

Utjecaj konfiguracije reljefa na preciznost geodetskih mjerenja

Ilija GRGIĆ, Tomislav BAŠIĆ, Danko MARKOVINOVIĆ – Zagreb¹

SAŽETAK. U svrhu uspostave geodetske osnove primjenjuju se različite geodetske metode. Metoda koja se primjenjuje u korelaciji je sa zahtjevima točnosti projekta. Ovaj rad bavi se analizom utjecaja konfiguracije reljefa na točnost mjerenja duljina i na točnost određivanja visinskih razlika trigonometrijskim nivelmanom. Mjerna nesigurnost uređaja kojima se izvode mjerenja odnosi se na idealne uvjete. Kako se geodetska osnova ne uspostavlja u idealnim uvjetima, vrlo je važno istražiti koja se preciznost može ostvariti mjernim uređajima u stvarnim uvjetima mjerenja.

Ključne riječi: geodetska osnova, preciznost, duljine, visinske razlike, mjerna nesigurnost.

1. Uvod

Geodetska osnova uspostavlja se na ograničenom području, a njezina veličina i geometrijska konfiguracija ovise o njezinoj namjeni, veličini i karakteristikama objekta, mogućnostima stabilizacije točaka, vrsti mjerenja itd. (Rožić 2001). Uspostavlja se najčešće istovremeno u svrhu prenošenja matematički definirane cjeline, opisane određenim brojem točaka s pripadajućim koordinatama i visinama, u naravi iskolčenjem. Pritom svojom kvalitetom treba omogućiti iskolčenje s unaprijed definiranom preciznošću i poslužiti u svrhu praćenja pomaka i deformacija. Za uspostavu geodetske mikromreže važno je poznavati dopuštena odstupanja i tolerancije objekta kao i vrijednost očekivanih pomaka i deformacija (Grgić i dr. 2007). Radi osiguranja prijenosa visina odnosno praćenja visinske komponente potrebno je razviti visinsku geodetsku osnovu koja je najčešće identična s položajnom geodetskom osnovom. Uspostava geodetske osnove za potrebe izgradnje

¹ dr. sc. Ilija Grgić, Državna geodetska uprava, Gruška 20, HR-10000 Zagreb, Croatia, e-mail: ilija.grgic@dgu.hr, prof. dr. sc. Tomislav Bašić, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Croatia, e-mail: tomlav.basic@geof.hr,

dr. sc. Danko Markovinović, Državna geodetska uprava, Gruška 20, HR-10000 Zagreb, Croatia, e-mail: danko.markovinovic@dgu.hr.

velikih infrastrukturnih objekata razvija se uglavnom prije izgradnje prilaznih cesta u uvjetima neuređenoga gradilišta. Stabilizacija mikromreža na ulaznom i izlaznom portalu u tunelogradnji ili uspostava geodetskog četverokuta ili složeni-jeg oblika mreže za potrebe mostogradnje, obavlja se uz prethodnu analizu kartografskih podloga u svrhu pronalaženja optimalne geometrije, ali i optimalne iskoristivosti mreže za vrijeme gradnje (Kapović 2010). Mnoštvo parametara utječe na definitivni odabir konačnog oblika mreže: utjecaj otklona vertikale, mjerna metoda određivanja položaja i visina točaka mreže, konfiguracija terena i dr.

Kontrola kvalitete mjernog instrumentarija posebno je važna s obzirom na to da je pri uspostavi geodetske osnove često riječ o vrlo visokim zahtjevima preciznosti. Ispitivanje i umjeravanje instrumentarija te periodičnost provođenja ispitivanja i umjeravanja instrumentarija jedna je od temeljnih pretpostavki za obavljanje visoko preciznih geodetskih zadaća. Inženjer prije početka obavljanja tako složenih zadaća mora poznavati stanje mjernog instrumentarija, je li u stanju raditi sukladno tehničkim specifikacijama proizvođača, te je li potrebno obaviti ispitivanje i umjeravanje instrumentarija. Također je važno imati saznanja o mogućim izvorima sustavnih pogrešaka kao što su adicijske konstante tahimetra, pogreška centriranja zbog loše projekcije optičkog viska, adicijskih konstanti prizmi itd. Odgovarajuća priprema instrumentarija te primjena odgovarajućih instrumentalnih korekcija za vrijeme obavljanja mjerenja je imperativ, ali se na žalost vrlo često izostavlja u svakodnevnoj praksi (Brunner 2007), pa se time ignoriraju odredbe Zakona o mjeriteljstvu koje obvezuju korisnika mjernih uređaja da ih održava u tehničkom stanju koje osigurava preciznost mjerenja.

2. Geodetske mreže za velike infrastrukturne objekte

U Republici Hrvatskoj posljednjih je godina izgrađeno nekoliko kapitalnih cestovnih objekata duž autoceste Zagreb–Split (tuneli Mala Kapela, Plasina i Sveti Rok), u svrhu boljeg povezivanja priobalja s autocestom i naseljima sjeverno od Biokova (tunel Sveti Ilija), a neki su u fazi pripreme za gradnju (most Pelješac i tunel Debeli brijeg). Za potrebe njihove gradnje uspostavljene su geodetske osnove u kojima su obavljena terestrička, GNSS mjerenja i mjerenja geometrijskim nivelmanom (slika 1), (Grgić 2011).

Precizno izvođenje građevinskih radova na temelju prethodno obavljenih geodetskih mjerenja izvodi se u kontinuitetu ili sinkronizirano ako narav posla to dopušta, a počinjene se pogreške s obzirom na međusobnu ovisnost etapa građenja teško ili uz enormne troškove ispravljaju. Zbog toga je važno osmisliti takav koncept geodetskih mjerenja koji će onemogućiti ili maksimalno reducirati pogreške u realizaciji te naglasiti nezaobilaznost i vrijednost inženjerske geodezije u graditeljstvu.

Upravo je zbog toga vrlo važno analizirati geodetska mjerenja te istražiti uzroke koji mogu rezultirati odstupanjem preciznosti izvedenih mjerenja od deklariranih vrijednosti mjernih nesigurnosti proizvođača geodetskih mjernih uređaja. Analiza mikromreža uspostavljenih za potrebe građenja nekoliko kapitalnih objekata obavljena je uzimajući u obzir različitosti konfiguracije reljefa.



Slika 1. Lokacije kapitalnih cestovnih objekata.

2.1. Osnovni podaci o uspostavljenim mikromrežama

Radovi na uspostavi mikromreža za potrebe gradnje kapitalnih objekata obuhvaćaju stabilizaciju mikromreža s 3–6 točaka, izmjeru točaka mikromreža terestričkom i/ili GNSS metodom u svrhu položajnog definiranja točaka, priključak točaka mikromreže metodom geometrijskog nivelmana na repere iz državne visinske mreže u svrhu određivanja visina, te obradu podataka i izračun koordinata i visina nakon toga. Za sva izjednačenja korišten je Gauss-Markovljev model posrednih mjerenja metodom najmanjih kvadrata (Feil 1989).

Gauss-Markovljev model je matematički linearni model koji određuje međusobni odnos obavljenih mjerenja (stohastičkih veličina) i traženih nepoznanica položaja točaka u mreži (parametara modela). Gauss-Markovljev model sastoji se od funkcionalnog (determinističkog) i slučajnog (stohastičkog) dijela (Rožić 1993, Kuang 1996).

Funkcionalni model glasi:

$$\mathbf{E}(\mathbf{l}) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} \quad \text{ili} \quad \mathbf{l} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (1)$$

dok je stohastički model definiran sljedećom relacijom:

$$\mathbf{E}(\boldsymbol{\varepsilon}\boldsymbol{\varepsilon}^t) = \mathbf{V}_{\Pi} = s_0^2 \cdot \mathbf{Q}_{\Pi} = s_0^2 \cdot \mathbf{P}^{-1} \quad (2)$$

pri čemu su:

n – broj mjerenja, u – broj nepoznanica, \mathbf{l} – vektor mjerenja, \mathbf{P} – matrica težina opažanja, $\mathbf{E}(\mathbf{l})$ – očekivanje vektora mjerenja, \mathbf{A} – konfiguracijska matrica ili matrica dizajna, $\boldsymbol{\varepsilon}$ – vektor pravih pogrešaka mjerenja, \mathbf{V}_{Π} – matrica kovarijance mjerenja, s_0^2 – referentno standardno odstupanje, \mathbf{Q}_{Π} – matrica kofaktora mjerenja.

Gauss-Markovljevi model određen izrazima (1) i (2), primijenjen na podatke mjerenja, poprima sljedeći oblik:

$$\mathbf{l} + \mathbf{v} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} \quad \mathbf{P} = \mathbf{Q}_{\Pi}^{-1} \quad (3)$$

pri čemu su: \mathbf{v} – vektor najvjerojatnijih popravaka mjerenja, \mathbf{P} – matrica težina mjerenja.

Podaci o duljinama i visinskim razlikama određenim trigonometrijskim nivelmanom koji su korišteni u postupku izjednačenja prikazani su u tablici 1.

Kao rezultat izjednačenja dobivena su referentna standardna odstupanja za mjerene duljine s_{d0} i za visinske razlike mjerene trigonometrijskim nivelmanom s_{dH0} .

Referentna standardna odstupanja visinskih razlika u analiziranim mikromrežama iznose maksimalno 10 mm/ $\sqrt{\text{km}}$, a duljina 11 mm/ $\sqrt{\text{km}}$ (tablica 2), (Grgić 2011).

Deklarirane mjerne nesigurnosti mjernih stanica kojima su izvedena mjerenja na uspostavi mreža iznose 1 mm + 1 ppm za duljine te 1" za pravce. One se odnose na stabilne vremenske uvjete (Grgić 2011). U realnim uvjetima izvođenja terenskih radova konfiguracija terena često je takva da su atmosferske prilike na stajalištima bitno drugačije od onih koje vladaju duž mjerene duljine/pravca. Temperatura, vlažnost i tlak zraka na stajališnim točkama mikromreže se mjere, ali duž putanje zrake između točaka, atmosferski uvjeti su nepoznanica, pa se zapravo utjecaj atmosferskih uvjeta na mjerenje duljina ne eliminira nego se aproksimacijom samo reducira. Do potpunog eliminiranja utjecaja atmosferskih uvjeta na mjerenu duljinu moglo bi doći samo pod pretpostavkom da je poznat trodimenzionalni model atmosfere koji bi omogućio da se duž putanje mjerene duljine u svakoj točki interpoliraju potrebne vrijednosti. Nepoznavanje atmosferskih uvjeta rezultira sustavnim pogreškama u mjerenju duljina koje su tim veće što je konfiguracija reljefa nepravilnija. Uspostava mikromreža za potrebe izgradnje nekoliko tunela ovisila je ponajprije o reljefu. Prosječne udaljenosti između točaka iznosile su 275–1150 m, a prosječne visinske razlike iznosile su 17–101 m (tablica 2). Za potrebe ovog istraživanja sukladno reljefnoj raznolikosti uveden je pojam spljoštenosti mreže, koji označava odnos srednje udaljenosti između točaka mikromreže sa srednjom visinskom razlikom (tablica 3).

Tablica 1. *Prikaz duljina i visinskih razlika u analiziranim mikromrežama.*

	od	do	dH (m)	d (m)	od	do	dH (m)	d (m)
Tunel Mala Kapela	S2	S3	28,188	952,128	S4	S1	-23,788	1420,770
	S2	S4	-50,179	1709,013	S4	S3	78,399	1183,914
	S2	S1	-73,996	531,535	S1	S3	102,180	1098,668
Tunel Sveti Rok	P6	P71	-188,529	847,352	P5	P2	-63,543	809,899
	P6	P9	-245,330	662,886	P5	P1	-61,621	913,796
	P6	T280	-119,718	1041,035	P5	P11	-51,156	1297,222
	P6	P101	-89,341	741,977	P4	172Z1	95,623	645,468
	P101	T280	-30,381	926,052	P4	P11	1,530	619,480
	P101	P71	-99,192	1379,399	P4	P2	-10,856	311,324
	P101	P9	-155,994	732,341	P4	P1	-8,932	260,174
	P8	T280	41,774	947,985	P11	P2	-12,390	833,982
	P8	P9	-83,830	654,206	P11	P1	-10,465	674,265
	P8	P71	-27,033	227,695	P11	172Z1	94,094	763,911
	P71	T280	68,803	965,550	P2	172Z1	106,477	502,965
	P71	P9	-56,801	746,981	P2	P1	1,923	170,847
P5	172Z1	42,928	1576,358	P1	172Z1	104,553	402,430	
Tunel Sveti Ilija	P108	P105	52,596	572,234	P110	P113	-90,193	451,902
	P108	P106	18,618	639,229	P110	P111	-36,013	193,791
	P108	P107	38,234	603,114	P110	P112	-67,917	268,221
	P105	P106	-33,980	813,255	P111	P113	-54,185	331,456
	P105	P107	-14,367	1026,471	P111	P112	-31,908	215,025
	P106	P107	19,617	401,194	P112	P113	-22,282	196,263
Tunel Plasina	P9	P7	30,412	610,418	P3	P4	-65,746	751,601
	P9	P8	29,543	513,462	P3	P1	38,332	352,876
	P9	P10	-2,425	121,460	P3	P2	30,854	353,389
	P8	P10	-31,967	502,650	P1	P4	-104,081	970,265
	P8	P7	0,872	130,542	P1	P2	-7,474	128,565
	P7	P10	-32,839	578,404	P2	P4	-96,602	870,679
Tunel Pelješac	18	15	-65,418	519,067	16	15	-60,251	437,520
	18	16	-5,167	716,113	9	10	13,311	738,321
	18	17	20,133	524,768	9	8	-12,049	276,557
	17	15	-85,548	540,962	8	10	25,362	737,436
	17	16	-25,302	327,636				

Tablica 2. *Karakteristični podaci o mikromrežama.*

	Duljina (m)	Visinska razlika (m)	s_{d0} , s_{dH0} , (mm/ $\sqrt{\text{km}}$)	Duljina (m)	Visinska razlika (m)	s_{d0} , s_{dH0} , (mm/ $\sqrt{\text{km}}$)
Tunel Sveti Rok	Portal_jug 6 točaka			Portal_sjever 6 točaka		
Min.	228	27	9,2 4	170	2	3,1 3
Max.	1380	245		1310	105	
Srednji d, dH	832	101		680	47	
Tunel Sveti Ilija	Portal_sjever 4 točke			Portal_jug 4 točke		
Min.	400	14	6,3 2	190	22	10,8 10
Max.	1020	38		450	90	
Srednji D, dH	673	30		275	50	
Tunel Plasina	Portal_istok 4 točke			Portal_zapad 4 točke		
Min.	129	7	4,7 5	121	1	1,4 2
Max.	970	104		610	33	
Srednji D, dH	574	57		410	21	
Tunel Pelješac	Portal_sjever 3 točke			Portal_jug 4 točke		
Min.	280	12	1 1	330	5	1,5 1
Max.	740	25		720	86	
Srednji D, dH	587	17		513	44	
Tunel Mala Kapela	Portal_sjever 4 točke			Podaci za Portal_jug nisu dobiveni od izvođača radova		
Min.	530	24	5,2 9			
Max.	1700	102				
Srednji D, dH	1150	59				

Tablica 3. *Spljoštenost mikromreža.*

Tunel Sveti Rok	jug	8:1	sjever	14:1
Tunel Sveti Ilija	sjever	22,5:1	jug	5,5:1
Tunel Plasina	istok	9:1	zapad	20:1
Tunel Pelješac	sjever	34,5:1	jug	11,5:1
Tunel Mala Kapela	sjever	19,5:1	jug	Nisu dobiveni podaci od izvođača

U užem području tunela Mala Kapela, Plasina i Pelješac vladaju istovjetni klimatski uvjeti, pa je vegetacija ispred ulaznog i izlaznog portala tunela ujednačena bez posebnosti koje bi znatnije utjecale na razlike u preciznosti mjerenja.

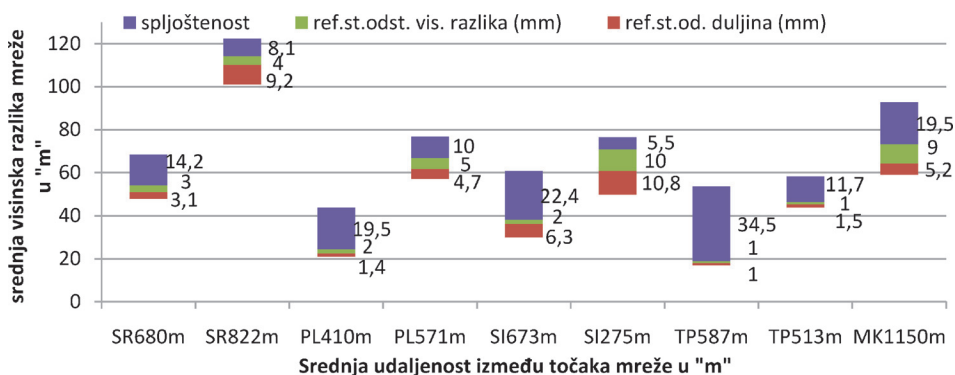
Tuneli Sveti Rok i Sveti Ilija locirani su na mjestima gdje planinski masivi Velebita, odnosno Biokova razgraničavaju dva klimatska područja, pa se sukladno tome i vegetacija na ulaznom i izlaznom portalu prilično razlikuje, što može utjecati na razliku u preciznosti izvedenih mjerenja.

Podaci iz tablica 2 i 3 upućuju na zamjetnu heterogenost u pristupu pri uspostavi portalnih mikromreža koja nije uvijek i isključivo uvjetovana reljefom i lokalnim danostima koje onemogućuju pravilniju geometrijsku konfiguraciju mreže, nego je najčešće odraz traženja najekonomičnijeg rješenja bez njegove prethodne analize, da se utvrdi odgovara li takvo rješenje postavljenom zahtjevu preciznosti.

Analiza utjecaja pojedinih parametara mreže (srednja visinska razlika mreže, prosječna udaljenost, spljoštenost mreže) na točnost mjerenja duljina i određivanja visinskih razlika trigonometrijskim nivelmanom provodi se u svrhu traženja rješenja za optimalnu konfiguraciju mreže u kojoj bi se na temelju analiziranih parametara pokušalo preventivno smanjiti utjecaj onih pogrešaka na koje se može utjecati boljim odabirom lokacija točaka mikromreže.

Referentna standardna odstupanja u analiziranim mikromrežama dobivena na osnovi izjednačenja visinskih razlika mjerenih trigonometrijskim nivelmanom kreću se u intervalu od 1 do 10 mm, a spljoštenosti mikromreža u intervalu od 5,5 do 34,5 (slika 2).

Na slici 2 oznaka MK označava tunel Malu Kapelu, PL tunel Plasinu, SR tunel Sveti Rok, SI označava tunel Sveti Ilija, a oznaka TP tunel Pelješac.



Slika 2. Referentna standardna odstupanja i spljoštenost u pojedinim mikromrežama.

3. Analiza geodetskih mikromreža

U statistici se regresija koristi pri modeliranju relacija između jedne ili više varijabli, a korelacija je međusobna povezanost između različitih pojava, predstavljenih vrijednostima dviju varijabli. Pritom povezanost znači da je vrijednost jedne varijable moguće s određenom vjerojatnošću predvidjeti na osnovi saznanja o vrijed-

nosti druge varijable. Koeficijent korelacije izražava mjeru povezanosti između dviju varijabli u jedinicama neovisnima o konkretnim jedinicama mjere u kojima su iskazane vrijednosti varijabli. Kako je ovdje riječ o različitim mrežama u kojima se prosječne udaljenosti razlikuju od mreže do mreže, trebalo je izračunati koeficijente determinacije R^2 i koeficijente korelacije r . Koeficijent korelacije r pokazuje jakost veze između zavisne varijable i odabranog skupa nezavisnih varijabli, a izražava čvršću vezu što je bliži 1, (URL 1). Koeficijent korelacije računa se kao drugi korijen iz koeficijenta determinacije. Ovdje treba naglasiti da veličina statističkog skupa ima veliki utjecaj na vrijednost koeficijenta korelacije. Što je statistički skup manji tim više pojedina vrijednost razmatranih varijabli utječe na jakost korelacije.

Razmotre li se vrijednosti referentnih standardnih odstupanja visinskih razlika i duljina u svakoj pojedinoj mikromreži (tablica 2 i slika 1), uočava se da su ona veća s one strane tunela gdje su točke mikromreže visinski razvedenije. Osim toga, uočava se da su referentna standardna odstupanja uvijek veća s južne strane mikromreže (sve točke osunčane tijekom većeg dijela dana) gdje je utjecaj Sunca odnosno kuta upada Sunčevih zraka za vrijeme mjerenja na opažača i mjernu stanicu veći, odnosno gdje je zbog različitosti temperature pojedinih zračnih slojeva ostalo neriješeno pitanje atmosferske korekcije na preciznost mjerenja duljina.

Točnost određivanja visinskih razlika, tj. ocjena točnosti trigonometrijskog nivelmana i njegova primjena u određivanju visina pri uspostavi mreža za posebne namjene i pri obnovi referentnog visinskog sustava može se analizirati iz sljedeće definitivne jednadžbe (Stijačić 1960):

$$\Delta H = s \tan \delta + \frac{s^2}{2r} - \frac{ks^2}{2r} + i - l. \quad (4)$$

Diferencirajući jednadžbu (4) po promjenljivim veličinama s , δ , k , i i l prelazeći na standardna odstupanja dobije se:

$$s_{\Delta H}^2 = \tan^2 \delta s_s^2 + \frac{s^2}{\cos^2 \delta} s_\delta^2 + \left(\frac{s^2}{2r}\right)^2 s_k^2 + s_i^2 + s_l^2, \quad (5)$$

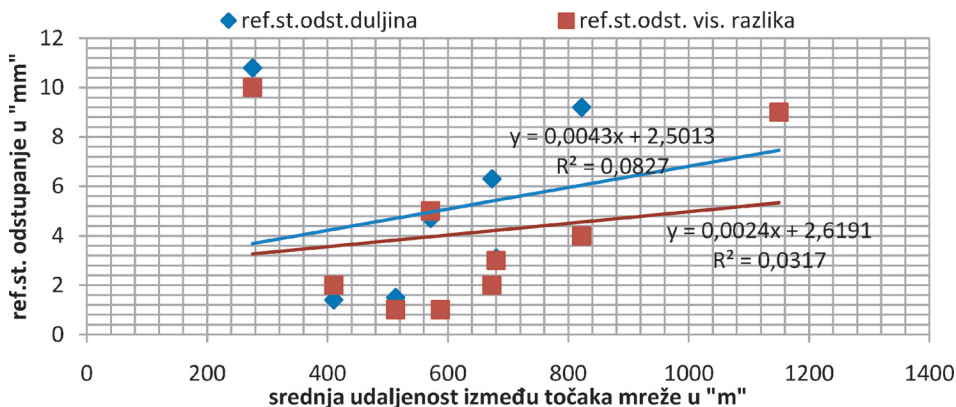
pri čemu su: $s_{\Delta H}$ – standardno odstupanje visinske razlike, s_δ – standardno odstupanje mjenog vertikalnog kuta, s_s – standardno odstupanje mjerene duljine, s_k – standardno odstupanje koeficijenta refrakcije, s_i – standardno odstupanje mjerene visine instrumenta, s_l – standardno odstupanje mjerene visine signala.

Iz te jednadžbe vidi se da će visinska razlika biti točnije određena što je vertikalni kut δ manji. Geodetska osnova često se uspostavlja u vrlo složenim uvjetima pa se zanemarivanje utjecaja vertikalnoga kuta na točnost određivanja visinskih razlika trigonometrijskim nivelmanom može negativno odraziti na rezultate izjednačenja. Svi dostupni softveri na tržištu težinske koeficijente izvode iz međusobne udaljenosti točaka zanemarujući vertikalni kut, odnosno visinsku razliku između njih, pa se težina visinskih razlika određuje iz izraza:

$$p = \frac{1}{s^2}. \quad (6)$$

S obzirom na deklariranu mjernu nesigurnost mjernih stanica kojima su opažane mikromreže od 1" (pravci) i 1 mm + 2 ppm (duljine), postignuto je veliko referentno standardno odstupanje duljina (tablica 2). Iz deklarirane mjerne nesigurnosti proizlazi da bi trebala postojati korelacija između ostvarene preciznosti mjerenih duljina i srednje udaljenosti između točaka mreže.

Na temelju prikaza referentnih standardnih odstupanja visinskih razlika i duljina u ovisnosti o prosječnoj udaljenosti između točaka mikromreže (slika 3) može se konstatirati da signifikantna korelacija nije potvrđena.



Slika 3. Ovisnost preciznosti o prosječnim udaljenostima u mreži – sve mreže.

Referentno standardno odstupanje mjerenih duljina u tunelskoj poligonometriji, gdje su točke na približno istoj visini uz stabilne atmosferske uvjete u cijevi tunela, znatno je bolje od standardnih odstupanja postignutih u vanjskoj mreži i primjerena su deklariranoj mornoj nesigurnosti instrumenta, što se i očekivalo.

Standardno odstupanje mjerenih duljina u podzemnoj poligonometriji tunela Sveti Rok iznosilo je (Grgić 2011):

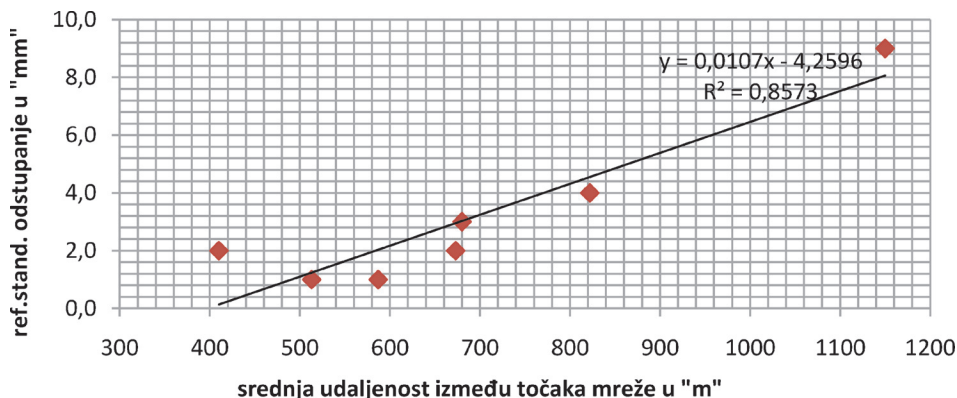
$$\text{sjever - slijepi vlak } s_0 = 0,59 \text{ mm}/\sqrt{\text{km}},$$

$$\text{jug - slijepi vlak } s_0 = 0,77 \text{ mm}/\sqrt{\text{km}}.$$

Ti rezultati daju naslutiti da su konfiguracija reljefa i atmosferski uvjeti koji vladaju između točaka vanjske mikromreže dodatni parametri kojih nedovoljno precizno modeliranje može imati negativan učinak na rezultat izjednačenja mikromreže.

3.1. Analiza ostvarene preciznosti visinskih razlika

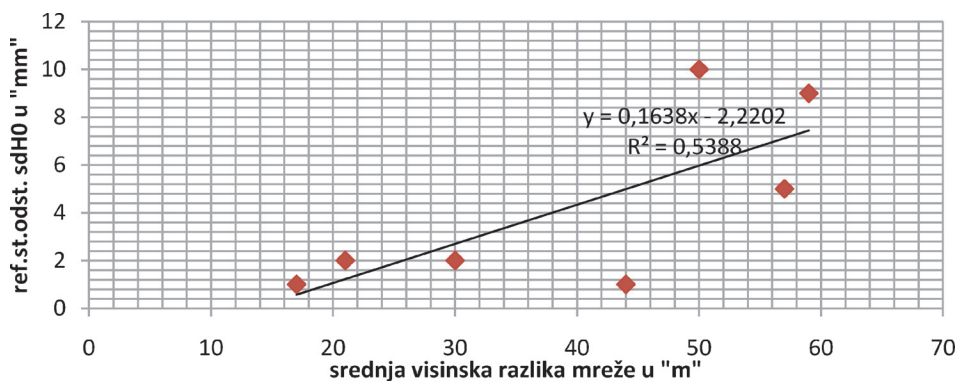
Rezultat prikazan na slici 3 ne ukazuje na korelaciju preciznosti visinske razlike i udaljenosti, iz čega slijedi da evidentno postoji razlog zbog kojeg je ona izostala. Izbace li se iz razmatranja mikromreže s najvećom srednjom visinskom razlikom te na taj način u analizi ostanu samo spljoštenije mreže, korelacija je jaka, a koeficijent korelacije iznosi $r = 0,93$ (slika 4).



Slika 4. Ovisnost preciznosti o prosječnim udaljenostima u mreži – spljoštene mreže.

Iz toga slijedi da se točnost visinskih razlika određenih trigonometrijskim nivelmanom zaista povećava sa smanjivanjem udaljenosti u slučaju kada su točke mreže na približno jednakoj visini.

Budući da neujednačenost srednje visinske razlike mreže očito utječe na preciznost određivanja visina, potrebno je istražiti u kojoj mjeri postoji korelacija između srednje visinske razlike analiziranih mreža i referentnog standardnog odstupanja. Preciznost određivanja visinskih razlika trigonometrijskim nivelmanom pokazuje jaku korelaciju sa srednjom visinskom razlikom pojedine mikromreže koja iznosi $r = 0,73$ (slika 5). Iz razmatranja su izuzete mikromreže tunela Sveti Rok budući da te mikromreže čine po 6 stabiliziranih točaka na ulaznom i izlaznom portalu pa je samim time u tim mrežama veći broj prekobrojnih mjerenja.

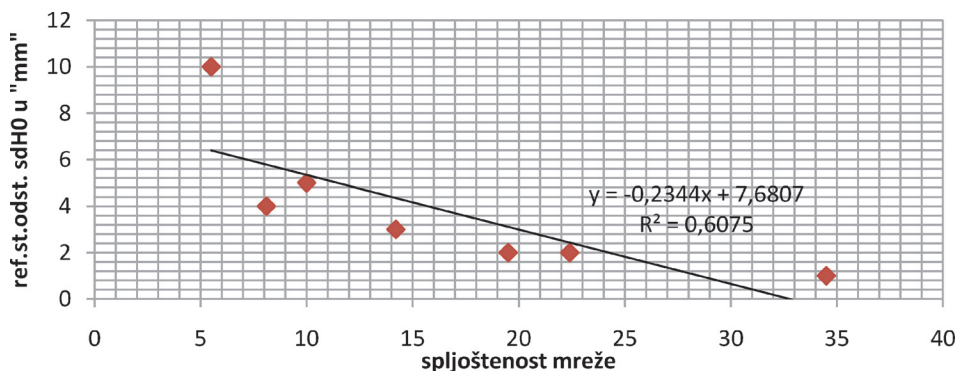


Slika 5. Ovisnost preciznosti o prosječnoj visinskoj razlici mreže.

Ostvareno referentno standardno odstupanje proporcionalno je srednjoj visinskoj razlici mreže. Iako je ovdje riječ o vrlo heterogenom skupu podataka koji je nastao u različitim terenskim i atmosferskim uvjetima, mjeren instrumentarijem razli-

čitih proizvođača, također mjeren od različitih opažača, primjećuje se stanovita korelacija. Iz slike 5 se može zaključiti da u svrhu poboljšavanja preciznosti određivanja visinskih razlika trigonometrijskim nivelmanom treba težiti tome da se što više smanji visinska razvedenost mreže, odnosno ako to nije moguće treba u mrežu uključiti više točaka radi dobivanja prekobrojnih mjerenja koje povećavaju preciznost određivanja visina.

Preciznost određivanja visinskih razlika trigonometrijskim nivelmanom ovisi, dakle, o prosječnoj duljini i o prosječnoj visinskoj razlici mreže. Ako se uzajamni odnos tih veličina označi kao spljoštenost mreže, može se dalje istražiti korelacija spljoštenosti i referentnog standardnog odstupanja (slika 6).



Slika 6. Ovisnost preciznosti o spljoštenosti mreže.

U analizi na slici 6 izbačena je mikromreža tunela Mala Kapela, koja po trendu najviše odstupa. Korelacija preciznosti određivanja visinskih razlika i spljoštenosti mreže je jaka, a koeficijent korelacije iznosi $r = 0,78$.

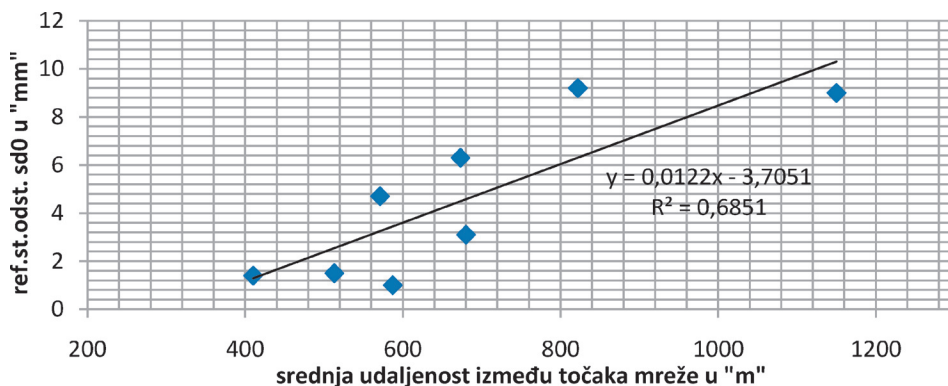
3.2. Analiza ostvarene preciznosti duljina

Na temelju mjerne nesigurnosti mjernih stanica očekuje se da postoji korelacija između preciznosti mjerenih duljina i srednje udaljenosti između točaka mreže. Takva korelacija međutim nije potvrđena (slika 3), pa u ovom slučaju treba istražiti što je uzrok toga.

S obzirom na to da postoji neujednačenost srednje visinske razlike u tunelskoj cijevi, gdje su stabilni atmosferski uvjeti, i srednje visinske razlike u mikromrežama koje se razvijaju uz ulazni i izlazni portal, potrebno je istražiti u kojoj mjeri postoji korelacija između srednje visinske razlike analiziranih mreža, srednje udaljenosti između točaka i referentnog standardnog odstupanja duljina.

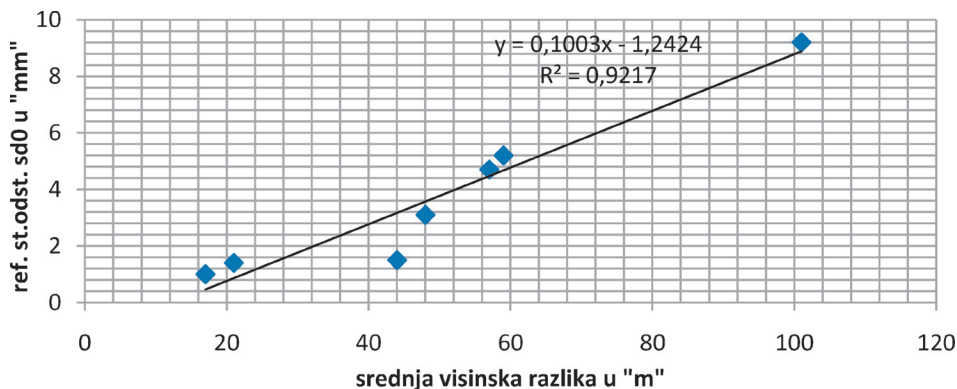
Izbaci li se iz analize mikromreža s najvećom srednjom visinskom razlikom (slika 7), korelacija između referentnog standardnog odstupanja i srednje udaljenosti je jaka, a koeficijent korelacije iznosi $r = 0,83$. Iz toga proizlazi da srednje visinske razlike, odnosno nepoznati atmosferski uvjeti duž putanje zraka koji su u

brdsko-planinskim uvjetima veći jer zraka ne putuje na istoj visini iznad tla od stajališne do ciljne točke, imaju vrlo negativan učinak na preciznost mjerenja duljina.



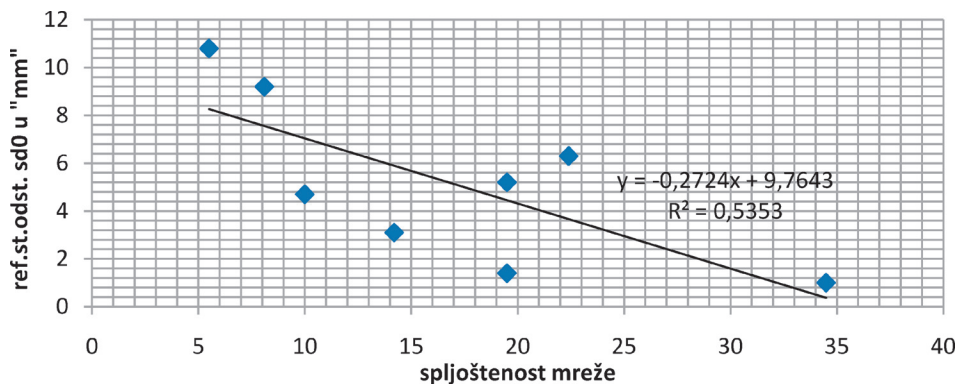
Slika 7. Ovisnost preciznosti mjerenih duljina o srednjoj udaljenosti između točaka.

Preciznost mjerenja duljina pokazuje jaku korelaciju sa srednjom visinskom razlikom pojedine mikromreže, a koeficijent korelacije iznosi $r = 0,96$ (slika 8). Iz razmatranja su izuzete mikromreže tunela Sveti Ilija jer su te mikromreže mjerene mjernom stanicom drugog proizvođača.



Slika 8. Ovisnost preciznosti mjerenih duljina o srednjoj visinskoj razlici mreže.

Ako se utjecaji srednje udaljenosti između točaka mreže i srednje visinske razlike mreže promatraju u njihovu uzajamnom odnosu, kroz spljoštenost mreže, može se istražiti korelacija spljoštenosti s referentnim standardnim odstupanjem (slika 9). Korelacija je jaka, a koeficijent korelacije iznosi $r = 0,73$.



Slika 9. Ovisnost preciznosti mjerenih duljina o spljoštenosti mreže.

4. Zaključak

Uspjeh svakog pojedinog projekta ocjenjuje se parametrima koji nedvojbeno pokazuju jesu li ostvarene osnovne postavke projekta i je li projekt izveden u granicama predviđene tolerancije. Iskustvo i stručna kompetentnost, tehnološki razvoj s novim mjernim metodama, omogućuju prilagođavanje različitih inženjerskih zadataka zahtjevima pojedinog projekta, a samim tim jamče ekonomičnost, efektivnost i sigurnost u korist korisnika geodetskih usluga. U svrhu što bolje iskoristivosti pojedine metode i interpretacije rezultata potrebno je istražiti sve izvore pogreška mjerenja.

Analiza uspostavljenih geodetskih mikromreža na ulaznim i izlaznim portalima nekoliko velikih tunela koji su posljednjih godina građeni u Republici Hrvatskoj pokazuje da su terestrička mjerenja kojih su rezultat mjerene duljine i visinske razlike određene trigonometrijskim nivelmanom, korelirane ne samo sa srednjom udaljenosti između točaka mikromreže nego i sa srednjom visinskom razlikom mreže, odnosno sa spljoštenosti mreže. Naime, što su dužine u mreži veće, što je mreža visinski razvedenija, odnosno što je manja spljoštenost mreže to je ostvareno referentno standardno odstupanje duljina i visinskih razlika nepovoljnije.

Težinski modeli, za duljine i visinske razlike mjerene trigonometrijskim nivelmanom, u izjednačenju geodetskih mikromreža bazirani su na udaljenosti. Na temelju novih spoznaja bit će potrebno djelomično redefinirati postojeće težinske modele uvodeći u njih i dodatne parametre (npr. srednja visinska razlika mreže i spljoštenost) koji utječu na preciznost mjerenja čime će se osigurati da rezultat izjednačenja geodetskih mikromreža bolje opiše realnost.

Literatura

- Brunner, F. K. (2007): On the methodology of Engineering Geodesy, *Journal of Applied Geodesy*, 1, 57–62.
- Feil, L. (1989): Teorija pogrešaka i račun izjednačenja – prvi dio, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Grgić, I. (2011): Teorijska i empirijska analiza specifičnih položajnih i visinskih mreža u graditeljstvu, doktorska disertacija, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Grgić, I., Barišić, B., Šabić Grgić, N. (2007): Primjena inženjerske geodezije u graditeljstvu, Simpozij o inženjerskoj geodeziji SIG 2007, Zbornik radova, Hrvatsko geodetsko društvo, Zagreb.
- Kapović, Z. (2010): Geodezija u niskogradnji, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Kuang, S. (1996): Geodetic network analysis and optimal design: concepts and applications, Ann Arbor press, Chelsea-Michigan.
- NN (163/03): Zakon o mjeriteljstvu, Narodne novine, Službeno glasilo Republike Hrvatske, Zagreb.
- Rožić, N. (1993): Prilog izjednačenju geodetskih mreža posebnih namjena, magistarski rad, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Rožić, N. (2001): Optimiranje geodetskih mreža, skripta, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Stijačić, S. (1960): Mogućnost primene trigonometrijskog nivelmana kod trećeg popunjajućeg reda triangulacije, *Geodetski list*, 7–9, 201–207.
- URL 1: Regresija i korelacija, Primijenjena statistika, 379–546, http://web.efzg.hr/dok//sta/vbahovec/statistika%20za%20poduzetnike/8_REGRESIJA%20I%20KORELACIJA.pdf, (1.3.2011.).

The Effects of Relief Configuration on the Accuracy of Geodetic Measurement

ABSTRACT. For the purpose of geodetic network establishing different geodetic methods are applied. The used method is in correlation with the accuracy requirements of the project. This paper analyzes the impact of the relief configuration on the measurement accuracy of the length and on the accuracy of the height differences measured by trigonometric levelling. The measurement uncertainty of the measuring devices that have been used to perform measurement refers to the ideal conditions. As the geodetic network are not established in ideal conditions it is very important to investigate what kind of measurements accuracy can be realized in real measurement conditions.

Keywords: geodetic network, accuracy, length, height differences, measurement uncertainty.

Primljeno: 2012-07-20

Prihvaćeno: 2012-09-11