

UDK 624.191.22:624.042.5:535.3:528.088
Pregledni znanstveni članak

Ispitivanje utjecaja bočne refrakcije na mjerenja horizontalnih pravaca u tunelu

Loris REDOVNIKVIĆ, Marko DŽAPO, Zdravko KAPOVIĆ – Zagreb¹

SAŽETAK. U ovom radu analizirana su složena geodetska mjerenja u tunelogradnji. Izloženi su izvori pogrešaka koje se javljaju pri mjerenju horizontalnih pravaca, s posebnim osvrtom na utjecaj bočne refrakcije. Kako atmosfera nije homogeno sredstvo, vizura ne ide ravnocrtno nego po krivulji koju nije jednostavno matematički definirati, a ovisna je o udaljenosti vizure od uzročnika refrakcije te o promjeni temperature i tlaka zraka. U ovom istraživanju analizirano je više mjerenja pri različitim atmosferskim uvjetima i različitim udaljenostima vizure od tunelske stijene kao glavnog uzročnika bočne refrakcije. Na kraju su prikazani rezultati mjerenja i predstavljen je model koji zadovoljava stroge kriterije mjerenja pri izvođenju geodetskih radova u tunelogradnji.

Ključne riječi: bočna refrakcija, proboj tunela, temperatura.

1. Uvod

Proboj tunela, zbog svoje specifičnosti, pravi je izazov za svakog sudionika u izgradnji tunela. Geodetski poslovi vezani uz proboj vrlo dugih tunela ubrajaju se među najzahtjevnije geodetske zadaće.

Pri probouju tunela primjenjuje se nadzemna i podzemna geodetska osnova. Nadzemna geodetska osnova uspostavlja se kombinacijom terestričkih i satelitskih metoda mjerenja, dok podzemnu geodetsku osnovu najčešće čine poligonski vlakovi ili lanci četverokuta. Kako je najčešće riječ o probouju tunela kroz portale, razvijaju se slijepi poligonski vlakovi koji se uobičajenim postupkom mogu kontrolirati tek kada je tunel probijen, uspostavom obostrano priključenog poligonskog vlaka.

Mjerenja u tunelu posebno su zahtjevna i kompleksna zbog složenosti uvjeta u kojima se odvijaju. Naime, zbog čestih miniranja i stalnog odvoženja materijala, stvara

¹ Loris Redovniković, dipl. ing. geod., prof. dr. sc. Marko Džapo, prof. dr. sc. Zdravko Kapović, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, e-mail: loris.redovnikovic@geof.hr, marko.dzapo@geof.hr, zkapovic@geof.hr.

se puno prašine i dima koji uzrokuju lošu vidljivosti. Osim toga zbog ventilacije koja upuhuje zrak u čelo tunela dolazi do turbulencije zračnih masa, što uzrokuje razlike u temperaturi, tlaku i vlažnosti zraka. Sve to može znatnije utjecati na rezultate geodetskih mjerenja. Stoga geodetska mjerenja treba planirati i izvesti tako da svojom kvalitetom zadovolje stroge kriterije točnosti u točki proboja tunela.

2. Bitni čimbenici koji utječu na točnost određivanja horizontalnih pravaca u tunelogradnji

Zbog svega spomenutog u uvodu, treba biti vrlo oprezan prilikom mjerenja i obratiti pozornost na moguće nesigurnosti pri mjerenju. Pri proboju je posebno osjetljivo poprečno odstupanje osi tunela koje nastaje zbog nesigurnosti pri mjerenju horizontalnih pravaca.

Prilikom prijenosa orijentacije sa stabiliziranih točaka vanjske geodetske osnove u podzemnu poligonometriju moguće je dobiti više vrijednosti za početni smjerni kut, jer je uobičajeno mjeriti vezne kutove na sve vidljive točke mikromreže. Ako se za orijentaciju uzme više od jedne točke, najvjerojatnija vrijednost početnoga smjernoga kuta v_v^p dobiva se iz svih orijentacija kao obična aritmetička sredina (Džapo 1992):

$$v_v^p = \frac{\sum_{i=1}^n v_v^p}{n}, \quad (1)$$

pri čemu je n broj vidljivih točaka mikromreže, koje služe za prijenos orijentacije.

Nabrojene su i ukratko opisane pogreške koje djeluju na preciznost mjerenja horizontalnih pravaca u tunelu:

- pogreška viziranja – ovisi o povećanju durbina instrumenta i iznosi

$$\sigma_v = 10''/M \quad (2)$$

gdje je M povećanje durbina.

U slučaju prosječne vidljivosti i turbulencije zraka, viziranjem na dobro oblikovan signal i duljini vizure od nekoliko stotina metara, pogreška pojedinog viziranja kreće se u intervalu:

$$\sigma_v = 30''/M \text{ do } \sigma_v = 60''/M.$$

- pogreška horizontiranja – ovisi ponajprije o osjetljivosti sustava za horizontiranje. Točnost vrhunjenja libele iznosi 1/5 vrijednosti parsu libele. Pogreška horizontiranja može se prikazati izrazom:

$$\sigma_h = 0,2 \cdot v'', \quad (3)$$

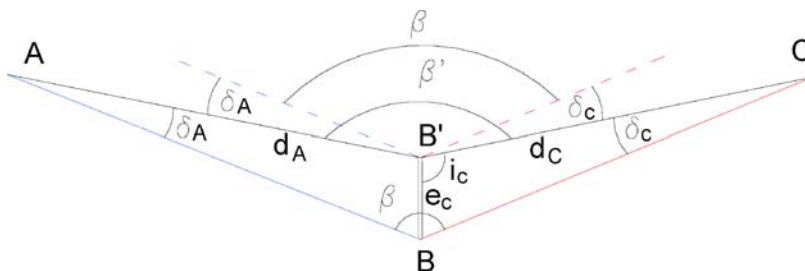
gdje je v'' vrijednost parsu libele.

Utjecaj pogreške horizontiranja odnosno nagiba vertikalne osi teodolita na mjereni horizontalni pravac može se izraziti formulom:

$$\sigma_H'' = \sigma_h'' \cot z, \quad (4)$$

gdje je z zenitna daljina.

- pogreška centriranja instrumenta – ako se opaža sa stativa (kada točke nisu stabilizirane armiranobetonskim stupovima ili konzolama), može doći do pogreške pri centriranju instrumenta. Neka se pri centriranju instrumenta, zbog nesavršenog sustava za centriranje, umjesto na točku B centrira u B' (slika 1).



Slika 1. Pogreška pri centriranju instrumenta.

Sada se umjesto kuta β mjeri kut β' . Razlika između tih dvaju kutova dobije se po formuli (Džapo 2008):

$$\Delta\beta = e_c \rho'' \left[\frac{1}{d_C} \sin(i_c + \beta') - \frac{1}{d_A} \sin i_c \right], \quad (5)$$

gdje su: e_c – linearni ekscentricitet, i_c – kutni ekscentricitet, d_A i d_C – duljine poligonskih strana.

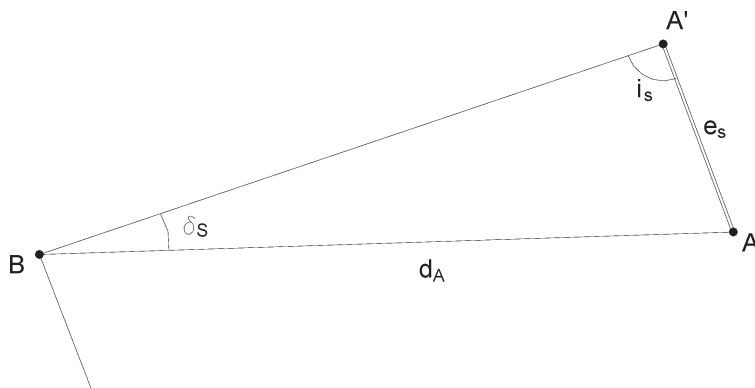
Najnepovoljnija je situacija kada je $\beta' = 180^\circ$ i $i_c = 90^\circ$, tada je

$$\Delta\beta = e_c \rho'' \left[\frac{1}{d_A} \sin 270^\circ - \frac{1}{d_C} \sin 90^\circ \right], \quad (6)$$

i ako je $d_A = d_C = d$, dobije se

$$\Delta\beta = -2 \cdot \frac{e_c \cdot \rho''}{d}.$$

- pogreška centriranja signala – ako je signal na koji se vizira postavljen neprecizno umjesto na točku A u A' , dolazi do pogreške opažanog pravca izražene kutom δ_s (slika 2).



Slika 2. Nepreciznost pri centriranju signala za viziranje.

Iz odnosa

$$\sin \delta_s : \sin i_s = e_s : d_A \quad (7)$$

slijedi

$$\sin \delta_s = \frac{e_s}{d_A} \sin i_s$$

gdje je e_s pogreška centriranja signala. Pogreška mjenenog pravca ovisi o veličini e_s i o kutu i_s pod kojim je signal nagnut prema vizurnoj ravnini.

- pogreška uvijanja stativa – nastaje zbog različitog istežanja pojedinih dijelova stativa zbog zagrijavanja. Ta se pogreška javlja ako ispred ulaznih portala nema stabiliziranih armiranobetonskih stupova nego se koriste stativi. Umanjenje toga utjecaja može se postići ako se stativ zaštiti od izravnog djelovanja sunčevih zraka.
- utjecaj bočne refrakcije – teško je predvidiv i nedovoljno istražen. Uglavnom se ne uzima u obzir u svakodnevnom radu, a može imati znatniji utjecaj na točnost proboja vrlo dugih tunela.

Zbog toga je u ovom radu ispitivan i analiziran utjecaj bočne refrakcije na preciznost mjerenja horizontalnih pravaca u tunelu, odnosno na točnost proboja tunela.

U idejnom projektu geodetske mreže tunela Ćićarija A. Bilajbegović spominje formulu za korekciju mjernog pravca zbog utjecaja bočne refrakcije (Bilajbegović 1990):

$$\varepsilon'' = \frac{\rho''}{d} \sum_{i=1}^j l_i L_i \cdot 0.29993 \cdot 10^{-6} \frac{P}{\alpha T_i^2} \text{ grad } T \quad (8)$$

gdje je:

ε'' – kut refrakcije

L_i – udaljenost sredine plohe koja uzrokuje refrakciju od cilja viziranja (m)

d – ukupna duljina trajektorije optičke zrake (m)

l_i – duljina stijene koja izaziva bočnu refrakciju (m)

p – tlak zraka (mbar)

α – koeficijent širenja zraka = 1/273,2

T_i – temperatura (°K)

$grad T$ – horizontalni temperaturni gradijent (°K/m).

W. Wilhelm i H. J. Matthias proučavajući utjecaj bočne refrakcije na 9 različitih objekata koriste se sljedećom formulom za korekciju pravca zbog utjecaja bočne refrakcije (Wilhelm i Matthias 1988):

$$\delta = \int_{s=0}^{s=D} \frac{D-s}{D} \kappa(s) ds,$$

$$\delta \approx \sum_{i=1}^{i=n} \frac{D-s}{D} \kappa_{si} \Delta s_i, \quad (9)$$

$$\kappa = -2.28 \frac{P}{T^2} 29.3 \frac{dT}{dx},$$

gdje je:

D – duljina zrake od stajališta do cilja (m)

s – udaljenost od stajališta do sredine zone poremećaja (m)

$grad T$ – horizontalni temperaturni gradijent (°C/m)

P – srednji tlak zraka (mmHg)

T – srednja temperatura zraka (°K)

κ – konstanta zakrivljenosti zrake svjetlosti (cc/m)

Δs – duljina djelovanja poremećaja (m)

δ – refrakcijski kut (cc).

A. Johnston, koji je sudjelovao u probouju tunela ispod La Manchea, koristio se sljedećom formulom za korekciju kuta zbog vertikalne refrakcije (Johnston 1991):

$$\rho = -16.3 \frac{P}{T^2} \frac{dT}{dh} \cos \beta, \quad (10)$$

gdje je:

ρ – zakrivljenost vizure (arc/m)

P – tlak zraka (mbar)

T – temperatura (°K)

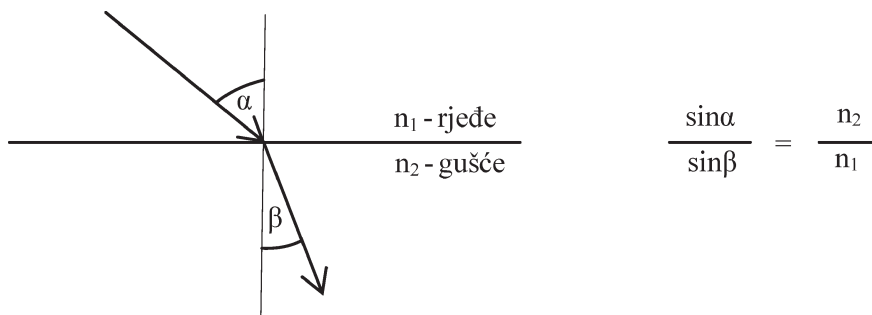
h – udaljenost od stjenke tunela (m)

β – kut između osi tunela i linije vizure.

Johnston je, primjenjujući izraz (10), vertikalni temperaturni gradijent zamijenio horizontalnim.

Kao što se vidi, postoje različiti pristupi rješavanju tog problema. Razlika je u načinu modeliranja atmosfere, ali je karakteristično da u svim formulama temperatura odnosno horizontalni temperaturni gradijent igra glavnu ulogu.

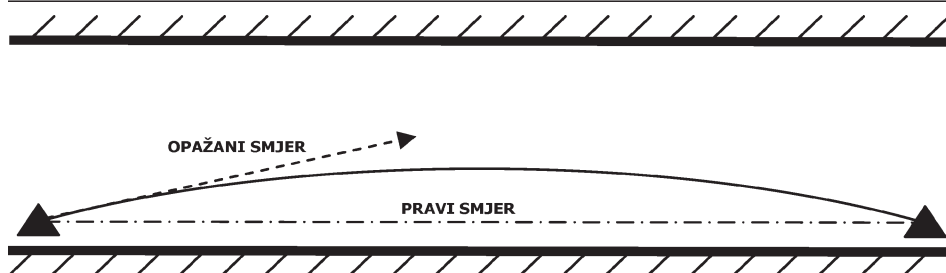
Iz fizike je poznato da je brzina svjetlosti kroz optički gušće sredstvo manja nego kroz optički rjeđe sredstvo (URL 1). Ako zrake svjetlosti upadaju iz optički rjeđeg u optički gušće sredstvo, lomit će se prema okomici (slika 3), koja se nalazi na granici između tih dvaju sredstava različite optičke gustoće (URL 2).



Slika 3. Lom zrake svjetlosti.

Tijekom radova u tunelu postavlja se ventilacijski sustav koji upuhuje vanjski zrak prema čelu tunela. Taj zrak je, uglavnom, različite temperature od temperature stjenke tunela. Zbog razlike u temperaturi dolazi do loma svjetlosti koja, prema Fermatovu načelu (URL 3), ne putuje najkraćim već najbržim putom. Na slici 4 prikazana je situacija u kojoj je stjenka tunela hladnija od zraka u tunelu. Pošto je topliji zrak u sredini tunela rjeđi, svjetlost se zakreće prema sredini tunela (slika 4).

Ako je stjenka tunela toplija od okolnog zraka, tada se zraka svjetlosti zakreće prema stjenci tunela. Takve situacije događaju se za hladnih zimskih dana ili pri proboju tunela s vrlo visokim nadslojem. Što je viši nadsloj, odnosno što je tunel dublji, temperatura je viša. Temperatura raste za oko 25–30 °C po kilometru dubine (URL 4). Tako se pri proboju tunela kroz Alpe predviđa da bi temperatura stjenke mogla biti viša od 50 °C (URL 5).



Slika 4. Utjecaj bočne refrakcije u tunelu.

U Hrvatskoj se u posljednje vrijeme intenzivirala izgradnja autocesta, a time se povećao i broj tunela koji su sastavni dio prometnica. Neki od tih tunela duži su od 4000 m pa se ubrajaju u kategoriju vrlo dugih tunela (Kapović 2010), te je kod njih uputno voditi računa o utjecaju bočne refrakcije pri mjerenjima horizontalnih pravaca.

Ispitivanja utjecaja različitih atmosferskih uvjeta na točnost određivanja horizontalnih pravaca prikazana su u ovom radu. Mjerenja su provedena u tunelu Dolje (slika 5) u zagrebačkoj četvrti Gračanima, u različita godišnja doba i uz različite udaljenosti vizurne osi od bočne stijene tunela.



Slika 5. Tunel Dolje.

3. Mjerenja u tunelu Dolje

Tunel Dolje nalazi se u podnožju Medvednice, na samome rubu Parka prirode Medvednica. Dugačak je 200 metara i probijen je sredinom 20. stoljeća kroz gorsku kosu Rebar, kao sastavni dio zamišljene veze između Zagreba i Stubičkih Toplica (URL 6). Taj je tunel izabran za ispitivanja jer se u njemu ne odvija promet i

izgrađen je u luku s malim polumjerom zakrivljenosti (slika 6). Naime, pri malim polumjerima zakrivljenosti tunela vizurna os na unutrašnjoj strani zavoja prolazi blizu zida i pri kratkim duljinama poligonskih strana.



Slika 6. Unutrašnjost tunela.

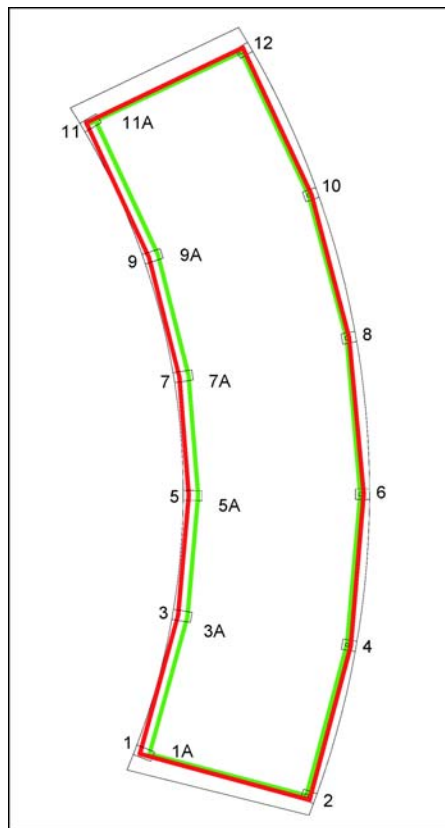
Zbog zahtijevane visoke točnosti pri ispitivanjima, u svim serijama i fazama mjerenja upotrebljavana je precizna mjerna stanica Trimble S6, s kutnim podatkom od 1". Prije svih mjerenja instrument je ispitan na kalibracijskoj bazi Geodetskog fakulteta. Osim toga, instrument je kalibriran prije svakog mjerenja ispred tunela.

Da bi se umanjila pogreška centriranja, u stjenke tunela ugrađene su metalne ploče na koje su se, po potrebi, pričvršćivale metalne konzole debljine 5 mm (slika 7).



Slika 7. Fiksiranje konzola za prisilno centriranje.

Na slici 8 prikazan je tlocrt konzola odnosno stajališta s mjerenim pravcima. Iz slike je vidljivo da su na vanjskoj strani zavoja (slika 8 – desno) postavljene kratke konzole, odnosno točke 2, 4, 6, 8, 10 i 12, koje su bile 50 cm od stjenke tunela. Na unutarnjoj strani zavoja stabilizirane su dulje konzole, na kojima su postavljene po dvije točke za stabilizaciju instrumenta odnosno prizme. Točke 3, 5, 7, 9 i 11 nalaze se na udaljenosti 50 cm od stjenke tunela, dok su točke 3A, 5A, 7A, 9A i 11A udaljene 100 cm od zida tunela (slika 8 – lijevo). Na slici su također prikazani i poligonski vlakovi u obliku zatvorenih poligona (figura), s time da je figura koja prolazi bliže zidu označena crvenom bojom, a ona koja ide dalje od zida zelenom. Radi bolje predodžbe svi rezultati koji se odnose na figuru bližu zidu prikazani su crvenom bojom, dok su rezultati koji se odnose na figuru koja prolazi dalje od zida dani u zelenoj boji.



Slika 8. Tlocrtni prikaz tunela i figura sa stajalištima i mjerenim pravcima.

Ideja je bila da se utjecaj bočne refrakcije kontrolira zatvaranjem horizontalnih figura, odnosno da se utvrde razlike između mjerenih vrijednosti u zatvaranju figura i teorijskih vrijednosti koje se dobiju po izrazu:

$$\Sigma = (n - 2) \cdot 180^\circ \quad (11)$$

gdje je n broj svih kutova u figuri (zbog male površine tlocrta tunela u (11) zanemaren je sferni eksces).

Na svakom stajalištu opažani su pravci i duljine u 3 girusa. Sve točke vizirane su uz pomoć AutoLock funkcije, a instrumentom je tijekom mjerenja upravljano preko prijenosnog TCU kontrolera.

Moglo se očekivati da će točke koje se nalaze bliže zidu biti podložnije utjecaju bočne refrakcije od onih koje se nalaze dalje od zida.

3.1. Mjerenja u ljetnom razdoblju

Mjerenja pravaca u ljetnom razdoblju obavljena su 21. i 22. 6. 2008. od 9 sati prije podne do 2 sata ujutro drugog dana. Mjerenja je izvodio tadašnji diplomant Goran Siuc.

U tablici 1a) dani su podaci o temperaturi i tlaku zraka na svakom stajalištu, te vrijeme početka opažanja na svakom stajalištu.

U tablici 1b) iskazani su prijelomni kutovi (β), suma kutova (IMA) i njezino odstupanje od teorijske vrijednosti (δ) za vlak bliže stijeni. U tablici 1c) dani su podaci koji se odnose na vlak dalje od stjenke tunela.

Tablica 1. Podaci mjerenja u ljetnom razdoblju.

Stajalište	Vrijeme [h]	Temp. [°C]	Tlak [mbar]
2	11:45	23.5	988.3
1	12:59	24.5	988.2
1A	14:18	24.5	988.3
3	14:55	24.0	987.8
3A	16:13	22.5	987.5
4	16:49	23.0	987.4
5	17:27	23.0	987.0
5A	18:11	22.5	986.9
6	18:59	22.5	987.0
7	19:35	22.0	987.0
7A	20:09	22.0	987.2
8	20:43	21.5	987.1
9	21:14	21.5	987.5
9A	22:20	21.0	987.7
10	22:54	21.0	987.9
11	23:31	20.5	987.7
11A	0:02	20.0	987.7
12	0:31	20.5	987.8

1a)

VLAK BLIŽE STIJENI	
β_1	92°49'46"
β_3	186°21'32"
β_5	186°04'00"
β_7	185°59'47"
β_9	185°30'42"
β_{11}	89°36'28"
β_{12}	90°22'05"
β_{10}	174°26'19"
β_8	174°01'16"
β_6	173°54'32"
β_4	173°47'31"
β_2	87°05'14"
IMA	1799°59'19"
TREBA	1800°00'00"
δ	-50"

1b)

VLAK DALJE OD STIJENE	
β_{1A}	92°50'00"
β_{3A}	186°21'53"
β_{5A}	186°04'04"
β_{7A}	186°00'02"
β_{9A}	185°30'58"
β_{11A}	89°21'11"
β_{12}	90°37'23"
β_{10}	174°26'18"
β_8	174°01'16"
β_6	173°54'32"
β_4	173°47'31"
β_2	87°05'03"
IMA	1800°00'11"
TREBA	1800°00'00"
δ	11"

1c)

3.2. Mjerena u jesenskom razdoblju

Tijekom jesenskih mjerenja, u kojima je sudjelovala diplomantica Ana Čabrilo, opažane su iste točke kao i u ljetnim mjerenjima. Mjerenja su obavljena 26. 10. 2008. godine od 8 h ujutro do 20:30 h navečer. U tablici 2 su prikazani podaci tih mjerenja.

Tablica 2. Podaci mjerenja u jesenskom razdoblju.

Stajalište	Vrijeme [h]	Temp. [°C]	Tlak [mbar]	VLAK BLIŽE STIJENI		VLAK DALJE OD STIJENE	
2	9:30	9.5	1020.8				
1	10:00	11.0	1020.8				
1A	10:30	10.5	1020.8				
3	11:35	10.5	1020.6	β1	92°50'23"	β1A	92°50'35"
3A	12:15	10.5	1020.6	β3	186°21'49"	β3A	186°21'57"
4	12:35	11.5	1020.7	β5	186°04'00"	β5A	186°03'47"
5	13:23	11.2	1020.7	β7	185°59'56"	β7A	185°59'54"
5A	14:10	11.0	1020.7	β9	185°30'55"	β9A	185°31'04"
6	14:30	11.0	1020.6	β11	89°36'19"	β11A	89°20'08"
7	15:08	11.0	1020.6	β12	90°22'13"	β12	90°38'07"
7A	15:50	11.0	1020.6	β10	174°26'40"	β10	174°26'40"
8	16:19	11.0	1020.6	β8	174°01'13"	β8	174°01'13"
9	17:35	10.0	1020.5	β6	173°54'34"	β6	173°54'34"
9A	18:08	10.0	1020.5	β4	173°47'28"	β4	173°47'28"
10	18:30	10.0	1020.8	β2	87°04'49"	β2	87°04'30"
11	19:03	9.0	1020.8	IMA	1800°00'19"	IMA	1799°59'57"
11A	19:25	9.0	1020.8	TREBA	1800°00'00"	TREBA	1800°00'00"
12	19:50	9.0	1020.8	δ	19"	δ	-3"

3.3. Mjerenja u zimskom razdoblju

Za vrijeme zimskih mjerenja u kojima je aktivno sudjelovao diplomant Josip Kela-va, dobiveni su rezultati prikazani u tablici 3. Mjerenja su obavljena 24. 2. 2009. godine od 8 h ujutro do 21:30 h navečer.

Tablica 3. Podaci mjerenja u zimskom razdoblju.

Stajalište	Vrijeme [h]	Temp. [°C]	Tlak [mbar]
1	9:30	0.0	995.8
1A	10:10	0.0	996.3
2	12:15	4.0	997.9
3	13:10	4.0	998.6
3A	14:00	4.0	999.0
4	14:12	3.0	999.2
5	15:11	2.0	999.8
5A	15:21	2.0	999.8
6	15:40	2.0	999.9
7	16:31	2.0	1000.2
7A	16:46	2.0	1000.3
8	17:05	2.0	1000.4
9	17:59	1.5	1001.2
9A	18:15	1.5	1001.5
10	18:33	1.5	1001.6
11	19:07	1.0	1002.6
11A	19:35	0.5	1002.8
12	20:00	0.5	1003.2

VLAK BLIŽE STIJENI	
β1	92°49'44"
β3	186°21'53"
β5	186°03'45"
β7	185°59'43"
β9	185°31'12"
β11	89°36'13"
β12	90°22'36"
β10	174°26'26"
β8	174°01'20"
β6	173°54'39"
β4	173°47'21"
β2	87°05'17"
IMA	1800°00'09"
TREBA	1800°00'00"
δ	9"

VLAK DALJE OD STIJENE	
β1A	92°50'17"
β3A	186°22'02"
β5A	186°03'39"
β7A	185°59'42"
β9A	185°31'04"
β11A	89°19'59"
β12	90°38'25"
β10	174°26'26"
β8	174°01'20"
β6	173°54'39"
β4	173°47'21"
β2	87°04'50"
IMA	1799°59'44"
TREBA	1800°00'00"
δ	-16"

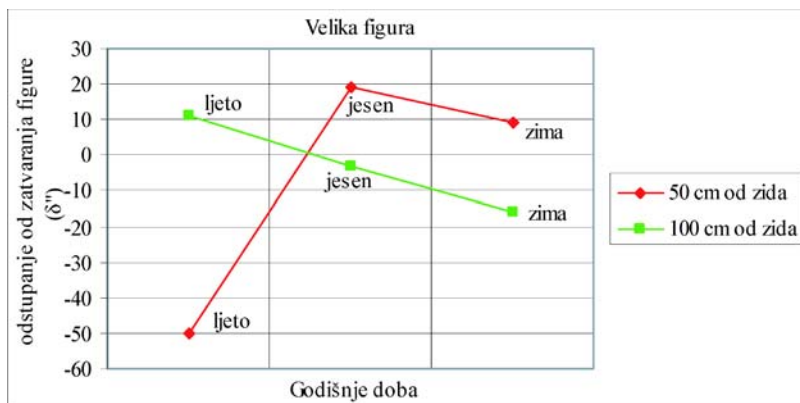
3a)

3b)

3c)

4. Analiza rezultata

Na slici 9 grafički su prikazana odstupanja zatvaranja figura za cijeli tunel (slika 8) ovisno o godišnjem dobu u kojem su se obavljala mjerenja.

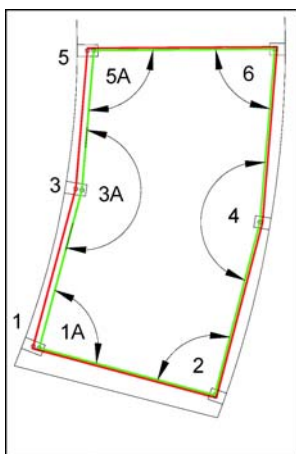


Slika 9. Odstupanja zatvaranja figura za cijeli tunel.

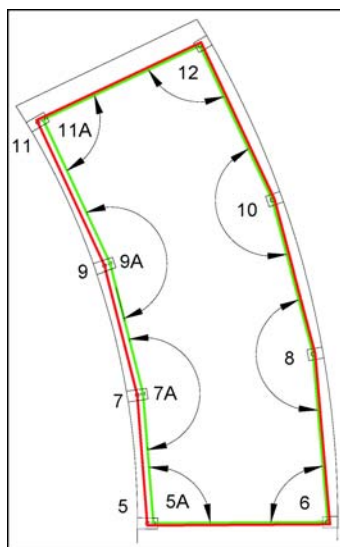
Iz grafikona je vidljivo da se tijekom mjerenja u ljetnom i jesenskom razdoblju, sukladno očekivanju, pojavilo manje odstupanje od teorijske vrijednosti zatvaranja figure za figuru dalje od zida (zeleno krivulja bliže nuli). Također je vidljivo da su u mjerenjima u ljetnom razdoblju odstupanja bila veća nego u onima u jesen, što se i očekivalo.

Međutim nije se očekivalo da su, u zimskim mjerenjima, pri zatvaranju figura za cijeli tunel bile manje razlike u figuri bližoj zidu.

Da bi se dobio bolji uvid u ono što se događalo tijekom mjerenja, dodatno je tunel podijeljen na južni i sjeverni dio s pripadajućim vlakovima, odnosno figurama (slike 10 i 11).

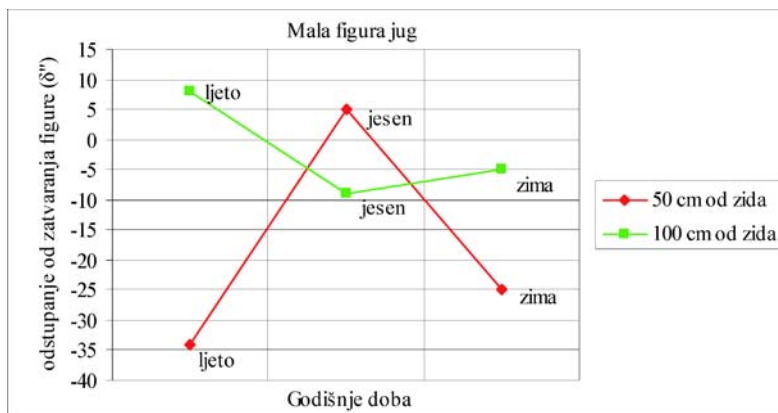


Slika 10. *Figure na južnom dijelu tunela.*



Slika 11. *Figure na sjevernom dijelu tunela.*

Na slikama 12 i 13 grafički su prikazana odstupanja zatvaranja figura za južni i sjeverni dio tunela (slike 10 i 11) ovisno o godišnjem dobu u kojem su se obavljala mjerenja.



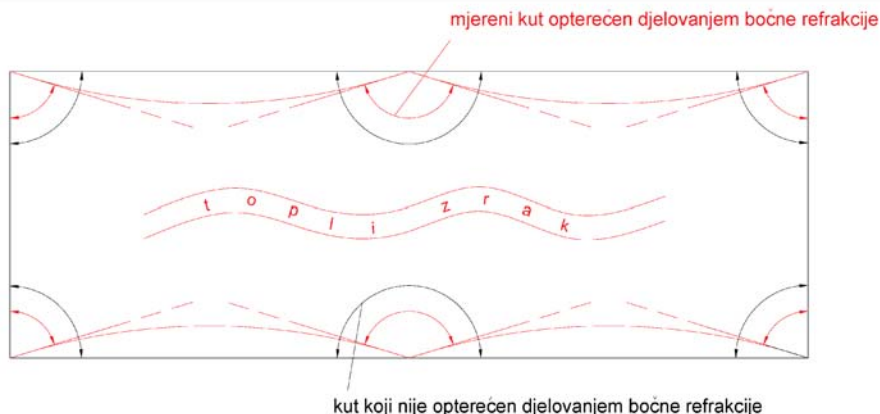
Slika 12. *Odstupanja zatvaranja figura za južni dio tunela.*



Slika 13. Odstupanja zatvaranja figura za sjeverni dio tunela.

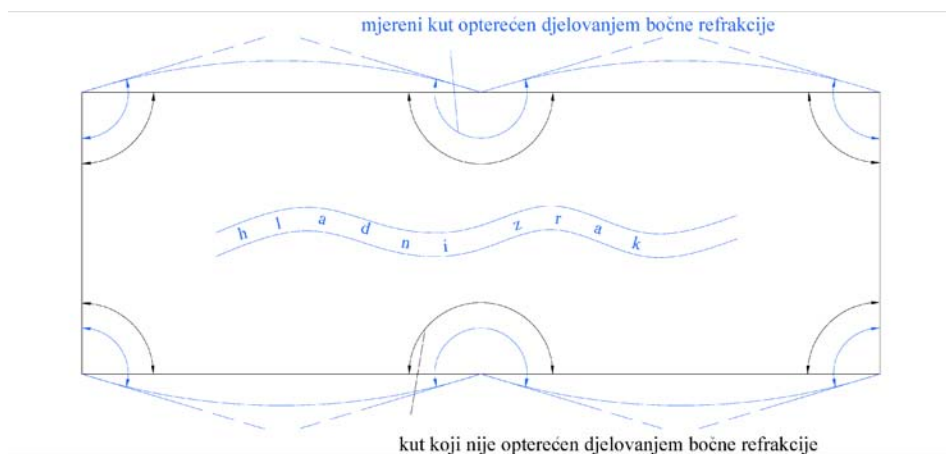
Iz slika je vidljivo da su odstupanja veća za figure bliže zidu. Ako se pažljivo promotri vremenski uvjeti odnosno doba dana u kojem se odvijalo zimsko mjerenje, može se uočiti da su mjerenja za južnu figuru obavljena tijekom dana, kada je sunce zagrijavalo južni portal i temperatura izvan tunela je bila veća nego ona unutar tunela. Zbog toga je zrak u sredini tunela bio topliji od onoga uz stjenku, tako su umjesto "idealnih" kutova (na slici 14 prikazani crnom bojom) opažani kutovi (na slici 14 označeni crvenom bojom). To je razlog što je suma kutova u toj figuri manja od teorijske (slika 12).

Opažanja na sjevernom dijelu tunela obavljena su nakon zalaska sunca, i kada je zrak izvan tunela postao hladniji pa je i zrak po sredini tunela bio hladniji od ono-



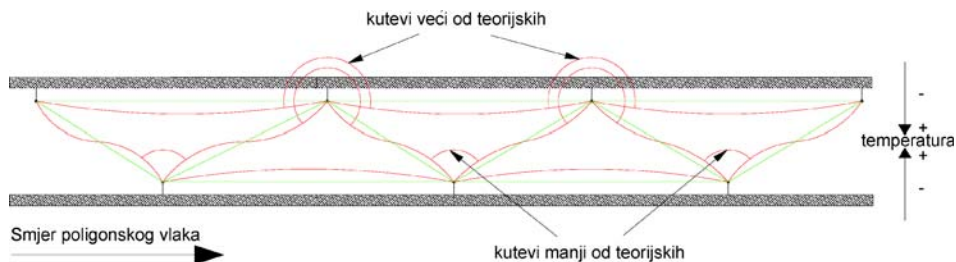
Slika 14. Utjecaj strujanja toplog zraka na mjerene kutove.

ga uz rub. U tim je uvjetima suma kutova u sjevernoj figuri bila veća od teorijske vrijednosti (slika 15). Kada se te dvije figure (slike 14 i 15) spoje, zbog suprotnih predznaka, ukupna razlika za cijelu figuru je manja za pravce koji prolaze bliže zidu nego za one dalje od zida (vidi sliku 9).



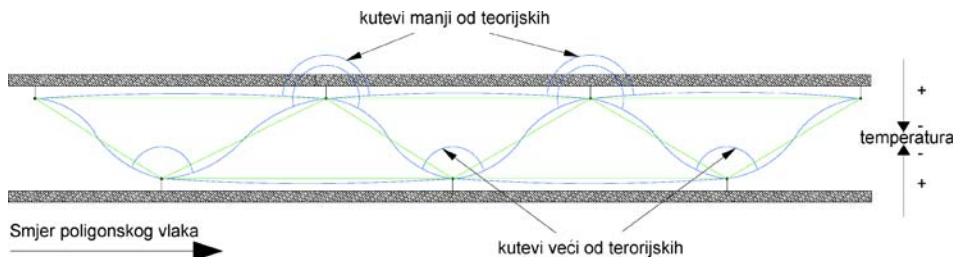
Slika 15. Utjecaj strujanja hladnog zraka na mjerene kutove.

Jedan od načina na koji se može smanjiti utjecaj bočne refrakcije na mjerenja horizontalnih pravaca u tunelu je postavljanje poligonskog vlaka u izlomljenom ("cik-cak") obliku. Ako vizura ide "cik-cak", umjesto uz stjenku tunela, dobivamo situacije prikazane na slikama 16 i 17. Na slici 16 prikazano je što se događa kada je zrak po sredini tunela topliji od zraka uz stjenku. Vidi se da se vizura prilikom prelaska s jedne na drugu stranu tunela lomi u obliku "S" krivulje. Na taj način dobiva se da su s jedne strane tunela kutovi manji od teorijskih, a s druge strane veći, te je ukupni utjecaj bočne refrakcije umanjen.



Slika 16. Kutovi u izlomljenom poligonskom vlaku kada je zrak po sredini tunela topliji.

Što se događa s vizurom u slučaju kada je zrak po sredini tunela hladniji od zraka uz stjenku tunela, vidimo na slici 17.



Slika 17. Kutovi u izlomljenom poligonskom vlaku kada je zrak po sredini tunela hladniji.

Ako nije moguće mjeriti u izlomljenom vlaku, a riječ je o proboju dugog tunela u kojem postoji znatnija razlika u temperaturi između zraka koji se nalazi u sredini tunela i onoga uz stjenku tunela, potrebno je mjeriti horizontalni temperaturni gradijent i primijeniti neku od formula za korekciju utjecaja bočne refrakcije.

U ovim je ispitivanjima primijenjena formula (9) na zimska mjerenja bliže stijeni tunela. Horizontalni temperaturni gradijent određen je razlikom temperature mjerene na udaljenosti od 5 cm sa svake strane vizure. Kako se u formuli traži temperaturni gradijent u $^{\circ}\text{C}/\text{m}$, dobivenu razliku množili smo s 10. Također treba napomenuti da je pri mjerenjima upotrebljavan samo jedan termometar, iako bi za kvalitetnije određivanje temperaturnoga gradijenta bila potrebna barem dva precizna i baždarena termometra. U tablici 10 nalaze se podaci o točkama stajališta, orijentacije, temperaturnom gradijentu te o korekciji mjenenog pravca zbog utjecaja bočne refrakcije izračunatoj prema izrazu (9).

U zadnjoj koloni tablice 4 dana je suma korekcija za južnu, sjevernu i za veliku figuru bliže zidu. Primjenom izraza (9) dobilo se da južna figura bliže zidu odstupa od teorijske vrijednosti zatvaranja figure umjesto $-25''$ samo $+2''$, a sjeverna figura umjesto $34''$ odstupa za $4''$. Za veliku figuru bliže zidu odstupanje bi se od teorijske vrijednosti zatvaranja figure smanjilo s $9''$ na $6''$.

Tablica 4. Korekcija pravaca zbog utjecaja bočne refrakcije.

st	or	d_h (m)	gradT ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$)	δ''	$\Sigma\delta''$
1	3	32.17	1	-3	jug
3	1	32.17	-3	10	
	5	33.61	-4	13	
5	3	33.61	-2	7	
				$\Sigma\text{jug} =$	27
5	7	30.05	-1	0	sjever
7	5	30.05	0	-3	
	9	30.18	0	-3	
9	7	30.18	3	-6	
	11	28.73	3	-9	
11	9	28.73	4	-9	
				$\Sigma\text{sjever} =$	-30
				ukupno =	-3

Dobiveni rezultati upućuju na to da se i jednostavnim određivanjima temperaturnoga gradijenta (mjerenjem temperature u neposrednoj blizini s obje strane vizure) može dobiti prilično dobra korekcija mjerenog pravca zbog utjecaja bočne refrakcije. Ovdje se postavlja pitanje koliko je područje djelovanja refrakcije. U našem primjeru uzeto je da refrakcija djeluje na cijeloj dužini poligonske strane, zbog toga što je vizura prolazila vrlo blizu zidu. U svakom slučaju bilo bi poželjno obaviti dodatna mjerenja u svrhu testiranja postojećih algoritama za korekciju utjecaja bočne refrakcije.

U ovom istraživanju posebno nas je zanimalo utvrđivanje maksimalnog iznosa odstupanja u zatvaranju figura. Maksimalno odstupanje u iznosu od $-50''$ bilo je tijekom mjerenja u ljetnom razdoblju, i to na velikoj figuri bliže zidu čija je ukupna dužina 333 m. U figuri dalje od zida maksimalno odstupanje iznosilo je $-16''$ i pojavilo se za vrijeme mjerenja u zimskom razdoblju. Dakle, postavljanjem stajališta na udaljenost 1 m od stjenke tunela dobili smo oko 3 puta manje maksimalno odstupanje nego pri postavljanju instrumenta na udaljenost od 0,5 m. Ako bi ta odstupanja prikazali u obliku maksimalne moguće pogreške u proboju tunela to bi, na dužini od 333 m, iznosilo 8 cm za figuru bliže zidu, odnosno 2,5 cm za figuru dalje od zida.

U ovoj analizi ipak treba uzeti u obzir i neke čimbenike koji nam nisu išli u prilog:

- Poznato je da su atmosferska kolebanja najveća na ulazu u tunel odnosno izlazu iz tunela. Približavajući se sredini tunela, atmosferska kolebanja su manja. Kako je tunel Dolje dugačak samo 200 metara, atmosferske su promjene bile izrazite, tako da se može pretpostaviti da su razlike u zatvaranju figura veće nego što bi bile pri proboju nekog dugog tunela.
- Osim toga u ovom smo radu, unatoč činjenici da je tunel dugačak samo 200 m, zbog njegove velike zakrivljenosti simulirali da je riječ o velikom tunelu. Vizura koja je bila dugačka samo 30 m prolazila je blizu stjenke tunela kao što bi to bio slučaj s dužim stranicama, u tunelu s većim radijusom zakrivljenosti.

U ovim se istraživanjima radilo o vrlo kratkim poligonskim stranama, prosječne duljine oko 30 m. Poseban su problem bile dvije vrlo kratke strane, koje su iznosile samo 9, odnosno 9,5 metara. Prema izrazu za računanje standardnog odstupanja prijelomnog ili veznoga kuta ovisno o duljini poligonske strane (Džapo 1992):

$$\sigma = \sqrt{2,38 + 1,44 \cdot \frac{10^5}{d^2}} \quad (12)$$

dobije se da je za stranu od 9 m standardno odstupanje $\sigma = 42,19''$, a za $d = 30$ m $\sigma = 12,74''$.

Pri proboju dugih tunela prosječne su duljine strana između 100 i 200 m. Standardno odstupanje prijelomnoga kuta tada bi iznosilo:

$$\text{za } d = 100 \text{ m } \sigma = 4,08'' \text{ , a za } d = 200 \text{ m } \sigma = 2,42'' \text{ ,}$$

što je znatno manje nego u našem primjeru. Pretpostavljamo da su zbog toga i dobiveni predznaci u zatvaranju figura za mjerenja dalje od zida uglavnom suprotni od očekivanih.

5. Zaključak

Na osnovi provedenih istraživanja može se zaključiti da utjecaj bočne refrakcije postoji i nije ga jednostavno modelirati, odnosno precizno izračunati. Iako su mjerenja obavljena u kratkom tunelu, utvrđene su neke zakonitosti i mogu se donositi valjani zaključci i preporuke:

- utjecaj bočne refrakcije manji je kada je podjednaka temperatura unutar i izvan tunela
- utjecaj bočne refrakcije manji je što je stajalište instrumenta dalje od stjenke tunela
- kako bi se smanjio utjecaj bočne refrakcije, poligonske vlakove treba razvijati u izlomljenom (cik-cak) obliku.

Kako tempo izvođenja tunela ovisi o mnogim čimbenicima, teško je postići da se geodetska mjerenja odvijaju u doba dana kada je temperatura izvan tunela jednaka onoj u njemu. Isto tako, teško je izvedivo imati stajališta instrumenta dovoljno udaljena od stjenke tunela, ili razvijati vlak u cik-cak liniji. Ako je riječ o probou vrlo dugog tunela u kojem postoje znatnije razlike u temperaturi zraka duž vizurnog pravca, uputno je mjerene pravce korigirati za utjecaj bočne refrakcije prema nekoj od recentnih formula (npr. 8 ili 9).

Literatura

- Bilajbegović, A. (1990): Idejni projekt geodetske mreže tunela Ćićarija, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Džapo, M. (1992): Neki aspekti izjednačenja poligonskih vlakova s posebnim osvrtom na mjerenje poligonskih strana, magistarski rad, Zagreb.
- Fowler, S. (2006): Design and preanalysis of underground control networks for tunnel construction, dissertation, University of Otago, Dunedin, New Zealand.
- Johnston, A. (1991): Lateral Refraction in Tunnels, Survey Review, 31 (242), 201–220.
- Kapović, Z. (2010): Geodezija u niskogradnji, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Wilhelm, W., Matthias, H. J. (1988): Empirische Bestimmung der Seitenrefraktion an 9 Objekten in der Praxis, X. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, Beitrag C6, Dümmler, Bonn, ISBN 3-427-78081-3, C6-C6/13.
- Wilhelm, W. (1994): Die Seitenrefraktion: Ein unbeliebtes Thema? Oder ein Thema nur für Insider? Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, 2/94, 75–82.
- URL 1: Svjetlovodi,
http://www.google.hr/url?sa=t&source=web&ct=res&cd=1&ved=0CAYQFjAA&url=http%3A%2F%2Fspvp.zesoi.fer.hr%2Fseminari%2F2005%2FMarasovicJosko_Svjetlovodi.pdf&ei=uijDS6GkOof2OffdyJYE&usq=AFQjCNEygOCi1BzZG1L86Eb9aF8dnJn9ug, (12.4.2010.).
- URL 2: Refrakcija, <http://hr.wikipedia.org/wiki/Refrakcija>, (12.4.2010.).

URL 3: Fermat's principle,

http://en.wikipedia.org/wiki/Fermat's_principle#Modern_version, (12.4.2010.).

URL 4: Geothermal gradient, http://en.wikipedia.org/wiki/Geothermal_gradient, (12.4.2010.).

URL 5: Heat In Great Tunnels, <http://chestofbooks.com/crafts/scientific-american/sup7/Heat-In-Great-Tunnels.html>, (12.4.2010.).

URL 6: Lokaliteti, http://www.pp-medvednica.hr/Medvednica_hr/Medvednica_kultura2.htm, (12.4.2010.).

Testing of the effect of lateral refraction on the measurements of horizontal directions in the tunnel

ABSTRACT. This paper analyzes the complexity of tunnel surveying. Sources of errors which are shown herein are those that occur in the measurement of horizontal lines, with special emphasis on the influence of lateral refraction. Since the atmosphere is not a homogeneous medium, therefore it follows the curve which is not mathematically defined, but is dependent on the distance from the visor line of the cause of refraction and changes in temperature and air pressure. In this study, there are several processed measurements under different atmospheric conditions and a visor line distance from the tunnel wall, which is in fact, the cause of refraction. Finally, the measurement results are shown together with the model which meets the stringent criteria for performing tunnel surveying.

Keywords: lateral refraction, breakthrough of the tunnel, temperature.

Prihvaćeno: 2011-09-01