

EVROPSKI IN GLOBALNI MODEL GEOIDA NA OBMOČJU SLOVENIJE

dr. Miran Kuhar *
Peter Prešeren **

Izveček

V članku sta predstavljena modela geoida EGM96 in EGG97 ter ujemanje modelnih in z opazovanji posredno pridobljenih geoidnih višin v Sloveniji. Primerjava modelov geoida na lokalnem in globalnem nivoju je potekala z namenom predstaviti priporočeno uporabnost le-teh v postopku GPS višinomerstva. Čeprav natančnost določitve geoidnih višin iz globalnega geopotencialnega modela v pogledu natančnosti večinoma ne zadovoljuje zahtev geodezije, ima model pomembno izhodiščno vlogo pri določitvi dolgovalovnega vpliva zemeljskih mas na lokalni potek ploskve geoida.

KLJUČNE BESEDE:
EGM96, EGG97,
geoid, globalni
geopotencialni model,
GPS višinomerstvo,
model geoida

Abstract

Article deals with geoid models EGM96 and EGG97. Model geoid undulations are verified by means of given geoid undulations that were computed from measured orthometric and ellipsoidal heights. The possibilities for GPS heighting by means of these two models on the area of Slovenia are considered. Though geoid undulations calculations accuracy from global geopotential model is not sufficient enough for geodetic purposes, it has important role in local geoid models determination, especially in their long wavelength component.

KEY WORDS:
EGM96, EGG97,
geoid, global
geopotential model,
GPS heighting, geoid
model

177

1. UVOD

V zadnjem času je opazna vse večja potreba po znanju o težnostnem polju Zemlje in s tem o geoidu, ki je ena od nivojskih ploskev težnostnega polja. V geodeziji je eden najpomembnejših razlogov za to uvedba satelitskih merskih tehnik v geodetsko prakso.

Danes je GPS (Global Positioning System) najbolj razširjena metoda satelitskega določanja položajev točk na Zemlji. Omogoča hitro in natančno določitev geocentričnih koordinat, ki se nanašajo na referenčni elipsoid. Vertikalna komponenta položaja je podana z elipsoidno višino h in v vsakdanjem življenju ni preveč uporabna, saj je neodvisna od težnostnega

* Univerza v Ljubljani, FGG - Oddelek za geodezijo, Ljubljana

** Geodetska uprava RS, Območna geodetska uprava Novo mesto

polja Zemlje. V praksi največkrat uporabljamo ortometrične višine H , ki so definirane kot višine nad geoidom. Za določanje ortometričnih višin z GPS-om moramo poznati geoidno višino N , ki povezuje oba višinska sistema z enačbo:

$$H = h - N \quad (1)$$

Z uporabo te enačbe lahko izkoristimo vse prednosti GPS-a pred klasičnimi metodami tudi pri določitvi ortometrične višine. Za takšno določanje ortometričnih višin se je uveljavil tudi izraz 'GPS višinomerstvo'. Težava je v tem, da ploskve geoida, oziroma geoidne višine posamezne točke ne poznamo dovolj natančno. Ploskev geoida je za praktično uporabo podana v obliki matematičnega modela, ki omogoča interpolacijo geoidnih višin, če imamo podane horizontalne koordinate točk.

Na nekaterih območjih Zemlje so edini dostopni modeli geoida globalni geopotencialni modeli, ki so podani v obliki vrste sfernih funkcij. Najnovejši (kot na primer EGM96) dosegajo stopnjo in red 360, kar pomeni prostorsko ločljivost pol ločne stopinje oziroma 55 kilometrov, zato ne morejo nuditi natančnosti boljše od metra v absolutnem in nekaj decimetrov v relativnem smislu (Higgins, 2000).

Če potrebujemo model geoida večje natančnosti, moramo določiti lokalni model geoida. Pri tem lahko uporabimo tudi globalni geopotencialni model, ki nam pri tem predstavlja dolgovalovni vpliv zemeljskih mas na potek geoidne ploskve. Primer takšnega geoida je EGG97, ki je določen za območje Evrope, lahko pa določimo tudi model geoida za manjše območje, pri čemer lahko dosežemo večjo natančnost geoidnih višin.

2. EGM96

Globalni geopotencialni model EGM96 je bil določen v okviru skupnega projekta treh ustanov: NASA (National Aeronautics and Space Administration), NIMA (National Imagery and Mapping Agency) in Državne univerze Ohio (OSU - Ohio State University). Skupaj s programi za njegovo uporabo je brezplačno dostopen na svetovnem spletu (NIMA, 1997).

Model je podan v obliki vrste sfernih funkcij gravitacijskega potenciala in je razvit do stopnje in reda $n=m=360$. Geoidna višina v modelu EGM96 je tako podana z enačbama (NIMA, 1997):

$$\zeta(\varphi, \lambda, r) = \frac{GM}{\gamma(\varphi, r)} \left[\sum_{j=1}^n \left(\frac{a}{r} \right)^j \sum_{m=0}^j (\bar{C}_{jm} \cos m\lambda + \bar{S}_{jm} \sin m\lambda) \bar{P}_{jm}(\sin \varphi) \right] \quad (2)$$

$$N(\varphi, \lambda) = N_e + \frac{\Delta g_B(\varphi, \lambda)}{\bar{\gamma}} \quad (3)$$

kjer je:

$N(\varphi, \lambda)$	----	geoidna višina
$\zeta(\varphi, \lambda, r)$	----	anomalija višine (kvazigeoidna višina)
GM	----	gravitacijska konstanta Zemlje
r	----	razdalja od težišča Zemlje do točke P
a	----	velika polos elipsoida WGS84
n, m	----	stopnja in red razvoja sfernih funkcij
φ, λ	----	geocentrična geodetska širina in dolžina
$\bar{C}_{jm}, \bar{S}_{jm}$	----	normirani koeficienti razvoja gravitacijskega potenciala Zemlje v vrsto sfernih funkcij (gravitacijski koeficienti)
\bar{P}_{jm}	----	normirana prirejena Legendrova funkcija
N_e	----	ničelni člen
$\Delta g_B(\varphi, \lambda)$	----	Bouguerova anomalija težnosti
$\bar{\gamma}$	----	povprečna vrednost normalnega težnega pospeška
$H(\varphi, \lambda)$	----	nadmorska višina

Geoidno višino v točki na površju Zemlje lahko izračunamo, če poznamo njene koordinate (φ, λ) in vrednosti normiranih gravitacijskih koeficientov ($\bar{C}_{jm}, \bar{S}_{jm}$). Ploskev geoida je tako podana z vrednostmi normiranih gravitacijskih koeficientov. Izračun geoidne višine s pomočjo zgornje enačbe je precej kompliciran, zato je v praksi geoid podan v obliki geoidnih višin v gridni mreži, geoidno višino v posamezni točki pa računamo z interpolacijo.

Podatke, ki so bili uporabljeni za določitev EGM96, lahko razdelimo na podatke o težnostnem pospešku na kopnem (sem lahko štejemo tudi več kot 400 gravimetričnih točk v Sloveniji), na morjih ter satelitske podatke. Pri tem gre za sledenje tirov več kot 30 satelitov z različnimi tehnikami, kot so SLR (Satellite Laser Ranging), TDRSS (Tracking and Data Relay Satellite System), GPS (Global Positioning System) in Transit/Doppler ter tudi za opazovanja med sateliti (ang.: satellite-to-satellite tracking). Na morjih je model določen na osnovi opazovanj satelitske altimetrije (NIMA, 1997).

Za določitev geoida na osnovi gravimetričnih podatkov (anomalije težnosti) je potrebno le-te reducirati na površino geoida. V ta namen moramo upoštevati predpostavke o gostoti mas med geoidom in površino Zemlje, ki pa jih natančno ne poznamo. Zato so anomalije težnosti uporabljene v obliki, v kakršni so določene na površini Zemlje. Na ta način določimo ploskev kvazigeoida, kjer nam ni potrebno uvajati nikakršnih predpostavk o Zemljini notranjosti.

Za model EGM96 so iz gravitacijskih koeficientov najprej po enačbi (2) določene anomalije višine ζ (kvazigeoidne višine), iz teh pa so izračunane geoidne višine po enačbi (3).

Elipsoid, nad katerim podajamo geoidne višine, imenujemo referenčni elipsoid. V primeru EGM96 je to rotacijski geocentrični elipsoid WGS84. To dejstvo je pomembno predvsem zaradi tega, ker so koordinate, ki jih dobimo z GPS opazovanji, podane v koordinatnem sistemu, ki se nanaša na elipsoid WGS84.

3. EGG97

Evropski gravimetrični geoid EGG97 je bil izdelan na Inštitutu za geodezijo (IfE, Institut für Erdmessung) Univerze v Hannoveru. Podan je z geoidnimi višinami v gridni mreži $1' \times 1,5'$, pri čemer je referenčna ploskev geoidnih višin elipsoid GRS80, ki se zanemarljivo malo razlikuje od elipsoida WGS84. Določen je bil na podlagi 2,7 milijona gravimetričnih točk - vključenih je tudi približno 3000 gravimetričnih točk iz Slovenije - in satelitske altimetrije. Pri izračunu so bili uporabljeni tudi podatki o reliefu (DMR) in globalni geopotencialni model EGM96 (Torge et al., 1997).

EGG97 je primarno določen kot kvazigeoid, anomalije višine z lahko enostavno pretvorimo v geoidne višine N z vpeljavo modela gostote mas v notranjosti Zemlje (Heiskanen, Moritz, 1996):

$$N = \zeta + \frac{\bar{g} - \bar{\gamma}}{\bar{\gamma}} H, \quad (4)$$

kjer je:

\bar{g}	----	srednja vrednost težnega pospeška
$\bar{\gamma}$	----	srednja vrednost normalnega težnega pospeška
H	----	ortometrična višina

4. ANALIZE

Preveriti smo želeli, kako se opisana modela ujemata z dejanskim potekom geoidne ploskve na območju Slovenije. Ker geoidnih višin ni mogoče meriti neposredno, smo uporabili enačbo (1) in jih izračunali kot razliko elipsoidnih in ortometričnih višin. Uporabili smo točke, katerim so bile z metodo GPS določene geocentrične elipsoidne koordinate (na elipsoidu WGS84), ortometrične višine pa so bile določene z geometričnim nivelmanom oziroma trigonometričnim višinomerstvom. Na istih točkah smo z interpolacijo določili iz obeh modelov tudi geoidne višine.

Ker se EGM96 in EGG97 ne nanašata na uradni višinski sistem v Sloveniji, smo interpolirane geoidne višine transformirali. Transformacija je bila narejena z vertikalnim premikom in nagibom geoidne ploskve, pri čemer so bili parametri premikov določeni s primerjavo merjenih in interpoliranih vrednosti geoidnih višin (Prešeren, 1999).

Če primerjamo podatke s celotnega območja Slovenije, lahko ugotovimo, da je vertikalno odstopanje državnega višinskega datuma in datumov modelov negativno in znaša -41,3 cm za model EGM96 in -25,5 cm za model EGG97. Z nagibom geoidne ploskve nekoliko izboljšamo ujemanje modelov z merjenimi podatki. EGG97 se bolje ujema z merjenimi podatki, iz analiz lahko sklepamo, da je natančnost iz tega modela interpoliranih geoidnih višin, če model transformiramo z vertikalnim premikom in nagibom geoidne ploskve, manj kot decimeter (tabela 1). Za primerjavo podatkov s celotnega območja Slovenije smo uporabili 41 točk z 'merjeno' geoidno višino (znano ortometrično in elipsoidno višino).

	EGM96		EGG97	
	VP	VP+H	VP	VP+H
St. odstopanja	0,261 m	0,236 m	0,090 m	0,071 m
RMS	0,278 m	0,233 m	0,079 m	0,070 m
Največje odstopanje	0,583 m	0,490 m	0,171 m	0,188 m
Parametri premika:				
VP	-0,413 m		-0,255 m	
X ₀	-5,207 m		-4,286 m	
Y ₀	-3,654 m		-5,014 m	
Z ₀	7,795 m		5,357 m	
Karakteristične vrednosti:				
skrajni nagib	1,8° S (0,375°)		1,12° (0,244°)	
vertikalni skrajni nagib	1,851 (0,352°)		0,579 (0,115°)	
krajni nagib	0,536°, α=154,30°±2'		0,271°, α=153,37°±6'	

Tabela 1: Odstopanja modelov geoida in merjenih vrednosti geoidnih višin na območju Slovenije

Tabela 2: Odstopanja modelov geoida in merjenih vrednosti geoidnih višin na območju Sežane

	EGM96		EGG97	
	VP	VP+H	VP	VP+H
Standardna deviacija	0,018 m	0,018 m	0,023 m	0,013 m
RMS	0,018 m	0,018 m	0,023 m	0,013 m
Vredn. odstopanja	0,042 m	0,037 m	0,053 m	0,027 m
Parametri premika:				
VP	-0,671 m		-0,405 m	
X _s	-5,020 m		-12,72 m	
Y _s	-7,674 m		-39,568 m	
Z _s	6,477 m		15,610 m	
Karakteristike ploskve v smeri vseh 1000 km:				
skrajni nagib	1,525 (0,323°)		4,221 (0,877°)	
vhodni kot	0,546 (0,135°)		4,244 (0,875°)	
karakter. nagib	0,377°, α = 42°36'52"		1,233°, α = 35°36'32"	

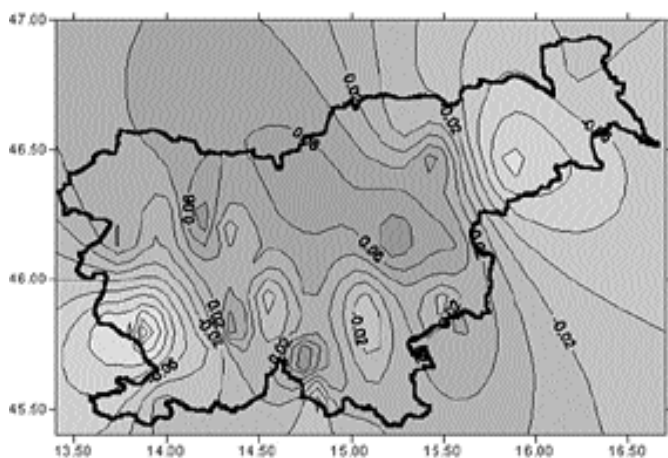
Oznake v tabelah:

- VP ---- vertikalni premik
 N ---- nagib geoidne ploskve
 RMS ---- srednje kvadratno odstopanje (Root Mean Square)

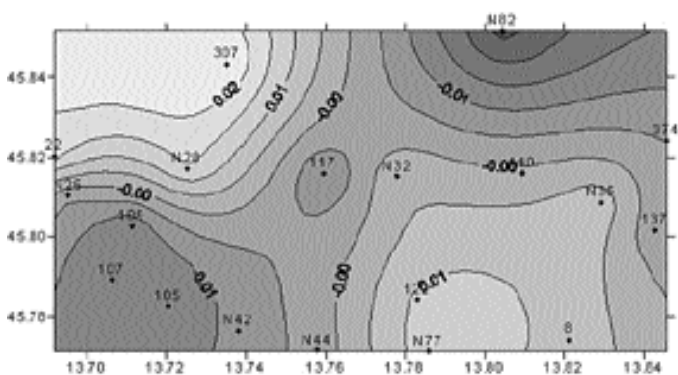
Ker geoidna ploskev ni močno razgibana, je mogoče na manjšem območju le-to predstaviti z modelom, ki manj odstopa od merjenih geoidnih višin - standardna deviacija odstopanj je manjša (Kuhar, 1996). Za primer smo vzeli območje velikosti 12x9 km, kjer smo uporabili 19 točk z 'merjenimi' geoidnimi višinami. Geoidno ploskev smo najprej določili kot regresijsko ravnino, izračunano z izravnavo merjenih geoidnih višin, nato pa smo oba modela geoida transformirali z vertikalnim premikom in nagibom tako, da sta se na danem območju najbolje prilegala merjenim geoidnim višinam. V primeru regresijske ravnine dobimo standardno deviacijo 1,8 cm, torej enako kot v primeru modela EGM96. Tak rezultat je tudi pričakovan, saj je območje manjše kakor gridna celica modela. V primeru modela geoida EGG97 pa je standardna deviacija manjša od 1,3 cm, kar kaže na to, da ta model bolje ponazarja potek geoida kakor regresijska ravnina, v idealnem primeru lahko govorimo celo o centimetrski natančnosti.

5. ZAKLJUČEK

GPS se je izkazal kot natančen in ekonomičen način določanja položaja točk na Zemlji, vendar pa je neodvisen od težnostnega polja Zemlje. Pri določanju horizontalnih položajev to ne predstavlja večjega problema, povsem drugače pa je pri višinah.



Slika 1: Grafični prikaz odstopanj modela geoida EGG97 in merjenih vrednosti geoidnih višin



Slika 2: Grafični prikaz odstopanj modela geoida EGG97 in merjenih vrednosti geoidnih višin na območju Sežane

Če želimo z GPS-om določiti ortometrično višino točke, moramo poznati njeno geoidno višino, oziroma potek geoidne ploskve (glede na elipsoid) v okolici te točke. Opisana modela sta pokazala nekaj svojih dobrih in slabih lastnosti. EGM96 pokriva celotno Zemljo in je brezplačen, vendar pa ponazarja potek geoidne ploskve le v grobem - t.i. dolgovalovni vpliv Zemljinih mas na potek geoidne ploskve. Zato se ga uporablja predvsem pri izračunu lokalnih in regionalnih modelov geoida. EGG97 se bolj prilega dejanskemu poteku geoidne ploskve, v našem primeru je bila standardna deviacija odstopanj merjenih in modelnih geoidnih višin manjša od decimetra.

Takšna natančnost v geodeziji gotovo ne zadošča, zato je potrebno določiti tudi natančnejši model geoida, ki pokriva območje države. V primeru Slovenije je bil model geoida določen na zagrebški Geodetski fakulteti leta

1993, končan pa je tudi že novi preračun tega geoida. Prvi rezultati (ocenjeni pogoški iz kolokacije) so zelo obetavni. Za lažjo uporabo bi potrebovali predvsem uporabniku prijaznejšo programsko opremo za interpolacijo geoidnih višin, ki bi gotovo spodbudila širšo uporabo GPS-a tudi pri določanju ortometričnih višin.

Literatura:

Heiskanen W., Moritz H., *Physical geodesy*, TU Graz (ponatis), 1996

Higgins, M.B., *Heighting With GPS*, GIM International, 2000

Kuhar, M., *Raziskave ploskve geoida v Sloveniji*, Doktorska disertacija, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, 1996

National Imagery and Mapping Agency (NIMA), Department of Defense World Geodetic System 1984, *Its Definition and Relationships With Local Geodetic Systems*, NIMA TR8350.2, tretja izdaja, ZDA, 1997

Prešeren, P., *Uporaba globalnih in regionalnih modelov geoida na območju Slovenije*, Diplomaska naloga, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, 1999

Torge, W., Denker, H., *The European Geoid, Development Over More Than 100 Years and Present Status*, Institut für Erdmessung, University of Hannover, Hannover, Nemčija. 1997

Recenzija: Dr. Dušan Kogoj

Mag. Damjan Kvas

Prispelo v objavo: 2000-07-13