodetskih mreža.

2. Nezavisna astronomska kontrola vanjske geodetske mreže tunela

Pri nezavisnoj astronomskoj kontroli vanjske geodetske mreže tunela određuju se astronomske azimute jedne strane na ulaznom i jedne strane na izlaznom portalu tunela opažanjem Sjevernjače (beskonačno udaljene točke, slika 1) (Solarić i dr. 1990, 1997b). Uspoređujući astronomske azimute reducirane na elipsoid i azimute na elipsoidu (dobivene iz vanjske geodetske mreže iznad tunela) kontroliramo da li je dio mreže na ulazu u tunel odnosno izlazu iz njega dobro orijentiran. Od toga će zavisiti dobra orijentacija poligonskih vlakova kojima se ulazi u tunel, odnosno uspješnost proboja tunela.

Pri astronomskoj kontroli geodetske mreže iznad tunela mjere se samo dva kuta na ulaznom i izlaznom portalu, a npr. u poligonskim vlakovima mjere se kutovi na više stajališta, što uzrokuje i veću mjernu nesigurnost poligonskih vlakova.



Slika 1. Određivanje astronomske azimuta strane na ulaznom i izlaznom portalu tunela opažanjem Sjevernjače.

Uzmu li se u obzir i astronomski određeni azimuti pri izjednačenju vanjske geodetske mreže iznad tunela, može se povećati točnost smjernih kutova početnih strana poligonskih vlakova kojima se ulazi u tunel. To je osobito važno ako su strane za orijentaciju kraće.

Pri mjerenju kutova mjeri se s vertikalnom osi teodolita postavljenom u smjer vertikale (smjer viska), a trebali bi se mjeriti s vertikalnom osi teodolita u smjeru normale na elipsoid. Zato izmjerene kutove na Zemljinoj fizičkoj površini treba reducirati na kutove na elipsoidu, jer se sva računanja izvode na elipsoidu.

Smjer vertikale na geoid i smjer normale na elipsoid najčešće se ne poklapaju. Kut između tih smjerova nazivamo otklonom vertikale, koji se obično rastavlja na dvije komponente, u smjeru meridijana ξ i u smjeru okomitom na meridijan η . Te su komponente potrebne:

- da bi se opažanja prema Sjevernjači i ciljnoj točki reducirala na elipsoid i
- da bi se reduciralo prijelomni kut na elipsoid ako je strana za orijentaciju poligonskog vlaka kojim se ulazi u tunel strma.

3. Automatizirano astronomsko određivanje azimuta strane geodetske mreže

Razvoj automatiziranog astronomske određivanja azimuta strane geodetske mreže započeo je na Geodetskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu 1983. godine (Solarić 1983, 1985, 1991). U prvoj je varijanti primijenjen elektronički teodolit Kern E2 ($\pm 0,5''$), programabilno računalo Hewlett Packard HP 41 CX i termalni pisac (slika 2, I. varijanta).



I. varijanta



II. varijanta

Slika 2. Instrumentarij za automatizirano određivanje astronomske azimuta.

U toj se automatizaciji, zbog povećanja točnosti, pri svakom opažanju ciljnog signala i nebeskog tijela viziralo dva puta. Ako je razlika između dvaju mjerenja bila velika, mjerenje se moglo ponoviti. Podaci mjerenja i rezultati ispisivani su na termalnom pisaču.

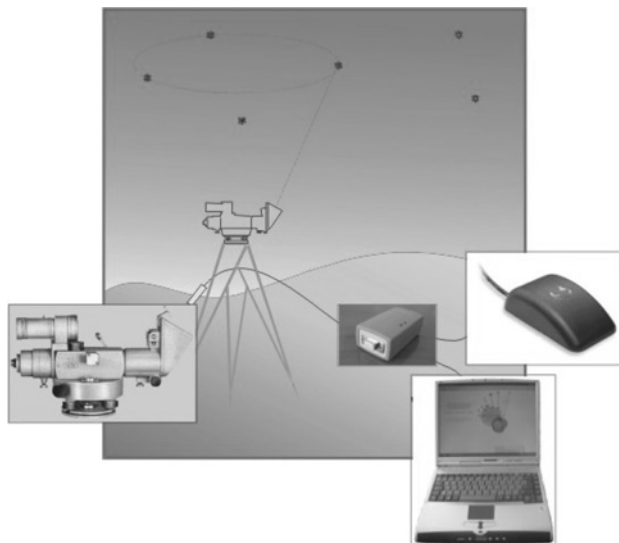
Švicarska tvrtka geodetskih instrumenata Kern ocijenila je našu automatizaciju uspješnom, uspoređujući ju s automatizacijom vlastitog razvojnog odjela i sa Sveučilišta u Beču, te poklonila Geodetskom fakultetu laptop računalo Toshiba T1600.

Godine 1990. razvijeno je automatizirano određivanje azimuta s prijenosnim računalom Toshiba T1600 (slika 2, II. varijanta) (Solarić i dr. 1991). U toj je automatizaciji napravljeno nekoliko značajnih poboljšanja:

- automatski se izbacuju mjerenja s grubim pogreškama i dodatno traže nova mjerenja,
- ne treba astronomski godišnjak,
- mjerenja se izvode brže nego u prijašnjoj automatizaciji,
- standardno odstupanje određivanja azimuta za približno pola sata opažanja manje je od $0,3''$ (Solarić i dr. 1992).

4. Automatizirano određivanje astronomske širine i duljine

Automatizacija istodobnog određivanja astronomske širine i duljine odnosno komponenata odklona vertikale s pomoću astrolaba Zeiss Ni2 i određivanje vremena s pomoću GPS-a (slika 3) razvijeno je 2002. godine (Špoljarić 2002). U toj je automatizaciji značajno:



Slika 3. Instrumentarij za istodobno automatizirano određivanje astronomskih koordinata.

- ne treba određivati korekciju sata,
- izbor zvijezda za opažanje jednostavno se obavlja na zaslonu računala,
- moguće je odmah na terenu obraditi rezultate mjerenja,
- standardno odstupanje određivanja astronomske širine i duljine, a i komponenta odklona vertikalne je $0,3''$ (ibid.).

5. Primijenjene nezavisne astronomske kontrole vanjskih geodetskih mreža

Nezavisna astronomska kontrola klasičnih geodetskih mreža iznad tunela primijenjena je:

- na 12 km dugom tunelu Chiffa u Alžiru i
- na 12 km dugom tunelu Nevesinje u Bosni i Hercegovini.

Na tunelu Chiffa dobivena je razlika između razlike azimuta strana na jednom i drugom portalu određenih astronomskim i geodetskim mjerenjima

$$\Delta(\Delta A) = 0,37'',$$

a dopuštena je $2,7''$, što je potvrdilo da je vanjska geodetska mreža tunela dobro postavljena.

Na tunelu Nevesinje dobivena je razlika

$$\Delta(\Delta A) = 1,26'',$$

a dopuštena je $2,4''$, pa je i ta geodetska mreža dobro postavljena (Solarić i dr. 1997a, 1997b, 1990). Komponente odklona vertikalne na oba tunela određene su računski iz topografskih masa, što je manje točno nego iz astronomskih i elipsoidnih koordinata stajališta.

Na GPS mreži grada Zagreba i na zamišljenom tunelu između tornja Rudarskog fakulteta i Medvedgrada postignuta je razlika azimuta

$$\Delta(\Delta A) = 1,2'',$$

a dopuštena je $6,2''$, što upućuje na zaključak da je GPS mreža dobro postavljena (Solarić i dr. 2005). Komponente odklona vertikalne određene su iz geoida grada Zagreba.

U cijelosti automatizirana nezavisna astronomska kontrola GPS mreže iznad tunela prvi je put primijenjena na tunelu "Mala Kapela" duljine 6 km, a planirana je i na dvanaestkilometarskom tunelu "Ćićarija".

6. Vanjska geodetska GPS mreža tunela “Mala Kapela”

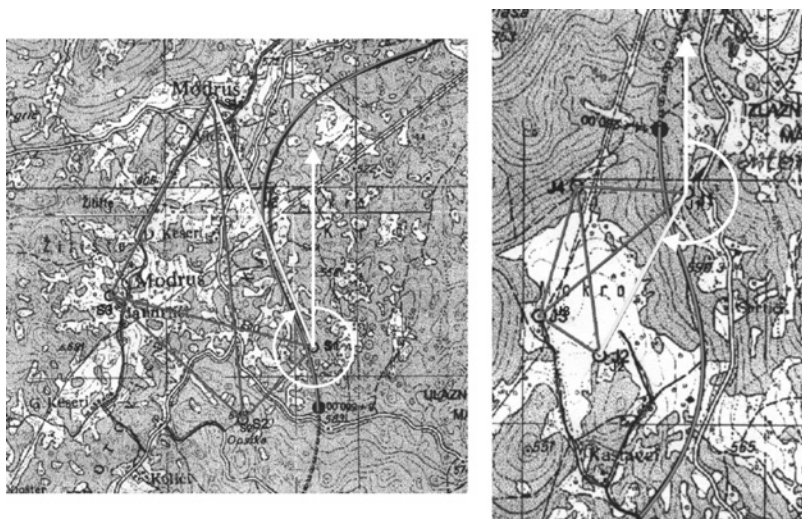
Vanjsku geodetsku GPS mrežu tunela “Mala Kapela” izvela je tvrtka Geoprojekt. Mjerenja su obavljena GPS-om Ashtech Z12 na više trigonometara državne triangulacijske mreže u blizini tunela i točkama vanjske geodetske mreže iznad tunela u tri serije (dvije dnevne i jedna noćna). Na točkama vanjske geodetske mreže na ulaznom i izlaznom portalu izmjereni su kutovi i duljine preciznim elektroničkim tahimetrom Leica TC 2002. Na temelju mjerenja na trigonometrima određene su razlike između koordinata dobivenih GPS-om i koordinata trigonometara u državnoj mreži, te su izabrani trigonometri 35 i 70 s najmanjim rezidualima. Trigonometar 35 izbran je kao početni, a prema trigonometru 70 cijela je mreža orijentirana pri transformaciji GPS mjerenja. Gauss-Krügerove koordinate točaka vanjske mreže određene su standardnim odstupanjem oko 7 mm (Vojnović, Đuretek 2003).

Kontrolu vanjske geodetske mreže poligonskim vlakom i kontrolu poligonskih vlakova u tunelu izveo je Geodetski zavod Geodetskog fakulteta (Džapo, Zrinjski 2004).

Nezavisnu astronomska kontrolu GPS mreže tunela “Mala Kapela”, prema naredžbi tvrtke Geoprojekt, izveo je Zavod za geomatiku Geodetskog fakulteta (Solarić, Špoljarić 2003).

7. Nezavisna astronomska kontrola GPS mreže tunela “Mala Kapela”

Na vanjskoj geodetskoj mreži tunela “Mala Kapela” određeni su azimuti strana na južnom i sjevernom portalu tunela opažanjem Sjevernjače (slika 4), a na stajališnim točkama određene su njihove astronomske koordinate kao i komponente otklona vertikalne.



Slika 4. GPS mreža na sjevernom i južnom portalu tunela “Mala Kapela” s astronomski određenim azimutima strana.

Astronomske azimute strana na oba portala izmjereni su elektroničkim teodolitom Kern E2 u 8 girusa, a postignuta je mjerna nesigurnost 0,25".

7.1. Razlike azimuta strana na južnom i sjevernom portalu tunela

Razlike između azimuta na elipsoidu WGS84 određenih astronomskim i GPS mjerenjima kao i mjerenjima duljina i kutova na južnom i sjevernom portalu tunela "Mala Kapela" prikazane su u tablicama 1 i 2.

Tablica 1. Razlika azimuta strane J1-J2 na južnom portalu.

$A_{ELWGS84}^A$ (azimut na elipsoidu određen astronomski)	208° 10' 06,0"
$A_{ELWGS84}^{GPS}$ (azimut na elipsoidu određen GPS-om ¹)	208° 10' 02,5"
$\Delta A_{J1-J2} = A_{ELWGS84}^A - A_{ELWGS84}^{GPS}$	3,5"

Tablica 2. Razlika azimuta strane S1-S4 na sjevernom portalu.

$A_{ELWGS84}^A$ (azimut na elipsoidu određen astronomski)	339° 04' 24,3"
$A_{ELWGS84}^{GPS}$ (azimut na elipsoidu određen GPS-om ¹)	339° 04' 19,8"
$\Delta A_{S1-S2} = A_{ELWGS84}^A - A_{ELWGS84}^{GPS}$	4,5"

Razlika između razlike azimuta na elipsoidu određenih astronomskim i GPS mjerenjima¹ na južnom ΔA_{J1-J2} i razlike azimuta na sjevernom ΔA_{S1-S4} portalu iznosa je

$$\Delta(\Delta A) = \Delta A_{J1-J2} - \Delta A_{S1-S4} = 3,5'' - 4,5'' = -1,0''.$$

Ta bi razlika teorijski trebala biti 0", ali i razlika od 1,0" (s obzirom na dopuštene 6,8") pokazuje da je geodetska mreža iznad tunela "Mala Kapela" dobro postavljena. Tako, primjerice na trećem kilometru razlika $\Delta(\Delta A)$ od 1,0" izaziva odstupanje u poprečnom smjeru od samo 1,4 cm. Na temelju toga zaključili smo da je vanjska geodetska mreža dobro određena i ako poligonski vlakovi u tunelu budu dobro izmjereni može se očekivati vrlo uspješan proboj tunela u horizontalnom smjeru.

Na temelju standardnih odstupanja mjerenja odredili smo dopušteni iznos razlike između razlika azimuta na elipsoidu dobivenih astronomskim i GPS mjerenjima $\Delta(\Delta A)_{dop}$. Standardna odstupanja azimuta na elipsoidu dobivenih GPS mjerenjima su:

- 2,7" na južnom portalu tunela, duljine strane 761 m,
- 1,4" na sjevernom portalu tunela, duljine strane 1421 m.

¹i mjerenjem duljina i kutova u mreži na sjevernom i južnom portalu

Standardno odstupanje određivanja astronomske azimuta bolje je od $0,5''$ (Solarić i dr. 1992 i 1994), a standardno odstupanje određivanja komponenata otklona vertikalne iz mjerenja astrolabom je $0,5''$. Na temelju toga astronomske azimut reducirane na elipsoid određen je standardnim odstupanjem od $\sqrt{0,5''^2 + 0,5''^2} = 0,71''$.

Standardno odstupanje astronomske azimuta reduciranog na elipsoid na jednom portalu u odnosu na drugi portal je $0,71'' \cdot \sqrt{2} = 1,0''$.

Standardno odstupanje razlika azimuta na elipsoidu određenih iz astronomske i GPS mjerenja na ulazu i izlazu tunela je

a) na južnoj strani $\sqrt{2,7''^2 + 1,0''^2} = 2,9''$,

b) na sjevernoj strani $\sqrt{1,4''^2 + 1,0''^2} = 1,7''$.

Standardno odstupanje razlike između razlika azimuta na elipsoidu određenih astronomske i GPS mjerenjima na južnom i sjevernom portalu je

$$\sqrt{2,9''^2 + 1,7''^2} = 3,4''.$$

Dopuštena razlika između razlika azimuta na ulazu i izlazu tunela s 95%-tnom vjerojatnošću je

$$\Delta(\DeltaA)_{\text{dop}} = 3,4'' \cdot 2 = 6,8''.$$

Budući da je $\Delta(\DeltaA) = -1,0''$, a dopušteno je $6,8''$, nakon astronomske kontrole vanjske geodetske mreže tunela "Mala Kapela" mogao se očekivati uspješan proboj tunela i manje dodatnog betoniranja za njegovo izravnavanje u horizontalnom smjeru. Naime, 5 cm deblji beton na 2 km jedne tunelske cijevi promjera 10 m, poskupljuje radove za 440 000 US\$ (Leica 1999). Deblji beton za 17 cm na jednoj tunelskoj cijevi poskupljuje betoniranje za 1 500 000 US\$. Prema tomu dodatna betoniranja i reprofiliranja znatno poskupljuju radove te se isplati uložiti relativno mala dodatna financijska sredstva u nezavisnu, astronomske kontrolu smjera proboja tunela. Ta nezavisna kontrola osobito je važna pri probodu tunela kroz rastresiti materijal, gdje se odmah kopa s punim profilom i potom betonira s čeličnim oplata, nakon čega nema više ispravljanja.

8. Povećanje točnosti smjera proboja tunela

Primjena astronomske kontrole vanjske geodetske mreže u tunelogradnji omogućuje osim nezavisne kontrole mreže i povećanje točnosti davanja smjera proboja tunela, odnosno povećanje točnosti azimuta strana s kojih se poligonskim vlakom ulazi u tunel. Mjerna nesigurnost azimuta strane za orijentaciju poligonskog vlaka na južnom portalu tunela "Mala Kapela", određena iz GPS mjerenja, iznosila je $2,7''$, a na sjevernom portalu $1,4''$. Mjerna nesigurnost astronomske azimuta reduciranog na elipsoid na jednom portalu s obzirom na drugi portal manja je od $1,0''$. Prema tomu, mjerna nesigurnost astronomske azimuta reduciranih na elipsoid približno je dva puta manja od mjerne nesigurnosti azimuta određenih iz GPS mjerenja. Ako se dakle pri izjednačenju vanjske geodetske mreže uvrste i astronomske

azimuti reducirani na elipsoid, moguće je postići veću točnost, osobito ako su strane za orijentaciju poligonskih vlakova kratke. Nadalje, može se povećati točnost orijentacije poligonskih vlakova kojima se ulazi u tunel ako se uzmu u obzir komponente otklona vertikalne na mjerenje prijelomnoga kuta na početnoj točki poligonskog vlaka. To je osobito važno ako su strane za orijentaciju poligonskih vlakova strme.

8.1. Utjecaj otklona vertikalne na prijelomni kut

Da bi se povećala točnost orijentacije poligonskog vlaka potrebno je izmjeriti prijelomni kut na početnoj točki poligonskog vlaka korigirati za utjecaj otklona vertikalne, osobito ako su strane za orijentaciju strme. Odnosno, potrebno je izmjeriti prijelomni kut na fizičkoj zemljinoj površini (geoidu) reducirati na prijelomni kut na elipsoidu jer sve računamo na elipsoidu.

Izmjereni prijelomni kut početne točke poligonskog vlaka reduciramo na prijelomni kut na elipsoidu (slika 5) prema izvedenoj jednadžbi (Heiskanen, Moritz 1967, Torge 1980, Zakatov 1976):

$$\alpha_{EL} = A_{EL1}^{GPS} - A_{ELJ2}^{GPS} \approx \frac{\eta \cdot \cos A_{EL1}^{GPS} - \xi \cdot \sin A_{EL1}^{GPS}}{\tan z_1} - \frac{\eta \cdot \cos A_{ELJ2}^{GPS} - \xi \cdot \sin A_{ELJ2}^{GPS}}{\tan z_{J2}} + \alpha_{FIZ} \quad (1)$$

gdje su

α_{EL} – prijelomni kut u J1 reduciran na elipsoid

A_{EL1}^{GPS} – azimut na elipsoidu od J1 prema 1

A_{ELJ2}^{GPS} – azimut na elipsoidu od J1 prema J2

z_1 – zenitna daljina od J1 prema 1

z_{J2} – zenitna daljina od J1 prema J2

α_{FIZ} – prijelomni kut u J1, izmjeren na fizičkoj Zemljinoj površini.

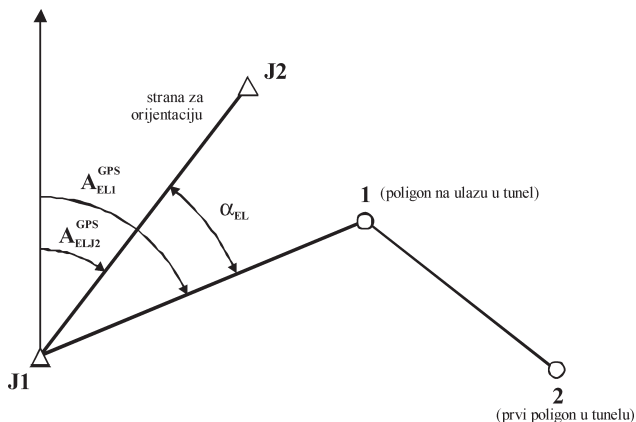
Redukcijom prijelomna kuta izmjerenog na fizičkoj Zemljinoj površini između strana J1–1 ($A_{EL1}^{GPS} = 342^\circ$, $z_1 = 97^\circ$) i J1–J2 ($A_{ELJ2}^{GPS} = 208^\circ$, $z_{J2} = 98^\circ$) na kut na elipsoidu, uz komponente otklona vertikalne¹ na južnom portalu tunela “Mala Kapela” $\eta = -11,91''$, $\xi = -6,84''$, dobivamo prema (1):

$$\alpha_{EL} = A_{EL1}^{GPS} - A_{ELJ2}^{GPS} = +1,74'' + 1,03'' + \alpha_{FIZ} .$$

Utjecaj otklona vertikalne u J1 prema 1 je $+1,74''$, a na poligonu 1 u smjeru prema J1 utjecaj otklona vertikalne je $-1,74''$. Vizura s poligona 1 prema poligonu 2 približno je u horizontu, pa je utjecaj otklona vertikalne u tom smjeru približno jednak nuli kao i dalje u tunelu. Zbog toga je utjecaj otklona vertikalne na cijeli poligonski vlak na južnom portalu samo $1,03''$.

Iako su na tunelu “Mala Kapela” komponente otklona vertikalne velike, na južnom portalu ($\xi = -6,8''$, $\eta = -11,9''$) i sjevernom portalu ($\xi = +0,5''$, $\eta = -3,2''$), utjecaj je otklona vertikalne na prijelomni kut malen jer su strane za orijentaciju približno u ho-

¹u odnosu na elipsoid WGS84



Slika 5. Strana vanjske geodetske mreže za orijentaciju i početak poligonskog vlaka kojim se ulazi u tunel.

rizontu. Na južnom portalu taj utjecaj iznosi 1,03" (za stranu 8° ispod horizonta), što bi na sredini tunela u ispruženom poligonskom vlaku uzrokovalo poprečnu pogrešku od 1,5 cm. Na sjevernom portalu taj utjecaj iznosi 0,05" (za stranu 1° iznad horizonta), što bi na sredini tunela uzrokovalo poprečnu pogrešku od 0,1 cm. Na dužim tunelima, gdje su strane za orijentaciju strme, taj utjecaj treba uzimati u račun.

Kada bi strane za orijentaciju na tunelu "Mala Kapela" bile strme npr. 30° i azimut strana za orijentaciju na jednom i drugom portalu 144°, tada bi utjecaj otklona vertikale na smjer proboja tunela u poprečnom smjeru iznosio 20,2 cm (10,1 cm odstupanje od osi). To bi izazvalo veće troškove reprofiliranja i betoniranja dviju tunelskih cijevi približno za 1 800 000 US\$. Prema tomu isplativo je obaviti dodatnu nezavisnu astronomsku kontrolu smjera proboja tunela i uzeti u obzir komponente otklona vertikale.

8.2. Apriorno standardno odstupanje poprečne pogreške ispruženog poligonskog vlaka u tunelu

Približno apriorno standardno odstupanje poprečne pogreške ispruženog poligonskog vlaka u tunelu možemo izračunati po formuli:

$$\sigma_{\text{poprepolig}} = \sqrt{\sigma_{\text{culaz}}^2 (D-d)^2 + \sigma_{\alpha}^2 [D^2 + (D-2d)^2 + (D-3d)^2 \dots + (D-nd)^2] + \left(\frac{\sqrt{\sigma_{x,y1}^2 + \sigma_{x,y2}^2}}{l} D \right)^2 + \sigma_{x,y1}^2} \quad (2)$$

gdje je

σ_{culaz} – standardno odstupanje mjerenja prijelomnoga kuta na ulazu u tunel (obično je veće nego kod mjerenja ostalih prijelomnih kutova, zbog trepenja zraka)

σ_{α} – standardno odstupanje mjerenja prijelomnoga kuta

D – duljina poligonskog vlaka

D – duljina poligonske strane

L – duljina strane u vanjskoj mreži za orijentaciju poligonskog vlaka

$\sigma_{x,y1}$ – standardno odstupanje koordinata x i y točke vanjske mreže od koje se polazi poligonskim vlakom u tunel

$\sigma_{x,y2}$ – standardno odstupanje koordinata x i y točke vanjske mreže prema kojoj se orijentira poligonski vlak.

Apriorno standardno odstupanje poprečne pogreške poligonskog vlaka do sredine tunela dugoga 6 km, uz $\sigma_{\alpha_{ulaza}} = 2''$, $\sigma_{\alpha} = 1''$, $D = 3\,000$ m, $d = 200$ m, $\sigma_{x,y1} = 0,007$ m, $\sigma_{x,y2} = 0,007$ m i $l = 1000$ m prema (2) iznosi:

$$\sigma_{\text{poprepolig}} = 5,1 \text{ cm.}$$

Standardno odstupanje razlike između osi dobivenih iz poligonskih vlakova s jedne i druge strane tunela iznosi:

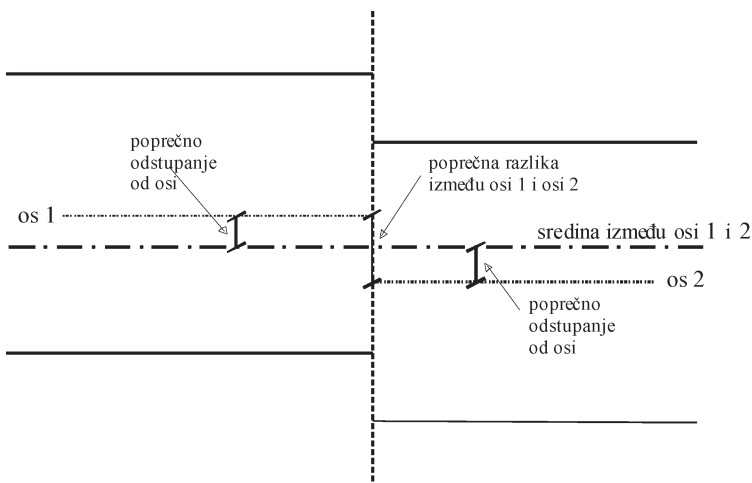
$$\sigma_{\text{razlikepopreč}} = \sqrt{\sigma_{\text{poprepolig}}^2 + \sigma_{\text{poprepolig}}^2} = 7,2 \text{ cm.}$$

Ako je na mjestu proboja tunela os tunela sredina između osi dobivene s jedne i druge strane tunela (slika 6), tada je standardno odstupanje poprečne pogreške proboja

$$\sigma_{\text{poprečproboja}} = \sigma_{\text{razlikepopreč}}/2 = 3,6 \text{ cm.}$$

Dopušteno poprečno odstupanje od osi proboja, na sredini tunela dugoga 6 km, prema mjernoj nesigurnosti, s pouzdanošću 95% iznosi:

$$\text{dopušteno} = \sigma_{\text{poprečproboja}} \cdot 2 = 7,2 \text{ cm.}$$



Slika 6. Poprečno odstupanje od osi tunela.

Prema *Pravilniku o tehničkim normativima i uvjetima za projektiranje i gradnju tunela na cestama* (čl. 53 Zakona o normizaciji, NN 5/96-2336) dopušteno poprečno i uzdužno odstupanje (u centimetrima) pri probodu tunela duljine 6 km iznosi $6\sqrt{D} = 14,7$ cm, gdje je D duljina tunela u kilometrima. Tako veliko dopušteno odstupanje pri probodu tunela može poskupiti reprofiliranje i betoniranje tunela s dvije tunelske cijevi oko 2 600 000 US\$.

Danas bi se ta dopuštena odstupanja mogla smanjiti kada bi se pri određivanju smjera proboda tunela primijenila i dodatna nezavisna astronomska kontrola smjera proboda tunela i ako se uzmu u obzir komponente otklona vertikalne. To bi, vrlo često, omogućilo velike financijske uštede.

9. Poprečno i uzdužno odstupanje proboda tunela “Mala Kapela”

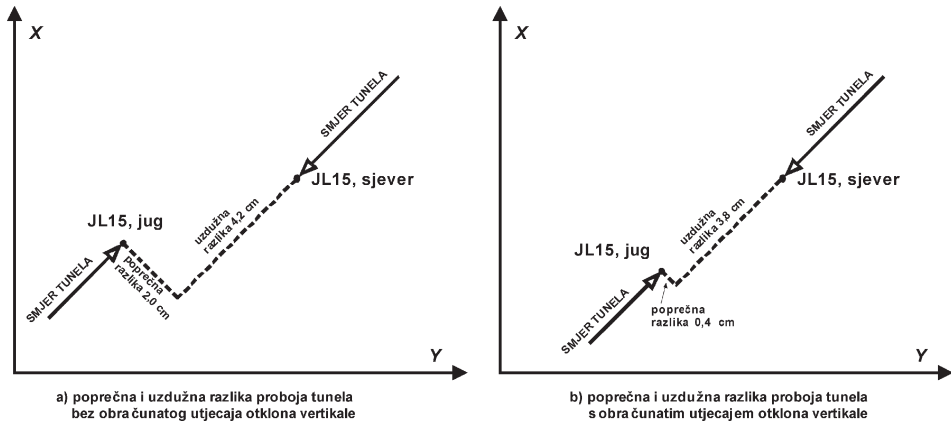
Da bi se odredilo poprečno i uzdužno odstupanje proboda od osi tunela određene su koordinate poligona JL15 (lijeva tunelska cijev) i JD15 (desna cijev) s pomoću slijepljivih poligonskih vlakova sa sjevernog i južnog portala (Furić 2004). U tablici 3 prikazane su razlike koordinata Y i X na mjestu proboda, približno u sredini tunela. Iz tablice vidimo da je prosječna razlika po osi Y 0,043 m, a po osi X 0,016 m.

Tablica 3. Razlike koordinata Y i X na mjestu proboda tunela “Mala Kapela”.

Lijeva cijev tunela				
JL15 sa sjevera	$Y =$	5 518 095,996 m	$X =$	4 994 427,590 m
JL15 s juga	$Y =$	5 518 095,950 m	$X =$	4 994 427,574 m
Razlika	$\Delta Y =$	0,046 m	$\Delta X =$	0,016 m
Desna cijev tunela				
JD15 sa sjevera	$Y =$	5 518 063,327 m	$X =$	4 994 441,014 m
JD15 s juga	$Y =$	5 518 063,288 m	$X =$	4 994 440,997 m
Razlika	$\Delta Y =$	0,039 m	$\Delta X =$	0,017 m
Sredina razlika po osi Y	$\Delta Y =$	0,043 m		
Sredina razlika po osi X			$\Delta X =$	0,016 m

Na slici 7 prikazane su poprečne i uzdužne razlike između osi proboda tunela bez obračunatog utjecaja otklona vertikalne i s njim. Poprečno odstupanje proboda od osi tunela bez obračunatog utjecaja otklona vertikalne iznosi 1,0 cm (2,0 : 2) a uzdužno 2,1 cm (4,2 : 2).

Poprečno odstupanje s obračunatim utjecajem otklona vertikalne iznosi 0,2 cm, a uzdužno 1,9 cm. Postignuta i dopuštena poprečna i uzdužna odstupanja proboda od osi tunela prikazana su u tablici 4.



Slika 7. Poprečne i uzdužne razlike proboja tunela "Mala Kapela".

Tablica 4. Postignuta i dopuštena odstupanja proboja od osi tunela.

	Slijepi poligonski vlak bez obračunatog utjecaja otklona vertikalne	Slijepi poligonski vlak s obračunatim utjecajem otklona vertikalne
Poprečno odstupanje od osi	1,0 cm	0,2 cm
Uzdužno odstupanje po osi	2,1 cm	1,9 cm
Odstupanje po visini	1,0 cm	1,0 cm
Dopušteno poprečno i uzdužno odstupanje po Pravilniku	14,7 cm	14,7 cm
Dopušteno odstupanje po visini po Pravilniku	5,6 cm	5,6 cm

Budući da je postignuto poprečno odstupanje proboja tunela "Mala Kapela" (tablica 4) znatno manje od poprečnog odstupanja prema *Pravilniku* dopuštenog (14,7 cm), proboj tunela bio je uspješan, odnosno vrlo je precizno određena vanjska geodetska mreža a i poligonski vlakovi u tunelu. Utjecaj otklona vertikalne na početne prijelomne kutove bio je malen zato što su strane za orijentaciju poligonskih vlakova bile približno u horizontu. No, ipak je postignuto neznatno bolje poprečno odstupanje ako se uzmu u obzir otkloni vertikalne.

10. Zaključak

Automatiziranom astronomskom kontrolom geodetske mreže iznad tunela neovisnom o klasičnim i GPS mjerenjima kontroliramo je li vanjska geodetska mreža tunela dobro postavljena. Osim toga može se povećati i točnost proboja tunela, osobito ako su strane za orijentaciju poligonskih vlakova kojima se ulazi u tunel kratke i strme.

Geodetski radovi mogu znatno utjecati na troškove izgradnje skupih i velikih građevinskih objekata. Zato je vrlo važno da su geodetska mjerenja i kontrole izvedene s više potpuno nezavisnih (nekoreliranih) metoda. Voditelji geodetskih radova na tunelu *Gotthard-Base-Tunnel* duljine 57 km, napisali su: “*The subsequences of systematic errors can be dramatic and their risk factor is serious. The best and adequate to minimize these risk is given by involving different, non-correlated surveying methods, data processing tools, mathematical models etc.*” (Hagg, Stengl 1997). [Posljedice sustavnih pogrešaka mogu biti dramatične i faktor je njihovih rizika ozbiljan. Najbolje je adekvatno smanjiti taj rizik uključujući različite *nekorelirane (nezavisne)* mjerne metode, procesne obrade podataka, matematske modele itd.]. Upravo je astronomska kontrola nezavisna kontrola geodetske mreže iznad tunela koja omogućuje geodetskim stručnjacima mirnije očekivanje uspješnog proboja. To je i sigurnost investitora da neće biti nepotrebnih troškova za dodatna betoniranja i reprofiliiranja pri izravnavanju tunela. Zato bi za primjenu astronomske kontrole geodetske mreže iznad tunela i smjera proboja, osim projektanata, trebali biti posebno zainteresirani investitori.

Razlika između razlike azimuta na elipsoidu određenih astronomskim i GPS mjerenjima na južnom ΔA_{J1-J2} i sjevernom ΔA_{S1-S4} portalu tunela “Mala Kapela” iznosila je

$$\Delta(\Delta A) = \Delta A_{J1-J2} - \Delta A_{S1-S4} = 3,5'' - 4,5'' = -1,0''.$$

Ta bi razlika teorijski trebala biti 0'', ali i razlika od 1,0'' u odnosu na dopuštenih 6,8'' pokazuje da je geodetska mreža iznad tunela dobro postavljena.

Iz kontrolnih mjerenja nakon proboja tunela dobiveno je, približno na sredini tunela, poprečno odstupanje od osi 1,0 cm. Uzme li se u obzir utjecaj komponenata otklona vertikale poprečno odstupanje iznosi 0,2 cm. Prema tomu, utjecaj otklona vertikale na smjer proboja tunela bio je malen zato što su strane za orijentaciju kojima se ulazi u tunel bile približno horizontalne. Da su strane za orijentaciju poligonskih vlakova bile strme npr. 30° i azimut strane 144°, utjecaj otklona vertikale bio bi 20,2 cm. Takvo znatno odstupanje od osi uzrokovalo bi dodatni trošak od približno 1 800 000 US\$ za reprofiliiranja i betoniranja dviju tunelskih cijevi. Prema tomu, dodatna betoniranja znatno poskupljuju radove pa se isplati dodatno uložiti relativno mala financijska sredstva u nezavisnu, astronomsku kontrolu smjera proboja tunela. Ta kontrola osobito je važna pri proboju tunela s rastresitim materijalima, gdje se kopa s punim profilom i potom odmah betonira s čeličnim oplatama, nakon čega nema više ispravljanja.

Prema Pravilniku o tehničkim normativima za projektiranje i gradnju tunela u Republici Hrvatskoj dopuštena su velika odstupanja pri proboju tunela, koja mogu uzrokovati dodatni financijski trošak. Primjerice, na tunelu duljine 6 km dopušteno je odstupanje 14,7 cm, što kod tunela s dvije tunelske cijevi može poskupiti reprofiliiranja i betoniranje približno i do 2 600 000 US\$. Danas bi dopuštena odstupanja mogla smanjiti ako bi se pri određivanju smjera proboja tunela primijenila dodatna nezavisna astronomska kontrola i uzeo u obzir odklon vertikale.

Literatura

- Džapo, M., Zrinjski, M. (2004): Podzemna geodetska osnova tunela "Mala Kapela". Geodetski list, 3, 117-132.
- Furić, D. (2004): Podaci mjerenja poligonskih vlakova nakon proboja tunela "Mala Kapela".
- Haag, R., Stengele, R. (1997): The Gotthard-Base-Tunnel Surveying of a 57 km long Ungerground Project in the Swiss Alps. FIG-Symposium Surveying of large Bridge and Tunnel Projects, Copenhagen 1997, 23-32.
- Heiskanen, W. A., Moritz, H. (1967): Physical Geodesy. W.H. Freeman and Company, San Francisco, London.
- Leica (1999): Leica TMS PROFILE, 3-D profile measurement in underground construction. Leica Geosystems AG, Heerbrugg.
- Sigl, R. (1978): Geodätische Astronomie. Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe.
- Solarić, N. (1983): Automatische Bestimmung des Richtungswinkels mit dem elektronischen Theodolit Kern E1 mittels Zenitdistanzen der Sonne. XVIII Internationaler Kongress FIG, Sofia, 19-28. Juni 1983.
- Solarić, N. (1985): Automatische Bestimmung des Richtungswinkels mit dem elektronischen Theodolit Kern E1 mittels Zenitdistanzen der Sonne. Wissenschaftlichen Zeitschrift TU Dresden, Heft 6/1984, 114-117.
- Solarić, N. (1991): Automatic grid azimuth by hour angle of sun, a star, or a planet using an electronic theodolite Kern E2. Astrophysics and Space Science, vol. 177, 175-179.
- Solarić, N., Bilajbegović, A., Solarić, M., Špoljarić, D. (1997a): Independent control of geodetic networks above long tunnels by means of astronomically determined azimuths. Proceedings surveying of large bridge and tunnel projects, FIG-symposium, Copenhagen, June 2-5.
- Solarić, N., Bilajbegović, A., Solarić, M., Špoljarić, D. (1997b): Nezavisna kontrola geodetskih mreža iznad dugih tunela pomoću astronomski određenih smjernih kutova, Geodetski list, 1, 13-24.
- Solarić, N., Bilajbegović, A., Špoljarić, D. (1990): Kontrola geodetskih mreža iznad tunela pomoću azimuta. Građevinar, 1990, 11, 12-15.
- Solarić, N., Špoljarić, D. (1992): Accuracy of the automatic astronomical azimuth determination by observing the Polarix with Leica-Kern E2 electronic theodolite. Surveying and Land Information Systems, 2, 80-85.
- Solarić, N., Špoljarić, D. (2003): Kontrola geodetske mreže na ulazu i izlazu tunela "Mala Kapela" automatiziranom astronomskom metodom. Tehnički elaborat, Geodetski fakultet, Zagreb.
- Solarić, N., Špoljarić, D., Lukinac, Z. (1994): Accuracy of automatic astronomical azimuth determination by Astronomical Methods with the Leica-Kern E2 theodolite. Surveying and Land Information Systems, 1, 5-19.
- Solarić, N., Špoljarić, D., Vresk, M., Skender, I. (1991): Automatic determination of the astronomical azimuth by observing a celestial body using electronic theodolite Kern E2 and laptop computer Toshiba T1600. Hvar Obser. Bulletin, vol. 15, 1, 35-43.

- Solarić, N., Veršić, Z., Špoljarić, D. (2005): Independent control of GPS Networks above Long Tunnels by Means of Astronomically Determined Azimuth or Bearing Angels. (u tisku u Survey review u 2005. godini).
- Špoljarić, D. (2002): Automatizacija simultanog određivanja astronomskih koordinata na geoidnim točkama. Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu (disertacija).
- Terzić, P. (1988): Geodetska astronomija. Sveučilišna naklada Liber Zagreb.
- Torge, W. (1980): Geodesy. W. de Gruyter, New York, Berlin.
- Vojnović, I., Đuretek, D. (2003): Elaborat o tunelu Mala Kapela. Geoprojekt, Zagreb.
- Zakatov, P. S. (1976): Kurs višjegeodezije. Moskva.

Independent Astronomic Control of the External Geodetic Network above the Tunnel “Mala Kapela”

ABSTRACT. The paper describes the automated control of the external geodetic network above the tunnel “Mala Kapela” and possible increase of accuracy in tunnel cutting especially if the sides for the orientation of traverses used for entering in the tunnel are short and steep.

Independent astronomic controls of geodetic networks above tunnels applied so far have had only the astronomic azimuth determined in automated manner. The components of vertical deflection have been computed out of topographic masses or geoids, which is more inaccurate than the components determined in astrogeodetic measurements. In autumn 2003, the automated astronomic control of GPS networks above the 6 km long tunnel “Mala Kapela” has been applied on the whole for the first time.

After cutting the tunnel, the obtained transversal deflection from the axis was 1.0 cm.

Considering the influence of vertical deflection, the transversal deflection runs up to 0.2 cm. If the sides for the orientation of traverses used for entering in the tunnel were e.g. 30° steep, and the azimuths of sides were 144°, the influence of vertical deflection would be 20.2 cm. Such a significant deflection from the axis would cause additional expenses for concreting and reprofiling two tunnel tubes amounting up to approximately 1 800 000 US\$. Hence, if we taken the deflection of the vertical into consideration, we can reduce the additional concreting expenses. The Ordinance on Technical Standards for Design and Construction of Tunnels in the Republic of Croatia allow large tolerances in cutting the tunnels, which might cause additional financial costs. We could reduce the tolerances allowed today, if we would apply the additional independent astronomic control in the determination of tunnel cutting direction, and take the deflection of the vertical in consideration.

Keywords: independent control of external geodetic network above tunnels, automated determination of azimuth, automated determination of astronomic latitude and longitude.

Prihvaćeno: 2005-02-09