

VLOGA KAKOVOSTNEGA VIŠINSKEGA SISTEMA IN GEOIDA ZA IZVEDBO GNSS-VIŠINOMERSTVA

THE QUALITY ROLE OF HEIGHT SYSTEM AND GEOID MODEL IN THE REALIZATION OF GNSS HEIGHTING

Miran Kuhar, Sandi Berk, Božo Koler, Klemen Medved, Ove Omang, Dag Solheim

UDK: 528.024:528.21:528.23

IZVLEČEK

V okviru projekta Vzpostavlanje evropskega prostorskega referenčnega sistema v Sloveniji je bila izračunana tudi ploskev testnega geoida. V prispevku bo predstavljena primerjava določitve geoidnih višin iz geoida 2000 in testnega geoida iz leta 2010. Analizo natančnosti ploskev geoida Slovenije smo opravili s primerjavo geoidnih višin, ki jih dobimo kot razlike merjenih elipsoidnih in nadmorskih višin (»merjene geoidne višine«) in tistih, ki jih interpoliramo iz modelov. Primerjali smo »merjene« in interpolirane geoidne višine na 352 GNSS/nivelman kontrolnih točkah. Z izračunom ploskve testnega geoida smo pridobili možnost predhodne analize kakovosti prihodnjega geoida, ki je zelo pomembna za izvajanje GNSS-višinomerstva v geodetski praksi.

KLJUČNE BESEDE

geoid, kvazigeoid, višinska referenčna ploskev, GNSS-višinomerstvo

Klasifikacija prispevka po COBISS-u: 1.08

ABSTRACT

This paper presents a quality analysis and comparison of two height reference surfaces. The first is the actual geoid model from the year 2000, and the second is the test geoid model determined in the frame of the project Establishment of the European Reference System in Slovenia. Quality analysis is based on the comparison of geoid heights determined from measured ellipsoidal and mean-sea-level heights and geoid heights interpolated from the model. A comparison was made on 352 GNSS/levelling points.

KEY WORDS

geoid, quasigeoid, height reference surface, GNSS heighting

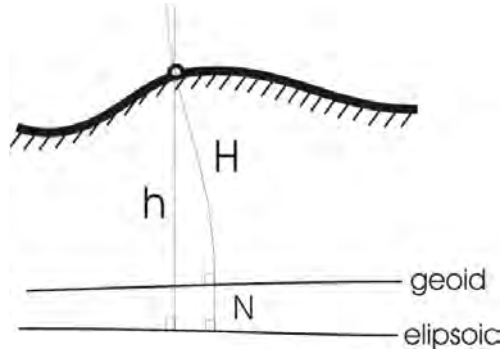
1 UVOD

GNSS-višinomerstvo je postopek določanja nadmorskih višin točk na podlagi izmerjenih elipsoidnih višin in interpoliranih geoidnih višin iz ustreznega modela geoida. Elipsoidne višine, določene s tehnologijo GNSS (angl. Global Navigation Satellite System), so geometrijske količine in se nanašajo na ploskev elipsoida. Ker se elipsoidne višine ne nanašajo na težnostno polje Zemlje, jih v geodetski praksi niti v vsakdanjem življenju ne uporabljamo (saj niso višine v težnostnem polju Zemlje). Elipsoidne (h) in nadmorske višine - ortometrične (H) ali normalne višine (H^N) - povezuje enačba:

$$h = H + N$$

$$h = H^N + \zeta$$

kjer je N geoidna višina (ali ondulacija) oziroma ζ kvazigeoidna višina. Učinkovito GNSS-višinomerstvo je izvedljivo samo, če imamo na razpolago model geoida (kvazigeoida) enakovredne natančnosti, kot je natančnost določitve elipsoidnih višin.



Slika 1: Elipsoidna višina h , nadmorska višina H in geoidna ondulacija N

2 GEOID, KVAZIGEOID IN VIŠINSKA REFERENČNA PLOSKEV

V geodeziji ločimo fizično in teoretično površino Zemlje. Prvo določajo lastnosti Zemljine zunanje površine (relief), to je prostor, v katerem živimo. Druga je podana z obliko, ki jo približno ponazarjata umirjena površina morske gladine ter tangenta na težiščnico, to pa je geoid. Fizična površina Zemlje je nepravilne oblike in raznovrstno razčlenjena. Carl Friedrich Gauß je geoid opredelil kot ekvipotencialno ploskev zemeljskega telesa, ki je ponazorjena s srednjo gladino svetovnih morij in v mislih podaljšana pod celinami. Ploskve geoida ni mogoče opredeliti z analitičnimi izrazi. To pomeni, da ploskve geoida ne moremo izraziti z matematičnimi enačbami, saj se ukrivljenost geoida spreminja s spremembo reliefa oziroma s spremembo gostote mas v zemeljski notranjosti. Ploskev geoida za celotno Zemljo lahko predstavimo v obliki enačbe tako, da razvijemo privlačni potencial Zemlje v vrsto po sfernih funkcijah. Tako predstavljeni obliki zemeljskega geoida pravimo »globalni geopotencialni model« (GGM). V zadnjem desetletju sta bila določena dva globalna geopotencialna modela, ki ju v geodetski praksi uporabljamo v povezavi z tehnologijo GNSS. To sta modela EGM96 (angl. Earth Gravitational Model 1996) in novejši model EGM08 (angl. Earth Gravitational Model 2008).

Določanje ploskve geoida pomeni določanje oblike Zemlje oziroma določitev ene izmed nivojskih ploskev Zemljinega težnostnega polja. Geoid kot ekvipotencialna ploskev poteka deloma nad in deloma pod površjem Zemlje, zato je njegova določitev brez poznavanja razporeditve gostote mas v notranjosti Zemlje izjemno težka naloga. Ker funkcije razporeditve gostote zemeljskih mas ne poznamo, določamo geoid posredno, in sicer z redukcijo merjenih vrednosti težnosti na geoid in uvedbo predpostavk o gostoti zemeljskih mas v njeni notranjosti. Zaradi omenjenih težav je Mihail Sergejevič Molodenski v petdesetih letih prejšnjega stoletja podal novi koncept obravnave težnostnega polja. Odpovedal se je geoidu ter obravnaval samo fizično površino Zemlje in težnostno polje okoli nje. Pri tem nam ni treba uvajati hipotez o gostoti notranjosti Zemlje. Tako nastala teorija je ustvarila novi pojem kvazigeoida, ki je v danem primeru samo referenčna ploskev za določanje na novo določenih normalnih višin H^N . Večina današnjih

»rešitev« obravnavanja oblike Zemlje so kvazigeoidi, saj podatkov, ki jih uporabljamo za izračun ploskev (merjene vrednosti težnosti in odkloni navpičnic), ne reduciramo v notranjost Zemlje na ničelno nivojsko ploskev (geoid), temveč jih uporabljamo v obliki, v kakršni so določeni na površini Zemlje (Solheim, 2000).

Če želimo ploskev geoida, ki je rezultat nekega numeričnega postopka, uporabiti praktično, na primer v povezavi z GNSS-določenimi elipsoidnimi višinami, je nujen preračun (transformacija) elipsoidnih višin v višine lokalnega/državnega višinskega sistema. Tako »preračunana« ploskev ni več (kvazi)geoid, temveč »višinska referenčna ploskev«, ki vsebuje skupne vplive: a) nezanesljivega izračuna (kvazi)geoida (pogreški metode, vhodnih podatkov); b) pogreške določitve elipsoidnih višin in c) tektonske vertikalne premike na območju izračuna. Ne glede na to lahko omenjeno »višinsko referenčno ploskev« uspešno uporabimo za izračun nadmorskih višin z metodo tako imenovanega GNSS-višinomerstva – predvsem v manj dostopnih krajih, kjer je izvedba drugih metod določanja višin časovno potratna in torej cenovno neugodna. Preračun (transformacijo) elipsoidnih v nadmorske višine je treba izpeljati s čim večjim številom točk, ki so enakomerno razporejene po celotnem območju in imajo znane tako elipsoidne kot nadmorske višine (višine v državnem višinskem sistemu). Točke, ki imajo znani obe vrsti višin, v geodetski terminologiji imenujemo GNSS/nivelman točke.

3 GEOID V SLOVENIJI

Trenutno veljavna rešitev ploskve geoida za Slovenijo izhaja iz leta 2000. Takrat jo je v okviru doktorske disertacije izračunal Boško Pribičević z Geodetske fakultete v Zagrebu (Pribičević, 2000). Ploskev je bila izračunana s tehniko kolokacije po metodi najmanjših kvadratov. Uporabili so 99 točk z merjenimi odkloni navpičnice, od tega 51 v Sloveniji, 23 na Hrvaškem, 20 v Avstriji in 5 na Madžarskem. Ker pa so bile uporabljene točke z območja držav z različnimi uradnimi koordinatnimi sistemi, so vse vrednosti transformirali v koordinatni sistem ETRS89. Uporabili so tudi 4605 točkastih vrednosti anomalij težnosti. Izračunana ploskev je bila vpeta na 163 GNSS/nivelman točkah, ki so dokaj enakomerno razporejene po celotnem ozemlju Slovenije. Točke, ki so na ozemlju Hrvaške, so bile prav tako vključene v izračun, saj so se nanašale na isti višinski datum Trst.

Ploskev geoida je predstavljena v obliki gridne mreže velikosti $1' \times 1,5'$ v mejah $13,25^\circ < \lambda < 16^\circ,75$ (vzhodno od Greenwicha) in $45^\circ,25 < \varphi < 47^\circ$ (severno od ekvatorja). Razpon geoidnih višin na območju, ki ga gridna mreža zajema, je med 44,140 m in 48,724 m, pri čemer je povprečna geoidna višina 46,453 m. (Opomba: gridna mreža vrednosti geoidnih višin je podana samo znotraj mej Slovenije.)

Težave z uporabo modela geoida pri nalogah GNSS-višinomerstva so se pojavile takoj po opravljenem preračunu višinske mreže Slovenije, leta 2000 (Vardjan in Koler, 2001). Največja pomanjkljivost rešitve je, da so bile za vpetje ploskve uporabljene uradne višine točk, ki so veljale pred preračunom višinske nivelmanske mreže. Poleg tega je bila večina nadmorskih višin določena z metodo trigonometričnega višinomerstva, ki po kakovosti ne dosega natančnosti določitve višin z geometričnim nivelmanom.

V okviru projekta Vzpostavljane evropskega prostorskega referenčnega sistema v Sloveniji je bil oktobra 2010 opravljen izračun novega, testnega modela geoida za območje Slovenije. Tokrat je rešitev gravimetrična, kar pomeni, da so za izračun uporabljene izključno merjene vrednosti težnega pospeška. V izračun je vključeno skoraj 12.000 točkastih vrednosti anomalij težnosti. Ploskev je bila izračunana z numerično integracijo Stokesove enačbe po metodi hitre Fourierjeve transformacije (Omang, 2000). Višinska referenčna ploskev je bila izračunana z vpetjem geoidne ploskve na 24 GNSS/nivelman točkah, na katerih sta obe višini določeni z najvišjo mogočo natančnostjo. Na vseh teh točkah so se GNSS-opazovanja za določitev elipsoidnih višin izvajala neprekinjeno vsaj 36 ur, z geometričnim nivelmanom pa so točke navezane na nivelmanske poligone višjega reda (nadmorska višina).

Geoid (višinska referenčna ploskev) je izračunan v gridu $30'' \times 45''$ v mejah $13^\circ < \lambda < 16^\circ$ (vzhodno od Greenwicha) in $45^\circ < \varphi < 47^\circ$ (severno od ekvatorja). Razpon geoidnih višin na območju izračuna je med 41,972 m in 49,837 m, pri čemer je povprečna geoidna višina 45,930 m.

Glede na rešitev iz leta 2000 so pri novem, testnem modelu uporabljeni novejši in izboljšani vhodni podatki. Uporabljena sta dva nova digitalna modela višin za območje izračuna, kjer se položaji točk nanašajo na koordinatni sistem ETRS89 (Berk in sod., 2009; Oven in sod., 2010):

- model visoke ločljivosti $3'' \times 4,5''$ ($1200 \times 800 = 960000$ celic; približna širina celice je 93 m),
- model nizke ločljivosti $30'' \times 45''$ ($120 \times 80 = 9600$ celic; približna širina celice je 926 m).

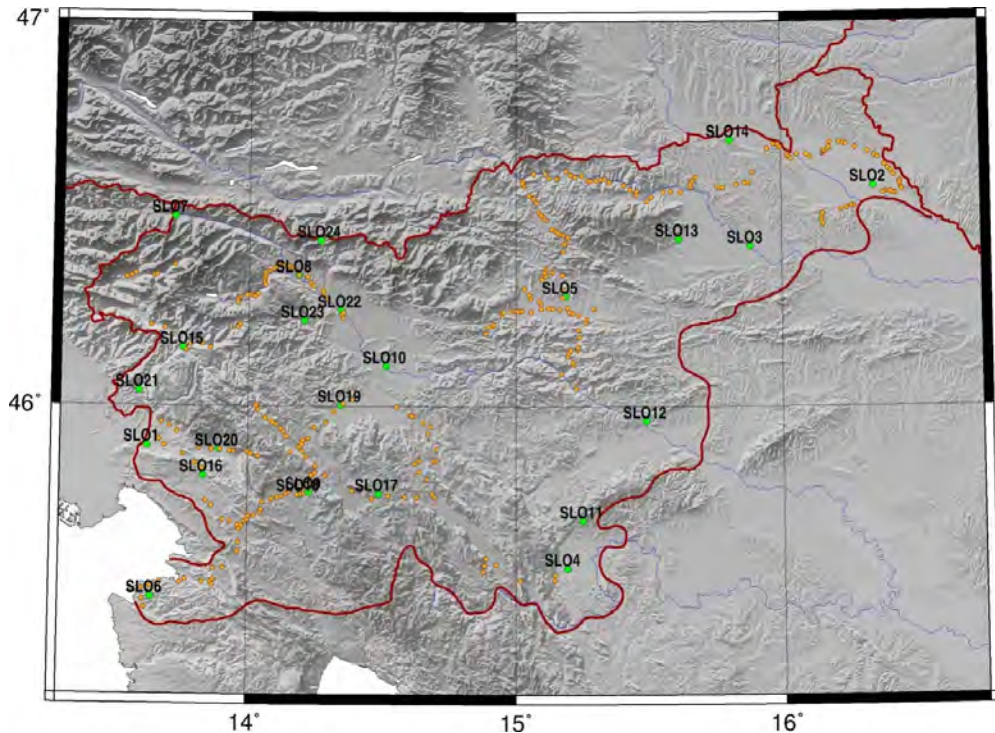
Poleg obstoječih gravimetričnih podatkov na ozemlju Slovenije je bilo v izračun vključenih več kot sedemsto merjenih vrednosti težnega pospeška, ki jih je Geodetska uprava Republike Slovenije (GURS) določila v zadnjih treh letih. GURS je v okviru izmenjave podatkov z Avstrijo pridobil podatke, ki pokrivajo mejno območje držav južno od 47° vzporednika. Gre za skoraj štiri tisoč merjenih vrednosti težnega pospeška.

4 ANALIZA NATANČNOSTI OBEH MODELOV

Analizo natančnosti ploskev geoida Slovenije smo opravili s primerjavo geoidnih višin, ki jih dobimo kot razlike merjenih elipsoidnih in nadmorskih višin (»merjene geoidne višine«) in tistih, ki jih interpoliramo iz modelov.

V okviru že omenjenega projekta vzpostavitve evropskega referenčnega sistema je GURS v zadnjih letih sistematično opravljal GNSS-meritve na reperjih višjih redov državne nivelmanske mreže. Prav tako so posamezne točke gravimetrične mreže in posamezne točke omrežja permanentnih postaj SIGNAL višinsko povezane z najbližjim reperjem s preciznim nivelmanom. Tako je nastala obsežna baza GNSS/nivelman točk, ki trenutno obsega več kot štiristo točk.

Primerjavo »merjenih« in interpoliranih geoidnih višin smo opravili na 352 GNSS/nivelman kontrolnih točkah (slika 2). Na sliki je z zelenimi krogi označenih 24 točk, ki so uporabljene za vpetje testne rešitve iz leta 2010. Z rumenimi krogi pa so označene kontrolne točke, ki so uporabljene za analizo natančnosti in kakovosti.



Slika 2: Število in razporeditev GNSS/nivelman točk

V analizi smo naknadno izločili sedem točk, saj obstaja velika verjetnost »grobih pogreškov«.

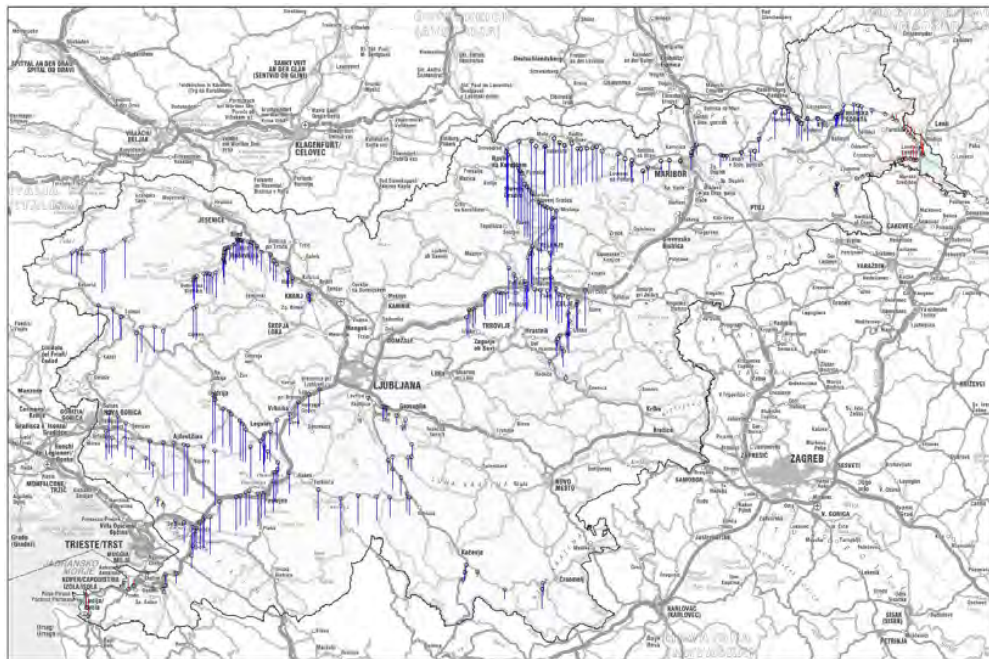
V preglednici 1 so podani statistični kazalci, izračunani na podlagi odstopanj na 345 kontrolnih točkah.

Model geoida	Sredina [m]	Maks. odstopanje [m]	Min. odstopanje [m]	Std. odklon [m]
rešitev 2000	-0,1078	0,0987	-0,2897	0,0816
rešitev 2010	-0,0024	0,0935	-0,1002	0,0351

Preglednica 1: Statistični kazalci, izračunani na podlagi vzorca.

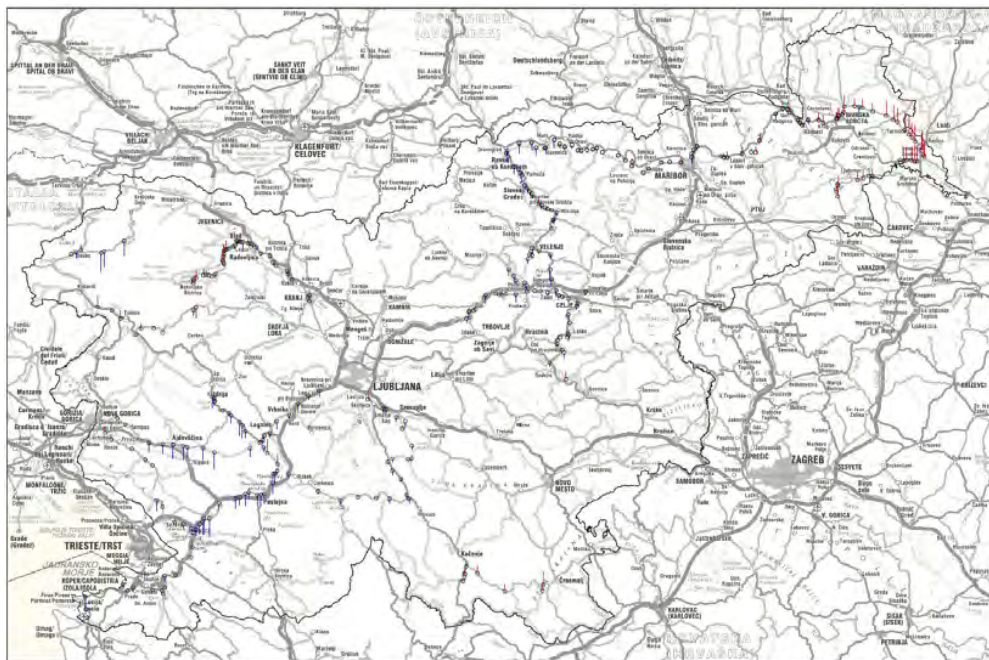
Pri obeh modelih so odstopanja normalno porazdeljena, pri rešitvi iz leta 2000 je sredina odstopanj -0,1078 m, mediana je -0,1006 m. Pri modelu iz leta 2010 je sredina odstopanj -0,0024 m, mediana -0,0033 m. To kaže na medsebojni zamik modelov za približno 10 cm v višinskem smislu.

Odstopanja na posameznih kontrolnih točkah v obeh modelih so prikazana na slikah 3 in 4.



10 cm odstopanje

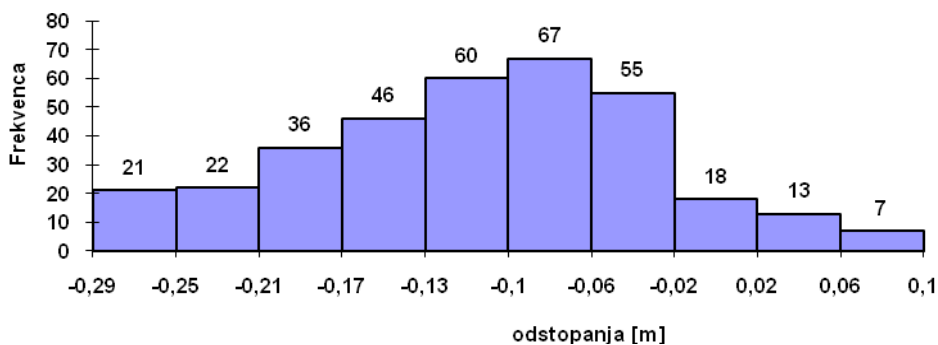
Slika 3: Odstopanja na posameznih kontrolnih točkah (model 2000)



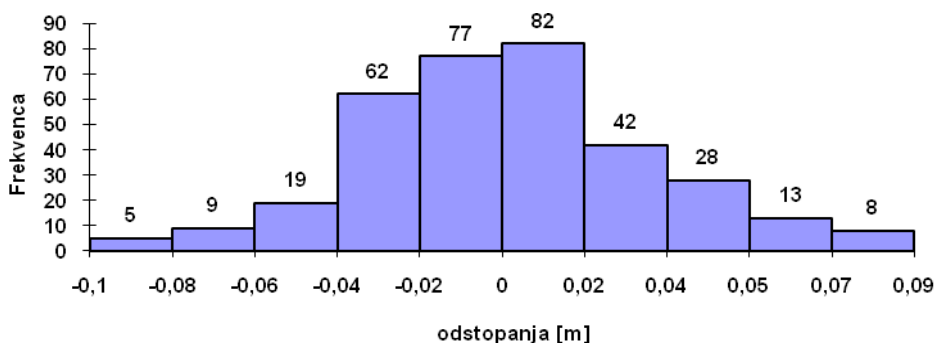
10 cm odstopanje

Slika 4: Odstopanja na posameznih kontrolnih točkah (model 2010)

Histograma frekvenc odstopanj za obe rešitvi sta prikazana na grafih 1 in 2.

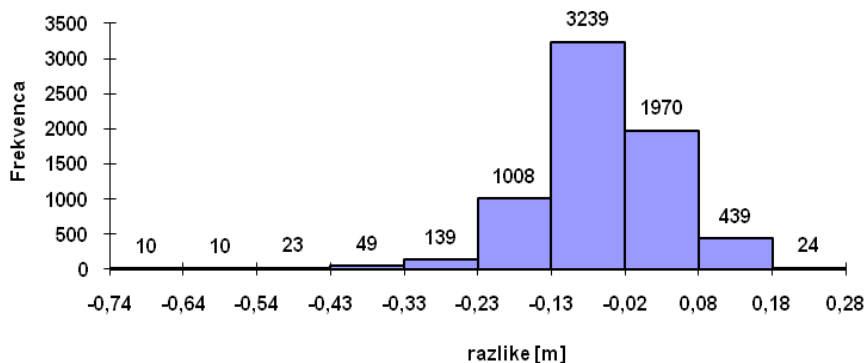


Graf 1: Histogram frekvenc odstopanj za rešitev iz leta 2000

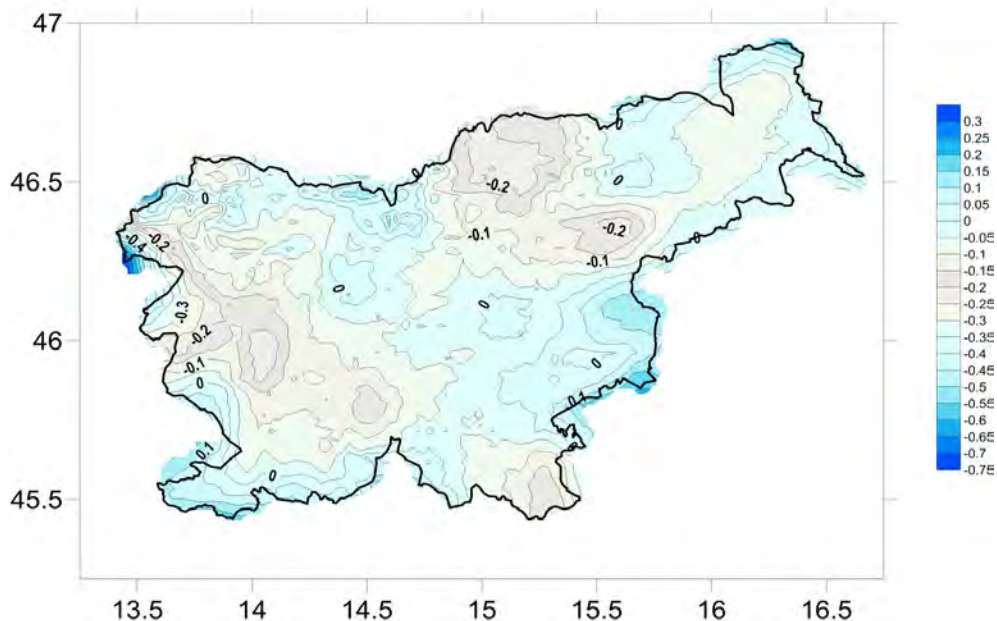


Graf 2: Histogram frekvenc odstopanj za rešitev iz leta 2010

Prav tako smo opravili primerjavo gridov obeh rešitev. Izračunali smo razlike v gridnih točkah. Histogram frekvenc razlik je prikazan na grafu 3. Ker so razlike podane v pravilni mreži, smo lahko tudi izrisali plastnice (slika 5). Ekstremna odstopanja so na mejah Slovenije, moramo pa poudariti, da so vrednosti v gridu modela iz leta 2000 podane samo na ozemlju Slovenije. Razpon razlik je relativno velik (med $-0,741$ m in $0,283$ m), ni pa opaziti sistematičnih odstopanj.



Graf 3: Histogram frekvenc razlik v gridnih točkah



Slika 5: Prikaz odstopanj v gridnih točkah

5 SKLEP

Učinkovito in kakovostno GNSS-višinnerstvo je mogoče izvajati z uporabo kakovostne višinske referenčne ploskve in z ustrezno natančno določenimi elipsoidnimi višinami. Natančnost izmerjenih elipsoidnih višin je odvisna od številnih dejavnikov: metode izmere, uporabljenega instrumentarija, razporeditve satelitov itd. Geoidni model oziroma višinska referenčna ploskev pa se določa enkrat na desetletje. Zato se izračun opravi s pridobitvijo novejših in kakovostnejših podatkov. Z izračunom testnega modela geoida in njegovo analizo smo korak bližje k novemu slovenskemu geoidu, ki bo z ustrezno kakovostjo zadovoljil potrebe uporabnikov. Analiza je pokazala, da je treba predvsem pridobiti boljše gravimetrične podatke na mejnem območju z Italijo in enakomerno zgostiti mrežo kvalitetnih GNSS/nivelman točk, ki bodo služile za vpetje geoida. Pričakujemo, da bomo v letu 2011 pridobili gravimetrične podatke z vzhodnega dela Italije, ki meji na Slovenijo. Tako bo končana faza pridobivanja kakovostnih podatkov za ponovni izračun geoidne ploskve na območju Slovenije. Geoidno ploskev je treba vpeti (transformirati) na čim več enakomerno razporejenih GNSS/nivelman točk. Določanje teh točk še poteka. Kmalu bomo imeli na razpolago obsežno bazo kakovostno določenih GNSS/nivelman točk. Tako bomo lahko nekaj najnatančnejših točk uporabili za vpetje izračunane geoidne ploskve v državni višinski sistem, preostale pa bodo kontrolne točke za oceno natančnosti višinske referenčne ploskve.

ZAHVALA

Članek je nastal na podlagi rezultatov projekta Vzpostavlanje evropskega prostorskega referenčnega sistema v Sloveniji. Projekt je bil podprt z donacijo Norveške prek Norveškega

finančnega mehanizma – sporazum o dodelitvi nepovratnih sredstev SI0004-SGN-00085-E-V3-NFM.

Literatura in viri:

Berk, S., Bajec, K., Triglav Čekada, M., Fajdiga, D., Mesner, N., Arh, I., Žagar, T., Janežič, M., Fabiani, N., Radovan, D., Stopar, B., Koler, B., Kuhar, M., Sterle, O., Pavlovčič Prešeren, P., Ambrožič, T., Kogoj, D., Savšek, S. (2009). Razvoj DGS 2009. Prehod na nov koordinatni sistem. Končno poročilo projekta. Geodetski inštitut Slovenije, Ljubljana.

Koler, B., Vardjan, N. (2001). Preračun nivelmanske mreže Republike Slovenije. V: F. Vodopivec (ur.). Raziskave s področja geodezije in geofizike 2001. Zbornik predavanj. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana. 5–16.

Omang, O. C. D. (2000). The challenge of precise geoid determination – applied to Norwegian extremities: glaciers, fjords and mountains. Doktorska disertacija. Institutt for kartfag, Norges Landbrukskole, Scientific report, št. 4, Ås, Norveška.

Oven, K., Berk, S., Bajec, K., Pegan Žvokelj, D., Klanjšček, M., Demšar, J., Vrabič, R., Droščak, B., Zore, M., Fabiani, N., Janežič, M., Radovan, D., Stopar, B., Koler, B., Kuhar, M., Sterle, O., Pavlovčič Prešeren, P., Ambrožič, T., Kogoj, D., Savšek, S. (2010). Razvoj DGS 2010. Prehod na nov koordinatni sistem. Končno poročilo projekta, Geodetski inštitut Slovenije, Ljubljana.

Pribičević, B. (2000). Uporaba geološko-geofizičnih in geodetskih baz podatkov za računanje ploskve geoida Republike Slovenije. Doktorska disertacija. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana.

Solheim, D. (2000). New height reference surfaces for Norway. V: J. A. Torres in H. Hornik (ur.). Report on the Symposium of the IAG Subcommission for Europe (EUREF), Tromsø, 22.–24. junij 2000. Veröffentlichungen der Bayerischen Kommission für die Internationale Erdmessung, Astronomisch-Geodätische Arbeiten, zv. 61. Bayerische Akademie der Wissenschaften, München. 154–158.

Prispelo v objavo: 3. maj 2011

Sprejeto: 24. maj 2011

doc. dr. Miran Kuhar, univ. dipl. inž. geod.

UL FGG, Oddelek za geodezijo, Jamova 2, Ljubljana
e-pošta: miran.kuhar@fgg.uni-lj.si

Sandi Berk, univ. dipl. inž. geod.

Geodetski inštitut Slovenije, Jamova 2, Ljubljana
e-pošta: sandi.berk@gis.si

doc. dr. Božo Koler, univ. dipl. inž. geod.

UL FGG, Oddelek za geodezijo, Jamova 2, Ljubljana
e-pošta: božo.koler@fgg.uni-lj.si

mag. Klemen Medved, univ. dipl. inž. geod.

Geodetska uprava RS, Zemljemerska 12, Ljubljana
e-pošta: klemen.medved@gov.si

dr. Ove Christian Dahl Omang

Statens kartverk, Kartverksveien 21, NO-3507 Hønefoss, Norveška
e-pošta: ove.omang@statkart.no

Dag Solheim, cand.real.

Statens kartverk, Kartverksveien 21, NO-3507 Hønefoss, Norveška
e-pošta: dag.solheim@statkart.no