

UDK 528.21:528.484:624.191.3
Izvorni znanstveni članak

Primjena modela geoida HRG2009 u tunelogradnji

Ilija GRGIĆ, Tomislav BAŠIĆ – Zagreb¹,
Marko ŠLJIVARIĆ – Šibenik²

SAŽETAK. U tunelogradnji je potrebno osigurati točnost proboja ne samo u horizontalnom nego i u visinskom smislu. Dopuštenim odstupanjima u točki proboja definirani su parametri za izračun koordinata točaka geodetske osnove. U svrhu prijenosa visina u tunel, zbog izgradnje podzemnih građevina, potrebno je na površini u blizini tunela razviti visinsku geodetsku osnovu. Kreiranjem novog modela geoida HRG2009 stvorene su pretpostavke da se razmotri moguća primjena modela geoida HRG2009 za izračun visina točaka mikromreže, odnosno da posluže kao nezavisna kontrola definiranja visina.

Ključne riječi: točnost proboja, model geoida HRG2009, tunelogradnja.

1. Uvod

Danas sve više država u svijetu ima uspostavljen satelitski pozicijski sustav. Cilj je tih sustava prekriti državni teritorij stalnim referentnim stanicama i omogućiti korisnicima u praksi brzo i pouzdano određivanje koordinata i visina točaka. Postupak prijenosa visina na osnovi GNSS (Global Navigation Satellite System) mjerenja podrazumijeva vrlo precizno definiranu plohu geoida. GNSS je postupak pozicioniranja kojim se istovremeno dobivaju sve tri koordinate točaka u odnosu na jedinstveni koordinatni sustav. Pri određivanju visina nailazi se na temeljne probleme koji su u direktnoj korelaciji s preciznošću mjernog postupka i visinskim referentnim sustavom. Iz GNSS mjerenja dobiju se koordinate u WGS84 geocentričnome trodimenzionalnom Kartezijevu koordinatnom sustavu koji rotira sa Zemljom. Za praktičnu primjenu te trodimenzionalne koordinate X, Y i Z treba prilagoditi dnevnim geodetskim zadaćama. Kartezijeve koordinate X, Y i Z konvertiraju se u geodetske koordinate sa širinom φ i duljinom λ te elipsoidnom visinom h . Elipsoidna visina koja je neovisna o gravitacijskom polju mora se transformira-

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: tomlislav.basic@geof.hr,

² dr. sc. Marko Šljivarić, Geodezija d.o.o. Šibenik, Ulica kralja Zvonimira 42, HR-22000 Šibenik, Croatia, e-mail: marko.sljivaric@gmail.com.

ti u visine koje su u primjeni, kod nas su to normalne ortometrijske visine. Ako se normalne ortometrijske visine određuju pomoću GNSS mjerenja i modela geoida, treba uzeti u obzir, osim pogreške određivanja koordinatnih vrijednosti, također i pogreške geoidnih undulacija (Drewes 2005).

Kombinirano korištenje GNSS mjerenja visine i modela geoida, danas poznato kao GNSS-niveliranje, postalo je u smislu ekonomičnosti vrlo prihvatljiva metoda za određivanje fizikalnih visina (Meyer i dr. 2006, Featherstone 2008). Zahvaljujući boljem razumijevanju pogrešaka koje su ovisne o stajalištu, kao što su varijacije faznog centra antene i multipath (fazna višeznačnost) (Solaric i dr. 2009, Zrinjski 2010, Zrinjski i dr. 2011), značajno je poboljšana kvaliteta GNSS mjerenja i modeliranja podataka (Schmitz i Wübbena 2007). U područjima gdje su dostupni točni modeli geoida, GNSS-nivelman može sasvim sigurno zamijeniti geometrijski nivelman na velikim udaljenostima. U praksi se fizikalne visine, koje su bazirane na GNSS mjerenjima i dostupnim modelima geoida, često određuju s razinom točnosti od 1 cm i boljom (Feldmann-Westendorff i Jahn 2006). Daljnje poboljšanje prema milimetarskoj razini točnosti ne samo da zahtijeva znatne napore u modeliranje geoida i određivanju visina GNSS metodom, nego isto tako podrazumijeva korištenje prikladne provjere valjanosti visinskih podataka (Hirt i dr. 2011).

U svrhu ispitivanja mogućnosti zamjene geometrijskog nivelmana s GNSS mjerenjima provedene su 1999. godine dvije kampanje u Švicarskoj. Prva je provedena u području s visinskom razlikom do 500 m, a druga u regiji s visinskom razlikom do 1700 m (Marti i Schlatter 2002). Rezultati kampanje pokazali su da je alternativa geometrijskom nivelmanu moguća u ravnim i brdovitim predjelima ako zahtjevi relativne točnosti nisu jako veliki (oko 1 cm iznad 30 km). Standardni model troposfere nije prikladan. Čak i korištenjem sofisticiranoga troposferskog modela još uvijek je vrlo teško dobiti dobru točnost u planinskim područjima. Za dobivanje dovoljno dobrih rezultata potrebno je nekoliko sati mjerenja GNSS metodom (Marti i Schlatter 2002). Osim toga, istraživanje u Moldaviji pokazalo je da je za postizanje subcentimetarske točnosti normalnih visina s GNSS/nivelmanskim podacima potrebno imati visoke rezolucije gravimetrijskih podataka (Danila 2006). Za kreiranje modela undulacije geoida s razinom točnosti od 1 cm, koje će pokrivati područje cijele države, neophodni su višestruki izvori podataka (Even-Tzur i Steinberg 2009).

Na kraćim udaljenostima danas se bez problema ostvaruju subcentimetarske preciznosti u određivanju položaja i elipsoidnih visina. Da bi to bilo moguće, veza između elipsoidnih visina i standardno korištenih visina opisuje se dobro prilagođenim lokalnim modelom geoida koji mora biti definiran. U svrhu transformiranja elipsoidnih visina u (normalne) ortometrijske u Republici Hrvatskoj kreiran je model geoida HRG2009 (Bašić 2009).

Raspolaže li se s adekvatnim modelom geoida prijenos visina pomoću GNSS metode može se koristiti kao alternativna metoda geometrijskom nivelmanu u mnogim inženjerskim zadaćama. Kvalitetu (normalne) ortometrijske visine dobivene pomoću GNSS metode definira ponajprije kvaliteta geoida i kvaliteta elipsoidne visine određene GNSS mjerenjima.

Modeli geoida u posljednje su vrijeme znatno poboljšani i evidentno je da će u bliskoj budućnosti doći do daljnjeg poboljšanja njihove unutarnje i vanjske točnosti. To će s vremenom omogućiti da određivanje visina GNSS metodom dobije sve veći značaj. Uspije li se udovoljiti postavljenom zahtjevu točnosti, određivanje visina GNSS metodom bit će brže i ekonomičnije.

2. Geodetska osnova i točnost proboja

Sve napadne točke tunela trebaju biti međusobno povezane nivelmanskom mrežom. Nije preporučljivo da se kote ulaznih točaka određuju odvojenim priključkom na repere državne visinske mreže. Točke visinske geodetske osnove (reperi) moraju biti brižljivo stabilizirane i osigurane. Tako posebno razvijenu mrežu treba priključiti na više repera državne nivelmanske mreže, i to po mogućnosti na repere što je moguće višeg reda. Na tim reperima potrebno je provesti kontrolu njihove stabilnosti. Projekt nivelmanske mreže trebao bi sadržavati pregledni plan s podacima o postojećim reperima na području koje bi moglo doći u obzir za uspostavljanje mreže, način stabilizacije repera, proračun točnosti nivelmanske mreže, metode rada i način obrade rezultata mjerenja (Janković 1966).

Mreža visinskih točaka dijeli se na repere nadzemne i repere podzemne nivelmanske mreže, a njihova se veza ostvaruje kroz ulazni, odnosno izlazni portal. Točnost mjerenja za tako razvijenu mrežu računa se na temelju potrebne visinske točnosti tijekom gradnje tunela, kao i u trenutku proboja. Mreža visinskih točaka je osnova za sva visinska mjerenja i iskolčenja tijekom gradnje tunela, kao i za kontrolna mjerenja.

Pri odabiru najpovoljnijeg položaja repera nadzemne nivelmanske mreže treba voditi računa o sljedećim razlozima koji mogu izazvati visinske pomake (Hennecke i dr. 1988):

- stabilnosti objekata u koje se reper ugrađuje
- mogućim mehaničkim pomacima
- disanju Zemljine kore.

Projektiranje nivelmanskih vlakova za iskolčenje tunela i stabilizacija repera, obavlja se sukladno instrukcijama za državnu nivelmansku mrežu (Grgić 2003):

- za tunele preko 10 km sukladno tehničkim normativima za precizni nivelman
- za tunele od 5 do 10 km sukladno tehničkim normativima za tehnički nivelman povećane točnosti
- za tunele ispod 5 km sukladno tehničkim normativima za tehnički nivelman.

Mjerenja u mrežama treba obavljati sukladno normativima za odgovarajuće redove nivelmana, s time da se za potrebe tunelskog nivelmana tehnički normativi usklađuju s potrebama građevine:

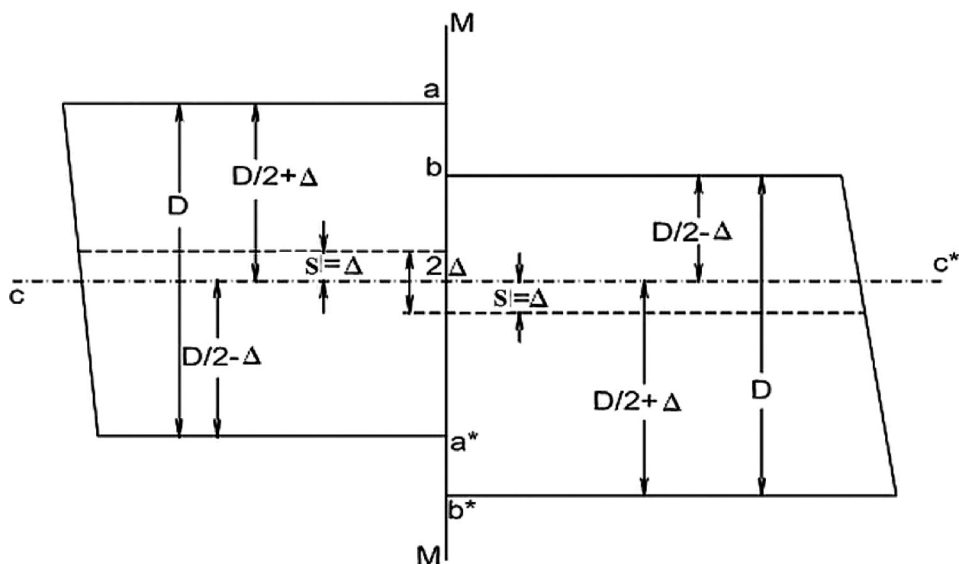
- niveliranje treba izvoditi u oba smjera između portala, bez obzira na red mreže
- na izgrađenim prostorima reperi se postavljaju svakih 200–300 m
- u području portala, okana, bočnih potkopa postavljaju se najmanje tri repera.

Periodičnost opažanja repera podzemne nivelmanske mreže na stabilnim zemljištima poklapa se s opažanjima podzemne poligonometrije.

U točki proboja može nastati odstupanje od projektirane osi tunela u uzdužnom, poprečnom i visinskom smislu (Janković 1966). Za tunele u pravcu uzdužno odstupanje nije posebno važno, važnije je poprečno i visinsko odstupanje, dok je za tunele u luku uzdužno odstupanje jednako važno kao i poprečno.

U okviru definiranja dopuštenog odstupanja Δ , polazi se od toga da se osi tunela mimoilaze za veličinu 2. Srednji položaj osi cc^* (slika 1) odstupa od radnih osi za polovicu ukupnog mimoilaženja Δ . Ako je projektom predviđeno dopušteno odstu-

panje od osi tunela veličine Δ , onda se za vrijednost maksimalnog mimoilaženja usvaja 2Δ . U geodeziji se granično dopušteno odstupanje formira iz standardnog odstupanja s , na koje u najvećoj mjeri utječu korišteni instrumentarij i pribor, izabrana metoda mjerenja, broj prekobrojnih mjerenja, uvjeti mjerenja, itd. Maksimalno dopušteno standardno odstupanje u točki proboja proizlazi iz ukupne tolerancije u točki proboja 2Δ . Pri iskolčenju tunelskih osi uzima se da je maksimalno standardno odstupanje u točki proboja s polovica ukupne tolerancije proboja tunela 2Δ (Cvetković 1970).



Slika 1. Horizontalna projekcija mjesta proboja u tunelu (Cvetković 1970).

U Republici Hrvatskoj dopuštena odstupanja točnosti proboja tunela propisana su Pravilnikom o tehničkim normativima i uvjetima za projektiranje i gradnju tunela na cestama, čl. 53 Zakona o normizaciji (NN 1996). Dopuštena odstupanja po položaju i visini za eventualno mimoilaženje tunelskih osi vođenih iz dva smjera iznose:

$$\text{po osi } \pm 60\sqrt{L} \text{ [mm]}, \quad \text{po niveleti } \pm 23\sqrt{L} \text{ [mm]},$$

gdje je L duljina tunela izražena u kilometrima.

2.1. Kriterij za procjenu uspješnosti proboja tunela

Preciznost kojom se određuju nadzemna i podzemna geodetska osnova rezultira iz građevinsko-tehničkih zahtjeva točnosti proboja tunela. Točnost proboja ovisi o duljini tunela i definira se u pravilu vrijednošću σ po km, pa se tako može uspostaviti relacija za točnost proboja (Krüger 1985):

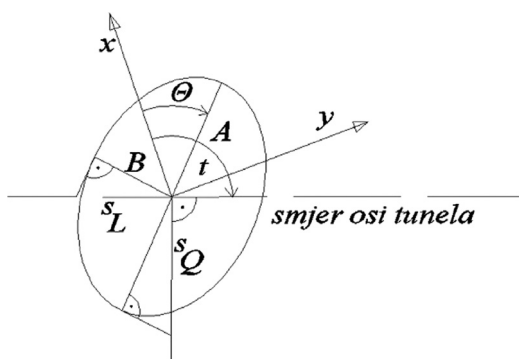
$$s_D = \sigma \cdot T_{[km]}, \quad (1)$$

pri čemu su:

T – duljina tunela

s_D – standardno odstupanje proboja tunela.

Točnost proboja potrebno je provjeriti procjembenim kriterijem koji je invarijantan prema utvrđenom datumu. Takav kriterij predstavlja pogreška u točnosti proboja koja se određuje neovisno iz oba smjera iskopa tunela, a prikazuje se *relativnom elipsom pogrešaka* (Krüger 1985, Grgić 2003, Džapo i Zrinjski 2004, Zrinjski i Džapo 2010) koja u sebi sadrži informaciju o poprečnoj s_Q i uzdužnoj s_L točnosti proboja.



Slika 2. Relativna elipsa pogrešaka (Krüger 1985).

Relativna elipsa pogrešaka je nožišna krivulja geometrijskog mjesta (slika 2), a određuje ju dvodimenzionalni interval pouzdanosti parova koordinatnih razlika Δy i Δx koji procjenjuje položaj dvije točke pri izjednačenju mreže u određenom sustavu u različitim smjerovima (Krüger 1985). Ona se računa iz kofaktora koordinatnih razlika, a opisuju je velika poluos A , mala poluos B i smjer velike poluosi Θ :

$$\omega_{1,2} = \frac{1}{2} \left(q_{\Delta x \Delta x} + q_{\Delta y \Delta y} \pm \sqrt{(q_{\Delta x \Delta x} - q_{\Delta y \Delta y})^2 + 4q_{\Delta x \Delta y}^2} \right), \quad (2)$$

$$\tan 2\Theta = \frac{2q_{\Delta x \Delta y}}{q_{\Delta x \Delta x} - q_{\Delta y \Delta y}}, \quad (3)$$

$$A = s_0 \sqrt{\omega_1} \quad \text{i} \quad B = s_0 \sqrt{\omega_2}, \quad (4)$$

gdje su:

$\omega_{1,2}$ – svojstvene vrijednosti matrice kofaktora koordinatnih razlika $Q_{\Delta \hat{x} \Delta \hat{x}}$

$q_{\Delta x \Delta x}$, $q_{\Delta y \Delta y}$, $q_{\Delta x \Delta y}$ – elementi matrice kofaktora koordinatnih razlika

s_0 – referentno standardno odstupanje a posteriori.

Relativna elipsa pogrešaka neovisna je o udaljenosti dviju točaka tako da ona postoji i za dvije točke čija je međusobna udaljenost nula, ako su one određene neovisno jedna o drugoj. Primijeni li se to na mjesto proboja, slijedi za pogrešku proboja:

$$s_Q^2 = A^2 \sin^2(t - \Theta) + B^2 \cos^2(t - \Theta), \quad (5)$$

$$s_L^2 = A^2 \cos^2(t - \Theta) + B^2 \sin^2(t - \Theta), \quad (6)$$

pri čemu je: t – smjerni kut osi tunela.

Relativna elipsa pogrešaka točke proboja invarijantna je prema datumu mreže, što ne vrijedi za relativnu elipsu pogrešaka krajnjih točaka konačne dužine, npr. između portalnih točaka. Ona je između tih točaka ovisna o smjeru i nije invarijantna (Krüger 1985).

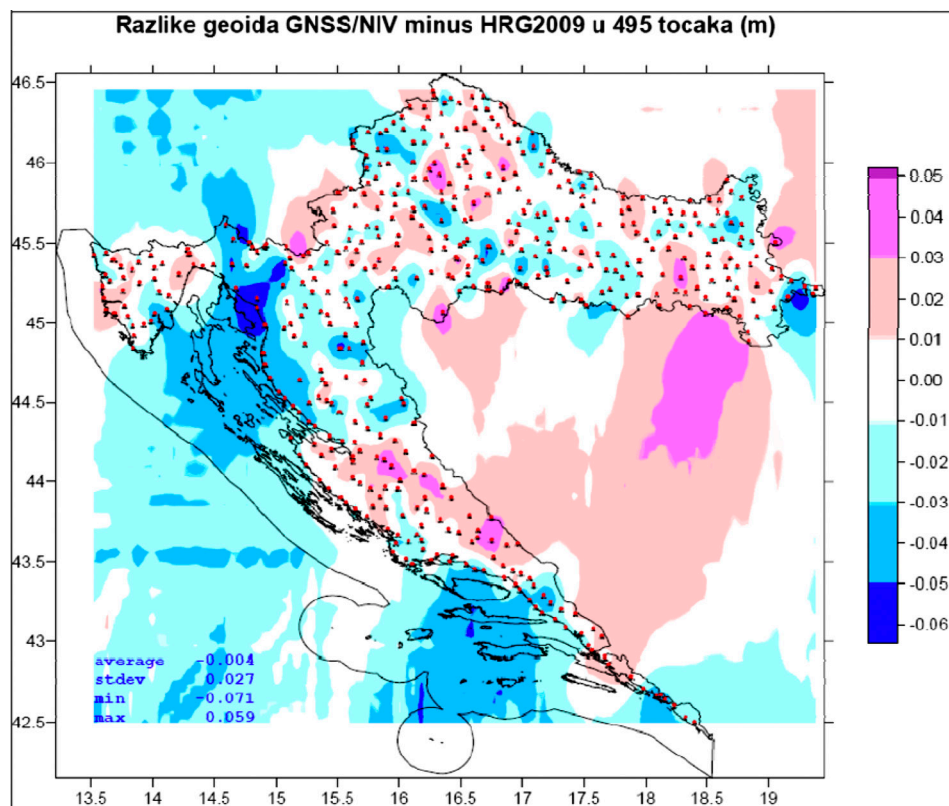
3. Model geoida HRG2009

Zbog uočene slabosti apsolutne orijentacije modela geoida HRG2000 pokrenuti su 2009. godine sveobuhvatni radovi na području cijele države kojima je bio cilj odrediti sukladno rasteru od oko 10 km GNSS/nivelmanske točke u kojima su određene elipsoidne i normalne ortometrijske visine, koje zajedno s podacima ubrzanja sile teže trebaju služiti za modeliranje plohe novoga poboljšanog modela geoida.

Više od 500 točaka, u kojima su iz razlike visina poznate undulacija geoida, primarno su poslužile kreiranju novog modela geoida u kojem je zahvaljujući gustom rasteru točaka u velikoj mjeri otklonjena slabost apsolutne orijentacije. Osim toga, model geoida HRG2009 u potpunosti je usklađen s novim visinskim datumom jer su sve točke računane u novom visinskom sustavu HVR571. U svrhu položajnog i visinskog definiranja točaka korišteni su servisi CROPOS-a. Izmjera više od 500 GNSS/niveliranih točaka na kopnenom dijelu Republike Hrvatske, od kojih je na kraju upotrijebljeno 495 (nakon provjere kvalitete), omogućila je ne samo ispitivanje valjanosti raspoloživih GGM modela na našem području nego konačno i nezavisnu provjeru kvalitete modela geoida HRG2000. Bitan napredak napravljen je u računanju globalnih geopotencijalnih modela, jer je pouzdanost od modela EGM96 (čine ga koeficijenti razvoja do maksimalnog stupnja i reda 360, što odgovara valnim duljinama od 55 km), korištenog pri računanju modela geoida HRG2000, značajno porasla kod sada raspoloživog modela EGM2008 (čine ga koeficijenti razvoja do maksimalnog stupnja i reda 2190, što odgovara valnim duljinama od 9 km). Iskazano vrijednostima standardnog odstupanja, ono se smanjilo s 0,250 m na svega 0,048 m, jednako kao i ukupno područje varijacije s 1,932 m na svega 0,361 m (Bašić 2009). Nezavisna ocjena kvalitete modela geoida HRG2000 pokazuje da je ona zapravo bolja od očekivane, jer je standardno odstupanje 0,093 m i proteže se preko najvećeg dijela teritorija, s izuzetkom nekoliko problematičnih, uglavnom rubnih područja, koja su očigledno posljedica lošijih GNSS/niv. i prerijetkih Dg podataka, koji su bili raspoloživi 2000. godine (Bašić 2009). Područje računanja izabrano je tako da potpuno pokriva državni teritorij i jednako je onom koje je korišteno 2000. godine, a to znači između 42,0° i 46,6° geografske širine, odnosno 13,0° i 19,5° geografske dužine. Pravilni raspored točaka u kojima je obavljeno predicanje reziduala modela geoida

odabran je u rasteru $30'' \times 45''$ (oko $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$), što predstavlja četiri puta bolju detaljnost računanja nego je to bio slučaj kod modela geoida HRG2000. To znači da je broj točaka računanja sa 72 297 narastao na 288 113 (Bašić 2009).

Procjena kvalitete modela geoida HRG2009 pokazala je dobro slaganje konačnog rješenja HRG2009 s undulacijama u 495 GNSS/nivelnanskih točaka te u 59 GNSS/nivelnanskih točaka koje su poslužile za nezavisnu ocjenu. To je slaganje izvanredno visoko, jer je standardno odstupanje samo 0,027 m (uz srednju razliku gotovo nula) i upućuje prije svega na dobro odabranu metodologiju i realizaciju računanja, ali i na visoku pouzdanost novog rješenja geoida od 2–3 cm u apsolutnom smislu preko najvećeg dijela hrvatskoga kopna (Bašić 2009), (slika 3).



Slika 3. Usporedba modela geoida HRG2009 sa 495 GNSS/niv. točaka (Bašić 2009).

Vanjska ocjena kvalitete plohe modela geoida HRG2009 provedena je usporedbom s 59 GNSS/nivelnanskih točaka u kojima su poznate vrijednosti undulacija, a ravnomjerno su raspoređene na teritoriju Republike Hrvatske i nisu bile uključene u računanje modela geoida HRG2009. Standardno odstupanje od 0,035 m i srednja vrijednost od $-0,012 \text{ m}$ potvrđuju zavidnu ostvarenu vanjsku točnost (Bašić 2009). Visoka pouzdanost novog rješenja geoida pretpostavka je za njegovu primjenu i u inženjerskim zadaćama s povećanim zahtjevom preciznosti.

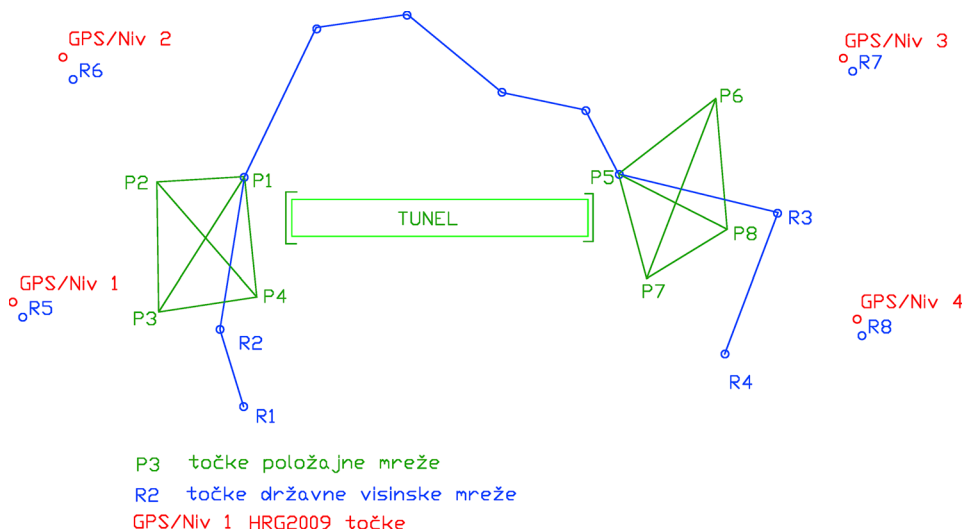
4. Usporedba različitih pristupa određivanja visina geodetske osnove

Projektom zadaćom, odnosno dopuštenim odstupanjima definirani su parametri za izračun visina točaka kojih se izvođač mora pridržavati. Visine točaka određuju se geodetskim metodama mjerenja i instrumentarijem koji mjernom nesigurnošću zadovoljavaju unaprijed postavljene zahtjeve točnosti. Do sada se model geoida HRG2000 koristio samo za izradu geodetskih i kartografskih proizvoda, ali kreiranjem novog modela geoida HRG2009 s puno boljom apsolutnom orijentacijom i boljom relativnom točnosti stvorene su pretpostavke da se razmotri moguća primjena modela geoida HRG2009 za izračun (normalnih) ortometrijskih visina i u složenijim inženjerskim zadaćama, odnosno da posluže kao nezavisna kontrola definiranja visina u mikromrežama.

U Republici Hrvatskoj je u posljednjih nekoliko godina izgrađeno nekoliko kapitalnih objekata. Za potrebe gradnje uspostavljene su mikromreže u kojima su obavljena opsežna terestrička, nivelmanska i GNSS mjerenja.

Radi ispitivanja prihvatljivosti određivanja visina napadnih točaka mikromreže preko modela geoida HRG2009 analizirana su tri načina uspostave visinske osnove:

- mikromreže su međusobno povezane geometrijskim nivelmanom te su obostrano priključene na državnu visinsku mrežu (slika 4)
- mikromreže su obostrano priključene na državnu visinsku mrežu bez međusobnog povezivanja geometrijskim nivelmanom u jedinstvenu visinsku mrežu
- visine napadnih točaka mikromreže određene su modelom geoida HRG2009.



Slika 4. Geodetska položajna i visinska osnova tunela.

U svrhu usporedbe visina (visinskih razlika) napadnih točaka mikromreža model geoida HRG2009 je u prva dva primjera usklađen s visinskim sustavu na osnovi jedne točke na ulaznom ili izlaznom portalu, što znači da je visina dobivena mo-

delom geoida HRG2009 izjednačena s onom koja je dobivena geometrijskim nivelmanom. U trećem primjeru usklađivanje modela geoida HRG2009 s visinskim sustavom obavljeno je pomoću GNSS/nivelmanskih točaka (razlike u visinama dobivene preko modela geoida HRG2009 znatnije se razlikuju od visina točaka dobivenih nivelmanom što ukazuje na slabost apsolutno orijentacije na lokalnom području ili na slabost nivelmanske mreže), (slika 4). U svim mikromrežama obavljena su mjerenja visinskih razlika trigonometrijskim nivelmanom koja su poslužila kao nezavisna kontrola provedenih istraživanja. Sve visine antena za vrijeme izvođenja GPS mjerenja izmjerene su u odnosu na prethodno definiranu visinsku točku na stupovima koji su prihvaćeni kao napadne točke mikromreža (vrh vijka za prisilno centriranje, dodatno ugrađeni reper u podnožju stupa, i sl.), što omogućuje analizu primjene modela geoida u svrhu određivanja visinske komponente.

U prvom primjeru određivanja visina točaka mikromreže korišteni su podaci iz geodetske osnove tunela Sveti Rok (Grgić 2011). Visinska osnova tunela Sveti Rok definirana je nivelmanskim vlakom preciznog nivelmana koji povezuje južnu i sjevernu mikromrežu tunela. Njegova se trasa dijelom podudara s trasom nivelmanskog vlaka br. 298 iz prvog nivelmana visoke točnosti, tako da je tim vlakom obuhvaćen i određen broj već znatno prije stabiliziranih repera.

U tablici 1 prikazane su visine točaka mikromreže tunela Sveti Rok koje su određene različitim metodama te su dane razlike u visinama. Sa H_{GN} označene su visine iz geometrijskog nivelmana, s H_{TN} visine iz trigonometrijskog nivelmana te s H_{MG} visine dobivene modelom geoida HRG2009.

Tablica 1. Usporedba visina u jedinstvenoj visinskoj mreži.

Mreža	Točka	H_{GN} (m)	H_{TN} (m)	H_{MG} (m)	dH_{GN-TN} (m)	dH_{GN-MG} (m)	dH_{TN-MG} (m)
Sveti Rok	P1	574,528	574,547	574,503	-0,019	0,025	0,044
	P4	583,467	583,480	583,433	-0,013	0,034	0,047
	P71	515,134	515,134	515,134	0,000	0,000	0,000
	P8	542,168	542,167	542,171	0,001	-0,003	-0,004
	P101	614,324	614,324	614,343	0,000	-0,019	-0,019
	P21	831,006	830,961	830,974	0,045	0,032	-0,013
	P23	972,160	972,099	972,131	0,061	0,029	-0,032
	P25	1027,372	1027,340	1027,329	0,032	0,043	0,011

Usporedba visina na identičnim točkama pokazuje visoku podudarnost visina dobivenih iz geometrijskog i trigonometrijskog nivelmana te iz modela geoida HRG2009. Usporedba visina napadnih točaka mikromreže P71, P8, P1 i P4, u mikromreži tunela Sveti Rok, dobivenih iz geometrijskog nivelmana s visinama dobivenim nakon usklađivanja visina dobivenih modelom geoida HRG2009 u točki P71 pokazuje da je ploha geoida HRG2009 i u ovako reljefno složenim područjima vrlo precizno definirana. Dopušteno odstupanje pri probodu tunela po niveleti iznosilo je ± 56 mm (ukupno 112 mm), što u odnosu na srednje odstupanje na točkama P1 i P4 od 29 mm ne predstavlja problem. Ako bi se uzela srednja visina za točke

P1 i P4 dobivene izjednačenjem nivelmanske mreže te visina dobivena modelom geoida HRG2009, ta vrijednost bi se dvostruko smanjila i ne bi predstavljala nikakav problem pri proboju tunela u okviru zahtijevane točnosti. Kad bi razlika visina na identičnim točkama bila nešto veća, još uvijek bi bilo ekonomski opravdanije u tunelskoj poligonometriji primijeniti prikladnu metodu geometrijskog nivelmana nego povezivati mikromreže u jedinstveni visinski sustav nivelmanskim vlakom od nekoliko desetaka kilometara.

U drugom primjeru određivanja visina točaka mikromreže korišteni su podaci iz geodetske osnove tunela Mala Kapela i tunela Plasina. Visinske osnove tunela Mala Kapela i Plasina definirane su nivelmanskim vlakovima preciznog nivelmana koji povezuje ulaznu i izlaznu mikromrežu tunela s reperima državne visinske mreže bez međusobnog povezivanja napadnih točaka mikromreže geometrijskim nivelmanom u jedinstvenu visinsku mrežu.

Tablica 2. *Usporedba visina u obostrano visinski priključenim mrežama.*

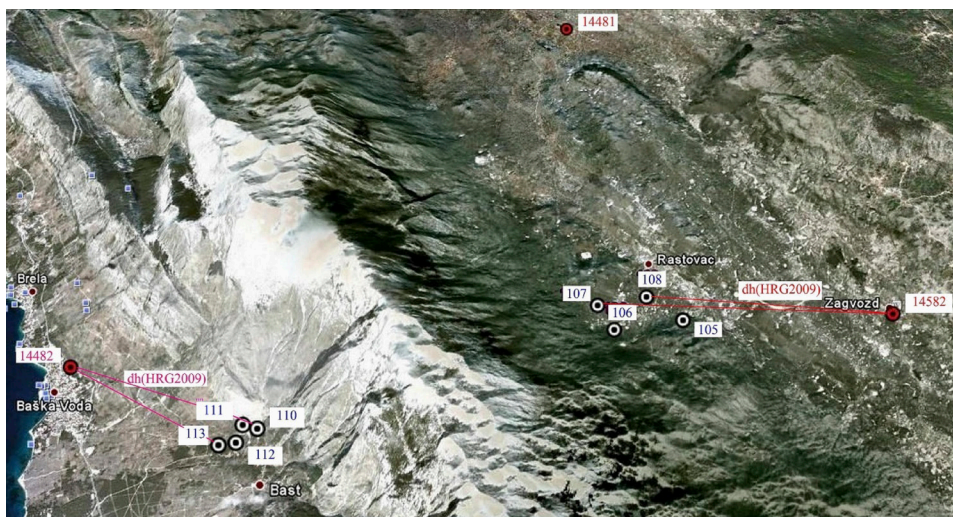
Mreža	Točka	H_GN (m)	H_TN (m)	H_MG (m)	dH_GN-TN (m)	dH_GN-MG (m)	dH_TN-MG (m)
Mala Kapela	S1	564,361	564,361	564,361	0,000	0,000	0,000
	J1	606,829	606,899	606,817	-0,070	0,012	0,082
Plasina	P1	563,366	563,366	563,366	0,000	0,000	0,000
	P2	555,892	555,891	555,891	0,001	0,001	0,000
	P9	545,553	545,567	545,540	-0,014	0,013	0,027
	P10	543,128	543,142	543,114	-0,014	0,014	0,028

Usporedba visina dobivenih iz geometrijskog nivelmana s visinama dobivenim modelom geoida HRG2009 (nakon prethodnog usklađivanja visina dobivenih modelom geoida HRG2009 u točki S1) nedvojbeno pokazuje potencijal primjene modela geoida HRG2009 i u ovako zahtjevnim inženjerskim zadaćama (tablica 2). Nešto veće odstupanje visina dobivenih iz trigonometrijskog nivelmana je najvjerojatnije rezultat nedovoljno jasnog definiranja signala pri mjerenju zenitnih daljina kao i činjenice da je poligonski vlak prije svega trebao poslužiti kontroli položaja točaka pa je mjeren samo u jednom ciklusu. Dopušteno odstupanje pri proboju tunela po niveleti u primjeru tunela Mala Kapela iznosilo je ± 56 mm (ukupno 112 mm), što je u odnosu na odstupanje na točki J1 od 12 mm zanemariva vrijednost u smislu zadovoljavanja zahtjeva točnosti pri proboju tunela.

Visine točaka geodetske osnove tunela Plasina za područje mikromreže usklađene su na točki P1 (tablica 2). Usporedba visina na identičnim točkama pokazuje visoku podudarnost geometrijskog i trigonometrijskog nivelmana. Budući da geometrijskim nivelmanom nisu povezane mikromreže ulaznog i izlaznog portala nego su one priključene na najbliže repere, moguće je da bi razlike bile nešto drugačije da je formirana jedinstvena visinska mreža. Usporedba visina dobivenih iz geometrijskog nivelmana s visinama dobivenim modelom geoida HRG2009, nakon provedenog usklađivanja, u točki P9 odstupanje 13 mm nedvojbeno pokazuje veliki potencijal primjene modela geoida HRG2009 s obzirom na dopušteno

odstupanje po niveleti pri probouju tunela od ± 35 mm (ukupno 70 mm). Visine točaka određene modelom geoida HRG2009 u potpunosti bi zadovoljile zahtjeve točnosti pri probouju tunela po niveleti dok bi se još više smanjila vjerojatnost pogreške ukoliko se uzme srednja visina iz modela geoida i geometrijskog nivelmana.

U trećem primjeru određivanja visina točaka mikromreže korišteni su podaci iz geodetske osnove tunela Sveti Ilija. Napadne točke mikromreže tunela Sveti Ilija P106 i P110 nisu nivelirane nego su im, kao i svim ostalim točkama mikromreže, visine izračunane na osnovi izvedenih GNSS mjerenja za potrebe uspostave položajne geodetske osnove te modela geoida HRG2009 (slika 5).



Slika 5. Geodetska osnova tunela Sveti Ilija.

Za usklađivanje modela geoida HRG2009 s visinama iz nivelmanske mreže u području projektne zadaće korištene su tri GNSS/nivelmanske točke u neposrednoj blizini ulaznog i izlaznog portala koje su izmjerene za potrebe kreiranja modela geoida HRG2009. Iz razlike visine na GNSS/nivelmanskim točkama računa se popravka (tablica 3), kojom se korigiraju sve visine koje se računaju modelom geoida HRG2009 u području projektne zadaće. Na taj se način postiže bolja usklađenost visina računanih modelom geoida HRG2009 s visinskim sustavom. To je osobito važno jer se mikromreže za potrebe tunelogradnje često uspostavljaju kao samostalne, a njihovo povezivanje s operativnim poligonom, koji se uspostavlja za potrebe cestogradnje, ostvaruje se naknadno. Ako se ne obavi prethodna orijentacija geoida za područje projektne zadaće, postoji mogućnost nastanka pogreške u visinskom priključku operativnog poligona na tunelsku mikromrežu do nekoliko centimetara, koliko može iznositi nesuglasica u visinama dobivena modelom geoida HRG2009 i iz nivelmanske mreže za to područje.

Tablica 3. *Korekcija apsolutne orijentacije geoida.*

Točka	H_HRG2009 (m)	H_nivelirano (m)	Razlika (m)	Popravka (m)	H _{kor} (m)
14482	63,311	63,292	0,019		63,304
14582	464,346	464,351	-0,005		464,339
14481	321,328	321,322	0,006		321,321
		suma	0,020	0,007	

Visine točaka geodetske osnove tunela Sveti Ilija na sjevernom i južnom portalu nisu mjerene geometrijskim nivelmanom pa se ne mogu usporediti vrijednosti visina na napadnim točkama mikromreže. Unatoč tome, temeljem iskustava iz drugih mreža i dobre podudarnosti visinskih razlika između napadnih točaka tunela određenih geometrijskim i trigonometrijskim nivelmanom te modelom geoida HRG2009 (Grgić 2011), određivanje visina točaka mikromreže pomoću HRG2009, uz prethodno usklađivanje s visinskim sustavom (lokalno poboljšanje apsolutne orijentacije geoida za područje projektne zadaće) na osnovi nekoliko GNSS/nivelmanskih točaka, s obzirom na dopušteno odstupanje točnosti proboja tunela po niveleti od ± 47 mm (ukupno 94 mm), u potpunosti bi jamčilo proboj tunela u okviru postavljenog zahtjeva točnosti. Tome u prilog ide i usporedba visinske razlike između napadnih točaka tunela P106 i P110 određena modelom geoida HRG2009 i trigonometrijskim nivelmanom koja iznosi 21 mm. Usporedba visina na ostalim točkama mikromreže pokazuje dobru podudarnost visina dobivenih modelom geoida HRG2009 i trigonometrijskim nivelmanom (tablica 4). Određivanje visina točaka mikromreže trigonometrijskim nivelmanom poslužilo je kao nezavisna kontrola, budući da su visinske razlike u mikromrežama, mjerene trigonometrijskim nivelmanom, nastale kao rezultat jednodnevnih mjerenja iz samo tri girusa.

Tablica 4. *Usporedba visina u mreži čije su visine određene modelom geoida HRG2009.*

Mreža	Točka	H_TN (m)	H_MG (m)	dH_TN-MG (m)
Sveti Ilija	P105	414,619	414,628	-0,009
	P106	380,639	380,639	0
	P107	400,255	400,252	0,003
	P108	362,022	362,023	-0,001
	P110	310,810	310,789	0,021
	P111	274,799	274,776	0,023
	P112	242,893	242,877	0,016
	P113	220,613	220,600	0,013

Na osnovi iskustava iz mreža za prijenos visina s kopna na otoke (Grgić i dr. 2010) može se pretpostaviti da bi rezultati bili drugačiji (bolji) da su mjerenja ponovljena

pri promijenjenim atmosferskim uvjetima, ili da su za potrebe određivanja visinskih razlika trigonometrijskim nivelmanom obavljene višestruke registracije zenitne daljine u oba položaja instrumenta.

Mikromreže su često locirane u nepristupačnim terenima, daleko od postojećih repera, pa bi to rješenje određivanja visina, kao u slučaju tunela Sveti Ilija modelom geoida HRG2009, moglo prerasti u široko primjenjivanu metodu. Budući da nema kontrole geometrijskim nivelmanom, trebalo bi obavezno primijeniti metodu preciznog nivelmana pri određivanju visina točaka podzemne geodetske osnove.

Standardno odstupanje dobiveno iz razlika visina određenih geometrijskim i trigonometrijskim nivelmanom u pojedinim je mrežama očekivano i iznosi 31 mm (tablica 5). To proizlazi iz činjenice da su visinske razlike dobivene trigonometrijskim nivelmanom nusprodukt mjerenja obavljenih za uspostavu položajne geodetske osnove te su kao takve primarno poslužile kontroli već određenih visina napadnih točaka mikromreža. Standardno odstupanje dobiveno iz razlike visina točaka mikromreža Tunel Sveti Rok, Tunel Mala Kapela i Tunel Plasina (podaci razlika visina točaka iz tablica 1 i 2) određenih geometrijskim nivelmanom i modelom geoida HRG2009 iznosi 18 mm (tablica 5).

Tablica 5. Standardna odstupanja razlika visina.

$s_{\Delta H} - \Delta H_{GN-TN}$ (m)	$s_{\Delta H} - \Delta H_{GN-TN}$ (m)	$s_{\Delta H} - \Delta H_{GN-MG}$ (m)	$s_{\Delta H} - \Delta H_{TN-MG}$ (m)
0,031	0,010	0,018	0,025

Visine određene modelom geoida u visokim su planinskim predjelima nesigurnije zbog složenosti reljefa. Budući da su za točnost proboja važne samo visine napadnih točaka mikromreže, zbog dobivanja realnije slike podudarnosti visina izračunano je standardno odstupanje razlike visina samo na osnovi razlika visina točaka iz mikromreže oko portala (zanemarene su razlike visina točaka iz preciznoga poligonometrijskog vlaka koji povezuje mikromreže) i ono iznosi 14 mm. To standardno odstupanje nedvojbeno pokazuje da je u kopnenom dijelu Republike Hrvatske zaista moguće primijeniti model geoida HRG2009 u svrhu određivanja visina točaka za posebne namjene u projektima s povećanim zahtjevom točnosti, kao što je to slučaj u tunelogradnji. Standardno odstupanje dobiveno iz razlika visina određenih trigonometrijskim nivelmanom i modelom geoida HRG2009 potvrđuje da se svaka od tih metoda može primjenjivati za potrebe tunelogradnje te da mogu poslužiti jedna drugoj kao dobra nezavisna kontrola.

5. Zaključak

Kreiranjem novog modela geoida HRG2009 s puno boljom usklađenosti s visinskim sustavom (bolje apsolutno orijentiran) i boljom relativnom točnosti stvorene su pretpostavke da se razmotri moguća primjena toga modela geoida za izračun visina u složenijim inženjerskim zadacima, odnosno da tako određene visine posluže kao nezavisna kontrola.

Visine točaka određene modelom geoida HRG2009 u potpunosti bi zadovoljile zahtjeve točnosti pri probodu tunela po niveleti. Takav model geoida u tunelogradnji u potpunosti je primjenjiv u slučaju kada su portalne mikromreže povezane na najbliže repere iz državne visinske mreže bez potrebe povezivanja portalnih mreža dugim nivelmanskim vlakovima po vrlo teškom i visinski jako razvedenom području u jedinstvenu visinsku mrežu.

Štoviše, iz usporedbe visina točaka mikromreža uspostavljenih za potrebe tunelogradnje, koje su određene modelom geoida HRG2009 te geometrijskim i trigonometrijskim nivelmanom na kopnenom dijelu državnog teritorija, proizlazi da je danas praktično moguće uspostaviti visinsku geodetsku osnovu pomoću GNSS mjerenja i modela geoida HRG2009. Reperi državne visinske mreže koji se nalaze u blizini ulaznog i izlaznog portala koriste se pritom za usklađivanje modela geoida HRG2009 s visinskim sustavom (lokalno poboljšanje apsolutne orijentacije geoida) na području projektne zadaće. Time se osigurava bolje usklađivanje visina točaka mikromreže s reperima državne visinske mreže, koji su osnova za određivanje visina točaka operativnog poligona.

Određivanje visinskih razlika trigonometrijskim nivelmanom ima veliki potencijal osobito u brdsko-planinskim uvjetima, u kojima se i inače najčešće razvijaju mreže posebnih namjena. Trigonometrijskim nivelmanom može se postići zavidno visoka preciznost određivanja visina točaka mikromreže pod pretpostavkom da se mjerenja planiraju i izvode u svrhu određivanja visina točaka mikromreže. Ako se uzme u obzir činjenica da su mjerenja visinskih razlika trigonometrijskim nivelmanom rezultat terestričkih mjerenja koja istovremeno služe za određivanje položaja točaka mikromreže, vrijednost primjene te metode tim je veća, jer se bitno skraćuje vrijeme terenskog rada.

Primjena bilo koje od navedenih metoda u svrhu određivanja visina točaka mikromreže prema važećem bi Pravilniku, kojim su definirana dopuštena odstupanja, osigurala da se ostvari točnost proboda tunela u visinskom smislu.

Modeli geoida u posljednje se vrijeme neprestano poboljšavaju, što osigurava da određivanje visina GNSS-nivelmanom dobiva sve veći značaj. Na osnovi provedenog istraživanja određivanje visina, odnosno visinskih razlika, modelom geoida HRG2009 omogućuje već sada nesmetano korištenje u tunelogradnji, čime su stvorene pretpostavke za preispitivanje odredbi tehničkih normativa koji uređuju primjenu adekvatnih metoda u tunelogradnji.

Literatura

- Bašić, T. (2009): Jedinstveni transformacijski model i novi model geoida Republike Hrvatske, Izvješća o znanstveno stručnim projektima, Državna geodetska uprava, Zagreb, 5–23.
- Cvetković, Č. (1970): Primena geodezije u inženjerstvu, Građevinska knjiga, Beograd.
- Danila, U. (2006): Corrective Surface for GPS-levelling in Moldova, Master's Thesis, TRITA-GIT EX 06-001, Geodesy Report No. 3089, Royal Institute of Technology, School of Architecture and the Built Environments, Stockholm, Sweden.
- Drewes, H. (2005): Probleme bei der Höhenbestimmung mit GPS, Intergeo 2005, Düsseldorf.

- Džapo, M., Zrinjski, M. (2004): Podzemna geodetska osnova tunela "Mala Kapela", Geodetski list, 2, 117–132.
- Even-Tzur, G., Steinberg, G. (2009): Using an Official Undulation Model for Orthometric Height Acquisition by GNSS, Survey review – Directorate of Overseas Surveys, Vol. 41, No. 313, 292–300.
- Featherstone, W. (2008): GNSS-based heighting in Australia: Current, emerging and future issues, Journal of Spatial Science, Vol. 53, No. 2, 115–133.
- Feldmann-Westendorff, U., Jahn, C.-H. (2006): GNSS-Höhenbestimmung in einem einheitlichen Raumbezug, 66. DVW-Seminar GPS und GALILEO, Deutscher Verein für Vermessungswesen e. V. – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, 21.–22.02.2006, Darmstadt, Schriftenreihe 49/2006, 147–171.
- Grgić, I. (2003): Specifičnosti geodetske osnove u tunelogradnji, Magistarski rad, 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., Lučić, M., Kršulović, D. (2010): The Appliance of the Trigonometric levelling on the long distances, Paper Presented at the EUREF Symposium, Gävle, 2nd to 5th June, 2010.
- Hennecke, F., Müller, G., Werner, H. (1988): Vermarkung von Fest- und Messungspunkten, Handbuch Ingenieurvermessung, Band I, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 190–201.
- Hirt, C., Schmitz, M., Feldmann-Westendorff, U., Wübbena, G., Jahn, C.-H., Seeber, G. (2011): Mutual validation of GNSS height measurements from high-precision geometric-astronomical levelling, GPS Solutions, Volume 15, Issue 2, 149–159.
- Janković, M. (1966): Inženjerska geodezija, prvi i drugi dio, Tehnička knjiga, Zagreb.
- Krüger, J. (1985): Absteckungsnetze, speziell für Tunnelabsteckungen, Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung II, Konrad Wittwer Verlag, Stuttgart, 507–524.
- Marti, U., Schlatter, A. (2002): The New Height System in Switzerland, Proceedings of IAG Symposium on Vertical Reference System, Cartagena, Colombia. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York.
- Meyer, T., Roman, D., Zilkoski, D. (2006): What does height really mean?, Part IV: GPS Heighting, Surveying and Land Information Science, Vol. 66, No. 3, 165–183.
- Narodne novine (1996): Zakon o normizaciji, 55/96-2336, Zagreb.
- Schmitz, M., Wübbena, G. (2007): Einflüsse auf die GNSS Höhenbestimmung – Grenzen und Chancen, 5. ascos Anwender- und Kundentreffen, e-on, Ruhrgas; 10. und 11. Mai 2007, Akademie Mont-Cenis, Herne.
- Solarić, N., Solarić, M., Zrinjski, M. (2009): GPS-antena Zephyr Geodetic, Geodetski list, 4, 329–352.
- Zrinjski, M. (2010): Definiranje mjerila kalibracijske baze Geodetskog fakulteta primjenom preciznog elektrooptičkog daljinomjera i GPS-a, Doktorska disertacija, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Zrinjski, M., Džapo, M. (2010): Geodetic Basis of the Longest Tunnel in the Republic of Croatia, Survey Review – Directorate of Overseas Surveys, Vol. 42, No. 318, 345–358.
- Zrinjski, M., Solarić, N., Bašić, T. (2011): Analiza parametara kvalitete prijema GPS signala na kalibracijskoj bazi Geodetskog fakulteta, Ekscentar, 14, 76–79.

Application of Geoid Model HRG2009 in Tunnelling

ABSTRACT. In the tunnelling is necessary to provide the breakthrough accuracy not only horizontally but also in terms of height. With tolerances in breakthrough point are defined parameters to calculate the coordinates of geodetic control points. In order to transfer the height to the tunnel, because of construction of underground structures, it is necessary to develop altitude geodetic basis on the surface near to the tunnel. By creating of the new Geoid model HRG2009 have been created the preconditions to consider the possible application of HRG2009 Geoid to calculate the height of the network points, or to serve as an independent check of the height defining.

Keywords: breakthrough accuracy, HRG2009 Geoid model, tunnelling.

Primljeno: 2014-01-02

Prihvaćeno: 2014-02-19