

Martina Idžanović, univ. bacc. ing. geod. et geoinf.
 Ivana Krešić, univ. bacc. ing. geod. et geoinf.
 Sara Baraba, univ. bacc. ing. geod. et geoinf.
 Tamara Juretić, univ. bacc. ing. geod. et geoinf.
 Luka Rumora, univ. bacc. ing. geod. et geoinf.
 Matija Videković, univ. bacc. ing. geod. et geoinf.
 Mario Švarc, univ. bacc. ing. geod. et geoinf.
 Igor Matišić, univ. bacc. ing. geod. et geoinf.

► diplomski studij, Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, e-mail: maidzanovic@geof.hr
 ► diplomski studij, Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, e-mail: ikresic@geof.hr
 ► diplomski studij, Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, e-mail: sabaraba@geof.hr
 ► diplomski studij, Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, e-mail: tajuretic@geof.hr
 ► diplomski studij, Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, e-mail: lurumora@geof.hr
 ► diplomski studij, Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, e-mail: mavidekovic@geof.hr
 ► diplomski studij, Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, e-mail: masvarc@geof.hr
 ► diplomski studij, Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, e-mail: imatistic@geof.hr

Globalni geopotencijalni modeli od 2006. do 2014. godine

SAŽETAK: Globalni geopotencijalni modeli visoke rezolucije imaju ključnu ulogu u geodeziji i geoznanostima, od praktične upotrebe, poput preciznog određivanja orbita, do znanstvene primjene, poput istraživanja gustoće struktura Zemljine unutrašnjosti. Današnji globalni modeli gravitacijskog polja, dobiveni uglavnom satelitskim mjerenjima, postaju sve detaljniji i precizniji. Važan zadatak geodezije je osigurati dostupnost funkcionala gravitacijskog polja ostalim geoznanostima. Nužno je izračunati odgovarajuće funkcionalne što je moguće točnije iz danih globalnih modela te, ukoliko je potrebno, uzimanjem u obzir topografskih modela određenih modernim satelitskim metodama neovisno o gravitacijskom polju. Ovaj je rad nastao na temelju seminarskih radova iz kolegija "Određivanje oblika Zemlje" u akademskoj godini 2013./2014. (diplomski studij Geodetskog fakulteta, Zavod za geomatiku, Katedra za državnu izmjeru). Prikazane su usporedbe undulacija geoida i anomalija slobodnog zraka geopotencijalnih modela iz 2006., 2008., 2011., 2012., 2013. i 2014. godine.

KLJUČNE RIJEČI: globalni geopotencijalni modeli, undulacija geoida, anomalije slobodnog zraka

Global geopotential models from 2006 to 2014

ABSTRACT: High-resolution global gravity field models play a fundamental role in geodesy and Earth sciences, ranging from practical purposes, like precise orbit determination, to scientific applications, like investigation of the density structure of the Earth's interior. Nowadays, global gravity field models, mainly derived from satellite measurements, become more and more detailed and accurate. An important task of geodesy is to make the gravity field functionals available to other geosciences. It is necessary to calculate the corresponding functionals as accurately as possible from a given global gravity field models and, if required, with simultaneous consideration of the topography models determined by modern satellite methods independently from the gravity field. This paper is based on seminar papers which were made within the subject "Determination of the Earth's shape" in academic year 2013/2014 (Master Studies, Department of Geomatics at the Faculty of Geodesy, Chair for State Survey). Comparisons of geoid undulations and free air gravity anomalies between geopotential models of 2006, 2008, 2011, 2012, 2013 and 2014 are presented.

KEYWORDS: global geopotential models, geoid undulation, free air gravity anomaly

1. UVOD

Studij geodezije predstavlja studij oblika i polja ubrzanja Zemljine sile teže. Metode koje se pri tim istraživanjima koriste uključuju kako terestričke postupke (triangulacija, nivelman i gravimetrija) tako i metode koje se temelje na modernim tehnologijama, razvijenim za potrebe istraživanja svemira (mjerjenje udaljenosti do Zemljinih umjetnih satelita i moderne misije mjerenja ubrzanja sile teže) (Bašić i Markovinović, 2013). Normalno polje sile teže nekog nivoelipsoida se može definirati preko direktnih formula ako su poznate elipsoidne koordinate točke. No, vrlo je praktična i korisna upotreba razvoja u red po sfernim funkcijama u slučaju gravitacijskog potencijala (Bašić, 2012). Matematički je vrlo pogodno razviti vanjski potencijal u harmonijske funkcije jer su takve funkcije ujedno rješenja Laplaceove jednadžbe. Sferni harmonici su posebno pogodni za prikazivanje opažanja koja su učinjena na površini sfere ili na površini Zemlje (Bašić i Markovinović, 2013). Globalni geopotencijalni model, model kuglinih funkcija odnosno kuglinih harmonika nazivi su koji se upotrebljavaju za definiranje matematičkog modela što ga čine koeficijenti razvoja potencijala Zemljina polja ubrzanja sile teže u red po sfernim funkcijama. Uz pomoć globalnoga geopotencijalnog modela mogu

se izračunati vrijednosti svih fizikalnih parametara pa tako i globalnoga geoida za svaku točku na Zemlji u odnosu na referentni elipsoid. S većim redom i stupnjem razvoja koeficijenata kuglinih funkcija trebala bi se dobiti i veća točnost globalnog modela geoida. Međutim, maksimalan red i stupanj razvoja globalnoga geopotencijalnog modela ovisi o gustoći i spektralnoj razlučivosti korištenih podataka za njegovo računanje (Hećimović i Bašić, 2003).

2. INTERNATIONAL CENTRE FOR GLOBAL EARTH MODELS (ICGEM)

ICGEM je jedan od šest centara IGFS-a (International Gravity Field Service) koji pripada IAG-u (International Association of Geodesy). IGFS je osnovao izvršni odbor IAG-a na generalnoj skupštini 2003. godine i predstavlja „level-2“ servis IAG komisije 2 (URL-1). Usluge, odnosno servisi koje ICGEM pruža su prikupljanje i pohranjivanje svih globalnih modela ubrzanja sile teže, interaktivna vizualizacija funkcionala pojedinih modela i razlika modela, interaktivna vizualizacija vremenskih varijacija (mjesečna rješenja globalnih modela), izračunavanje funkcionala proi-

zvoljnih mreža i davanje na raspolaganje gridova i grafičkih podataka, procjena modela (Barthelmes i Köhler, 2010).

ICGEM Calculation Service se koristi za izračun odabranog funkcionala polja sile teže za set točaka grida na referentnom elipsoidu. Izrađen gridfile obično je dostupan nakon nekoliko sekundi ili nekoliko minuta, ovisno o funkcionalu, maksimalnom stupnju razvoja i broju grid točaka. Prije preuzimanja gotovog gridfilea potrebno je postaviti određene parametre kako bi dobili željeni finalni proizvodi. Riječ je o referentnom elipsoidu, modelu, funkcionalu, promatranom području i drugo.

U konkretnom slučaju korišten je GRS80 kao referentni elipsoid s vrijednošću velike poluosi, a , 6378137 m, recipročnom vrijednošću spljoštenosti elipsoida, $1/f$, 298,257222101, geocentričkom gravitacijskom konstantom, GM , $0,3986005 \times 10^{15} \text{ m}^3/\text{s}^2$ i kutnom brzinom rotacije, ω , $7,292115 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$. Zatim je potrebno odabrati vrstu modela – dugoperiodična ili mjesečna rješenja promatranog modela, sam model te željeni funkcional poremećajnog potencijala. Budući da je zadana rezolucija rastera $5' \times 5'$, gridstep iznosi 0,08333. Područje obuhvata je od 36° do 52° po geodetskoj širini, φ i od 5° do 27° po geodetskoj dužini, λ .

3. FUNKCIONALNI ZEMLJINOG GRAVITACIJSKOG POLJA

Od funkcionala dostupnih na ICGEM kalkulačkom servisu ovdje su korištene undulacije geoida i anomalije slobodnog zraka. Slijede vrlo sažeta teorijska objašnjenja korištenih funkcionala te formule koje omogućuju njihov izračun pod pretpostavkom da su poznati Zemljin gravitacijski potencijal izvan područja masa i normalni potencijal izvan elipsoida te da su također dostupni njihovi matematički prikazi. Vremenske varijacije su izuzete te je riječ samo o stacionarnom dijelu potencijala.

3.1. UNDULACIJA GEOIDA

Potencijal se može opisati pomoću ekvipotencijalnih ploha. Prema teoriji harmonijskih funkcija, poznavanje jedne ekvipotencijalne plohe je dovoljno za definiranje cjelokupne harmonijske funkcije u vanjskom području. Među svim ekvipotencijalnim ploham jedna je od posebnog značaja. Riječ je o geoidu koji koincidira s mirnom površinom mora (to jest s morem u statičkoj ravnoteži) i proteže se ispod kontinentata. Geoid je ploha koja je u svakoj svojoj točki okomita na gravitacijski vektor, ali nije jednaka po intenzitetu.

Da bi se izračunala geoidna undulacija potrebno je poznavati potencijale W i U ili poremećajni potencijal $T=W-U$ te prikaz topografije $H(\lambda, \varphi)$. Obično su topografski modeli dani kao grid na referentnom elipsoidu i mnogo su veće rezolucije nego recentni globalni modeli gravitacijskog polja. Geoid je aproksimiran zbrojem anomalije visina i korekcijskog izraza ovisnog o topografiji. Izraz pomoću kojega se računa je sljedeći (Barthelmes, 2013):

$$\tilde{N}_2^s(\lambda, \varphi) = \frac{GM}{r\gamma(r_e, \varphi)} \sum_{l=0}^{l_{\max}} \left(\frac{R}{r}\right)^l \sum_{m=0}^l P_{lm}(\sin \varphi) (C_{lm}^T \cos m\lambda + S_{lm}^T \sin m\lambda) - \frac{2\pi G \rho}{\gamma(r_e, \varphi)} \left[R \sum_{l=0}^{l_{\max}} \sum_{m=0}^l P_{lm}(\sin \varphi) (C_{lm}^{\text{topo}} \cos m\lambda + S_{lm}^{\text{topo}} \sin m\lambda) \right]^2 \quad (1)$$

gdje su oznake:

- λ, φ - sferne geocentričke koordinate promatrane točke (longituda, latituda)
- R - referentni radijus
- GM - umnožak gravitacijske konstante i mase Zemlje
- l, m - stupanj, red sfernih harmonika
- P_{lm} - potpuno normalizirane Legendrove funkcije
- C_{lm}^T, S_{lm}^T - Stokesovi koeficijenti poremećajnog potencijala

$C_{lm}^{\text{topo}}, S_{lm}^{\text{topo}}$ - Stokesovi koeficijenti topografskog modela

ρ - gustoća masa

γ - normalna vrijednost ubrzanja sile teže

r_e - radijus vektor točke na elipsoidu

r_i - radijus vektor točke na kvazigeoidu.

3.2. ANOMALIJA SLOBODNOG ZRAKA

Klasična gravitacijska anomalija ili anomalija slobodnog zraka definirana je kao razlika intenziteta gradijenta potencijala dobivenog kontinuiranom prema dolje na geoid $|\nabla W^c|$ i intenziteta gradijenta normalnog potencijala na elipsoidu $|\nabla U|$. Može se izraziti pomoću (ibid):

$$\Delta g_{cl}(\lambda, \phi) = |\nabla W^c(N, \lambda, \phi)| - |\nabla U(0, \phi)| \quad (2)$$

Izvor ove definicije je (povijesna) geodetska praksa gdje je visina gravitacijskog mjerenja bila poznata jedino u odnosu na geoid putem niveliranja, a ne u odnosu na elipsoid. Undulacija geoida N je bila nepoznata i nekako se morala odrediti samo iz tih mjerenja. Klasična formulacija ovog problema je Stokesov integral. U tu je svrhu mjerena vrijednost $|\nabla W^c(h, \lambda, \phi)|$ nekako morala biti reducirana prema dolje na geoid. Iz tog je razloga definirana klasična gravitacijska anomalija. U praksi, takozvana „redukcija slobodnog zraka“ je korištena ili se koristi za približno dobivanje $|\nabla W^c(N, \lambda, \phi)|$. Prema tome, klasična gravitacijska anomalija ovisi samo o longitudi i latitudi (ibid).

4. KORIŠTENI GLOBALNI GEOPOTENCIJALNI MODELI

Na službenoj internetskoj stranici ICGEM-a dostupni su globalni geopotencijalni modeli od 1966. do 2014. godine. Ukupan broj obrađenih i analiziranih modela u ovom radu je šest (Tablica 4.1.). Podaci na temelju kojih su dobiveni modeli su podaci satelitskih misija te gravimetrijski i altimetrijski podaci. Stupanj i red razvoja pojedinih modela kreću se od 360 do 1949. U nastavku je dan kratki pregled tih modela.

Tablica 4.1. Prikaz korištenih globalnih geopotencijalnih modela od 2014. do 2006. godine

Model	Godina	Stupanj i red razvoja	Podaci	Institucija
EIGEN-6C3stat	2014	1949	S(Goce, Grace, Lageos), G, A	GeoForschungsZentrum Potsdam, Groupe de Recherche de GéodésieSpatiale
GO_CONS_GCF_2_DIR_R4	2013	260	S(Goce, Grace, Lageos)	European Space Agency
EIGEN-6C2	2012	1949	S(Goce, Grace, Lageos), G, A	Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Groupe de Recherche de GéodésieSpatiale
EIGEN-6C	2011	1420	S(Goce, Grace, Lageos), G, A	GeoForschungsZentrum Potsdam, Groupe de Recherche de GéodésieSpatiale
EGM2008	2008	2190	S(Grace), G, A	National Geospatial-Intelligence Agency NGA
EIGEN-GL04C	2006	360	S(Grace, Lageos), G, A	GeoForschungsZentrum Potsdam

4.1. GEOPOTENCIJALNI MODEL EIGEN-6C3STAT

EIGEN-6C3stat je prethodna statična verzija modela EIGEN-6C4, koji će biti sljedeći vremenski varijabilan kombinirani globalni model ubrzanja sile teže stupnja i reda 1949 objavljen od strane GFZ-a i GRGS-a. EIGEN-6C3stat izveden je iz kombinacije LAGEOS, GRACE, GOCE i DTU12 terestričkih podataka. Za valne duljine veće od stupnja/reda 235, EIGEN-6C3stat predstavlja rekonstrukciju modela EGM2008 za kontinentalna područja. Nadolazeći model EIGEN-6C4

sadržavat će vremenski promjenjive parametre za sve sferne harmonike veće od stupnja 50 (drift parametre, godišnja i polugodišnja rješenja). Model EIGEN-6C3stat odabran je kao referentni model za novi kanadski gravimetrijski datum (Canadian Gravimetric Geoid CGG2013) (URL-4).

4.2. GEOPOTENCIJALNI MODEL GO_CONS_GCF_2_DIR_R4

Geopotencijalni model GO_CONS_GCF_2_DIR_R4 (DIR-R4) maksimalnog je stupnja i reda razvoja 260. Model je izračunat pri GFZ German Research Centre for Geosciences Potsdam, Section 1.2 ("Global Geomonitoring and Gravity Field") i Groupe de Recherche de Géoésie Spatiale (GRGS)/CNES, Toulouse. Model je izračunat iz podataka prikupljenih u periodu od 1. 11. 2009. do 1. 8. 2012., što je 837 dana, odnosno 13430 revolucija. Model je isključivo satelitski temeljen na potpunoj kombinaciji GOCE-SGG, GRACE i LAGEOS podataka što dovodi do izvrsnih performansi kako za duge tako i za kratke valne duljine (URL-2). Srednje kvadratno odstupanje (RMS) usporedbe visina kvazigeoida izvedenih iz modela i vrijednosti „GPS/geoid niveliranja“ za područje Europe (1235 točaka) iznosi 0,393 m (URL-3).

4.3. GEOPOTENCIJALNI MODEL EIGEN-6C2

EIGEN-6C2 razvijen je do stupnja i reda (n, m) 1949. Model je izveden kombinacijom GRACE (7 – 8 godina), LAGEOS 1/2 (25 godina), GOCE (350 dana) i terestričkih (dva različita seta podataka DTU10 produkata: DTU10 globalni set podataka anomalija ubrzanja sile teže i DTU10 podaci oceana) podataka. Kombinacija satelitskih i terestričkih podataka provedena je na temelju normalnih jednadžbi koje su ispunile regularnu matricu normalnih jednadžbi stupnja i reda 370 (URL-5).

4.4. GEOPOTENCIJALNI MODEL EIGEN-6C

EIGEN-6C je kombinirani model ubrzanja sile teže iz EIGEN-6S satelitskih podataka i DTU10 globalne mreže anomalija ubrzanja sile teže maksimalnog stupnja 1420. Na kopnenim područjima te za stupanj razvoja iznad 240 EIGEN-6C je u principu rekonstrukcija EGM2008 zbog uključenosti DTU10 podataka. Usporedba „GPS/geoid niveliranja“ ukazuje na poboljšanje modela EIGEN-6C u odnosu na prethodne EIGEN modele (URL-6). Rezultati za EIGEN-6C uspoređeni su s modelom EGM2008.

4.5. GEOPOTENCIJALNI MODEL EGM2008

EGM2008 je model sfernih harmonika Zemljina polja ubrzanja sile teže nastao na temelju kombinacije najmanjih kvadrata ITG-GRACE03S gravitacijskog modela i pridružene kovarijacijske matrice, s informacijama o ubrzanju sile teže dobivenih iz globalnog seta usrednjenih anomalija slobodnog zraka definiranih u 5-minutnim jednakokutnim gravitacijskim podacima. ITG-GRACE03S je baziran na podacima GRACE Satellite-to-Satellite Tracking (SST) prikupljenim u razdoblju od rujna 2002. do travnja 2007. ITG-GRACE03S je u potpunosti razvijen po sfernim harmonicima do reda i stupnja razvoja 180. U EGM2008 modelu sadržan je Dynamic Ocean Topography model (DOT2008A) koji je baziran na srednjoj razini mora DNSC08B i EGM2008 geoidu. DOR2008A je razvijen do reda i stupnja razvoja 180. Mreža je formirana kombiniranjem terestričkih, izvedenih altimetrijskih te avionskih i satelitskih gravitacijskih podataka. U području male rezolucije gravitacijskih podataka, podaci su nadopunjeni gravitacijskim informacijama dobivenim na temelju topografije. EGM2008 je kompletan do reda i stupnja 2159 te sadrži dodatne koeficijente do stupnja 2190 i reda 2159 (Pavlis i dr., 2012).

4.6. GEOPOTENCIJALNI MODEL EIGEN-GL04C

Kombinirani model ubrzanja sile teže EIGEN-GL04C je nadogradnja EIGEN-CG03C. Model predstavlja kombinaciju podataka GRACE

i LAGEOS misija i 0.5° × 0.5° grid mreže gravimetrijskih i altimetrijskih terestričkih podataka. Satelitske podatke analizirali su GFZ Potsdam i GRGS Toulouse. Standardne obrade poput duljine luka (GRACE: 1 dan, LAGEOS: 10 dana), modela gravitacijskog polja (EIGEN-CG03C), modela plimnih valova (FES2004) ili modela polnih plimnih valova (Desai, 2002) identični su s obje strane. Jedina razlika koja se odnosi na obradu satelitskih podataka je model oceana korišten za korekciju kratkoročnih varijacija masa (barotropic model MOG2D (GRGS), baroclinic model OMCT (GFZ)). Korišteni terestrički podaci identični su kao u modelu EIGEN-CG03C osim geoidnih undulacija preko oceana koje su dobivene iz novog GFZ modela srednje stacionarne površine mora (MSSH) minus ECCO model topografske površine mora (EIGEN – CG03C: CLS01 MSSH – ECCO). Kao i prethodni model, EIGEN-CG03C je kompletan do stupnja i reda 360 u odnosu koeficijente sfernih harmonika te razlučuje geoid i anomalije ubrzanja sile teže valnih duljina od 110 km. Korištena je posebna band limitirajuća kombinacijska metoda u svrhu održavanja visoke točnosti satelitskih podataka pri niskim frekvencijama geopotencijala, za stvaranje glatkog prijelaza prema visokofrekventnim terestričkim informacijama (URL-7).

5. OBRADA I ANALIZA GEOPOTENCIJALNIH MODELA

Od funkcionala dostupnih na ICGEM kalkulacijskom servisu korištene su undulacije geoida N te anomalije slobodnog zraka Δg_{cl} . Za svaki pojedini model određene su pripadne numeričke karakteristike statističkog skupa. Riječ je o maksimalnoj i minimalnoj vrijednosti svakoga funkcionala, njegovoj srednjoj vrijednosti odnosno aritmetičkoj sredini te standardnom odstupanju. Maksimalan stupanj i red razvoja globalnoga geopotencijalnog modela ovisi o gustoći i spektralnoj razlučivosti korištenih podataka. Samo na osnovu podataka o poremećajima u putanjama umjetnih Zemljinih satelita mogu se dobiti manje detaljni globalni geopotencijalni modeli, a dodatnim prikladnim korištenjem terestričkih podataka računaju se globalni geopotencijalni modeli s većim maksimalnim redom i stupnjem. Primjeni li se "pravilo palca", koje kaže da prostorna rezolucija modela odgovara 180°/N, gdje N označava maksimalni stupanj razvoja, tada modeli N = 70, pronađeni samo satelitskim putem, predstavljaju globalni signal Zemljina polja sile teže s valnom duljinom od dvjesto-pedesetak km, dok modeli N=360 sadrže u sebi detaljnije strukture valnih duljina od pedesetak km (Hećimović i Bašić, 2003).

5.1. GEOID

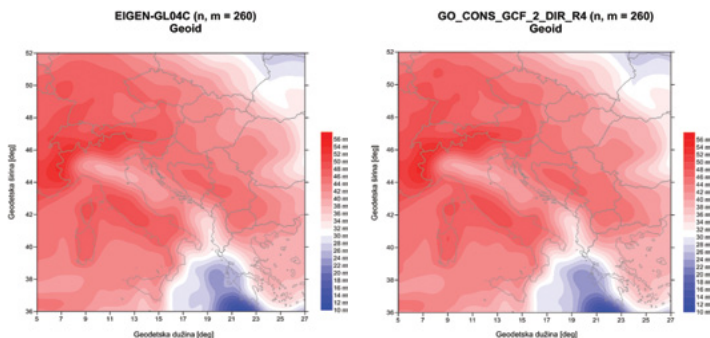
Prvi funkcional uzet u razmatranje je undulacija geoida N. U nastavku su prikazane statističke karakteristike i grafički prikazi modela. U tablici 5.1. dani su statistički pokazatelji geoidnih undulacija pojedinih modela. Srednja vrijednost undulacija geoida svih modela iznosi 41,435 m, a pripadno srednje standardno odstupanje je 6,375 m. Ploha geoida u korelaciji je s topografijom (primjer Alpa, Dinarida, Karpata).

Tablica 5.1. Statistički pokazatelji undulacija geoida [m] pojedinih modela

Geo potencijalni modeli	Minimum	Maksimum	Sredina	Standardno odstupanje
EIGEN-GL04C	10,806	54,101	41,437	6,370
GO_CONS_GCF_2_DIR_R4	10,836	54,189	41,437	6,368
EIGEN-6C2	10,871	54,655	41,434	6,379
EIGEN-6C3stat	10,847	54,677	41,434	6,378
EGM2008	10,882	54,537	41,436	6,377
EIGEN-6C	10,831	54,632	41,435	6,379

5.1.1 Usporedba modela EIGEN-GL04C i GO_CONS_GCF_2_DIR_R4

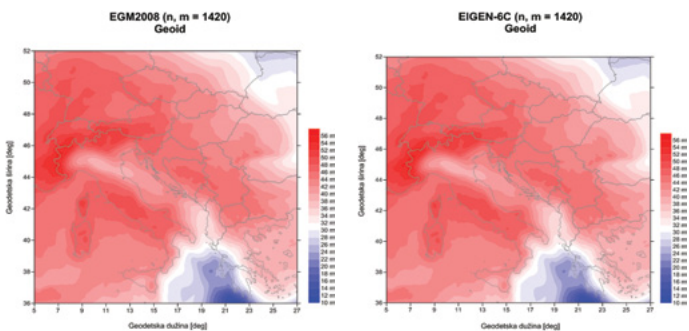
U provedenoj usporedbi modela EIGEN-GL04C i GO_CONS_GCF_2_DIR_R4 (Slika 5.1.), model EIGEN-GL04C ograničen je do stupnja i reda razvoja ($n, m = 360$) 260. Usporedba modela je realizirana razlikama parametara polja ubrzanja sile teže, odnosno razlikama geoidnih undulacija. Prosječna vrijednost razlika između geoida dobivenih pomoću spomenutih modela je neznatna. Ekstremne vrijednosti se pojavljuju na području Alpa (negativna razlika), u dolini rijeke Po (pozitivna razlika) te u južnim dijelovima Srbije (Slika 5.4.).



Slika 5.1. Geoidne undulacije modela EIGEN-GL04C i GO_CONS_GCF_2_DIR_R4

5.1.2 Usporedba modela EGM2008 i EIGEN-6C

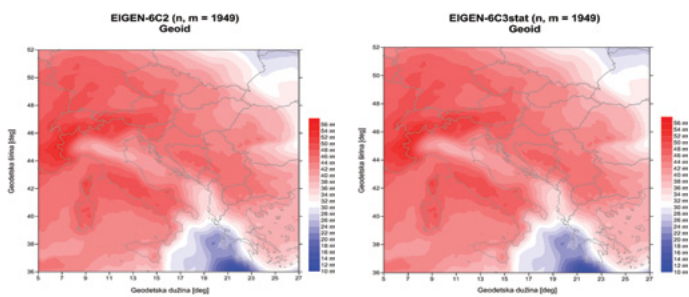
Ploha geoida za EGM2008 i EIGEN-6C (Slika 5.2.) razlikuje se na većini područja do reda veličine $\pm 0,05$ m, osim u područjima gdje se pojavljuju ekstremne vrijednosti (Slika 5.4.). Na otoku Korzici geoid za EGM2008 viši je od geoida za model EIGEN-6C. Njihova međusobna razlika na spomenutom području iznosi oko 0,30 m. Na području Jadranskog mora odnosno u blizini Crne Gore također se pojavljuju velike razlike. Na mjestu gdje je Jadransko more najdublje razlika geoida za EGM2008 i EIGEN-6C iznosi oko -0,15 m, što znači da je ovdje geoid dobiven za EGM2008 niži. U području rijeke Po razlike geoida su pozitivne i kreću se oko 0,12 m.



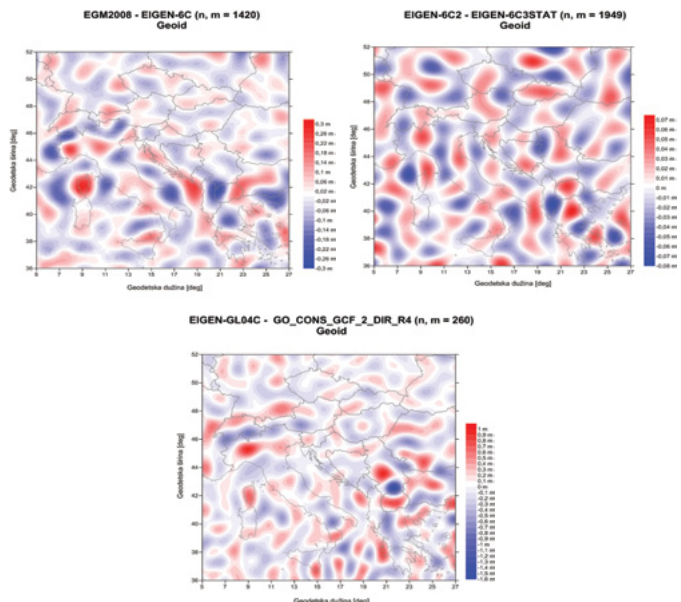
Slika 5.2. Geoidne undulacije modela EGM2008 i EIGEN-6C

5.1.3 Usporedba modela EIGEN-6C2 i EIGEN-6C3stat

Modeli EIGEN-6C2 i EIGEN-6C3stat su istoga stupnja i reda razvoja, odnosno 1949. Razlike geoida ovih modela su submetarskog iznosa. Na slici 5.3. vidljivo je kako su geoidi oba modela približno jednaki. Razlike geoida (Slika 5.4.) nisu u korelaciji s topografijom kao u prethodnim usporedbama te se ne ističu nikakva ekstremna područja.



Slika 5.3. Geoidne undulacije modela EIGEN-6C2 i EIGEN-6C3stat



Slika 5.4. Razlike undulacija geoida uspoređivanih modela EIGEN-GL04C, GO_CONS_GCF_2_DIR_R4, EGM2008, EIGEN-6C, EIGEN-6C2 i EIGEN-6C3stat

5.2. ANOMALIJE SLOBODNOG ZRAKA

Drugi funkcional poremećajnog potencijala uzet u razmatranje je anomalija slobodnog zraka Δg_{cl} . U nastavku su prikazane statističke karakteristike i grafički prikazi uspoređivanih modela. U tablici 5.2. dani su statistički pokazatelji anomalija slobodnog zraka pojedinih modela. Srednja vrijednost anomalija slobodnog zraka svih modela iznosi 17,880 mGal, a pripadno srednje standardno odstupanje je 41,175 mGal.

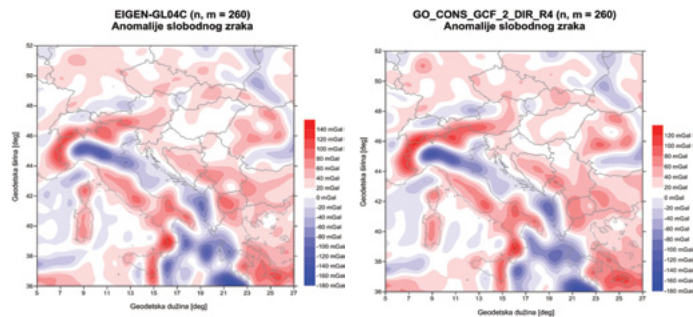
Značenje anomalija slobodnog zraka je u tome da se mjerna točka P pomiče na korespondentnu točku P_0 na nivoplohi. Istovremeno se sve mase između P i P_0 kondenziraju na nivoplohi pri čemu ukupne mase ispod P ostaju nepromijenjene. Anomalije slobodnog zraka daju informacije o ukupnoj raspodjeli masa ispod točke P (Bašić, 2013). Ukoliko je ona pozitivna postoji višak masa u odnosu na referentnu plohu Zemlje.

Tablica 5.2. Statistički pokazatelji anomalija slobodnog zraka [mGal] pojedinih modela

Geo potencijalni modeli	Minimum	Maksimum	Sredina	Standardno odstupanje
EIGEN-GL04C	-173,43	137,74	17,85	35,40
GO_CONS_GCF_2_DIR_R4	-173,82	124,46	17,85	35,65
EIGEN-6C2	-201,37	313,56	17,89	45,34
EIGEN-6C3stat	-201,39	313,40	17,89	45,33
EGM2008	-200,83	257,88	17,89	44,18
EIGEN-6C	-203,06	255,20	17,90	44,41

5.2.1 Usporedba modela EIGEN-GL04C i GO_CONS_GCF_2_DIR_R4

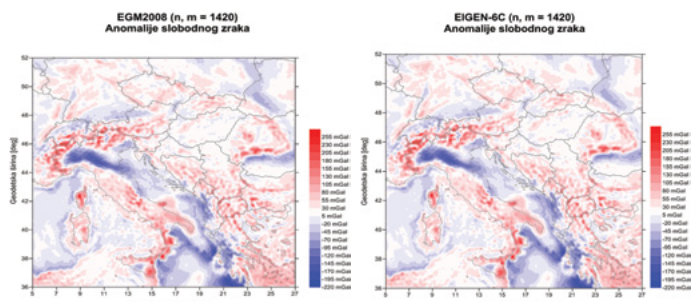
Na temelju rečenog, na slici 5.5. vidljiva je korelacija anomalija slobodnog zraka s topografijom. U planinskim područjima, odnosno alpskom i apeninskom području, moguće je uočiti pozitivne vrijednosti anomalija slobodnog zraka, dok se u području rijeke Po kao i u području Jadrana pojavljuju negativne vrijednosti. Razlike anomalija slobodnog zraka za modele EIGEN-GL04C i GO_CONS_GCF_2_DIR_R4 su signifikantnog iznosa. Maksimalna razlika između anomalija slobodnog zraka ovih modela iznosi -47,020 mGal, dok minimalna vrijednost razlika iznosi 25,878 mGal (Slika 5.8).



Slika 5.5. Anomalije slobodnog zraka modela EIGEN-GL04C i GO_CONS_GCF_2_DIR_R4

5.2.2 Usporedba modela EGM2008 i EIGEN-6C

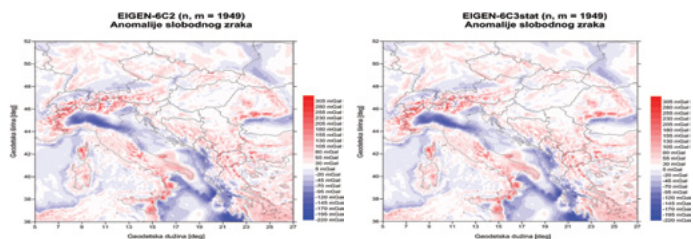
U svrhu ove usporedbe model EGM2008 (n, m = 1949) ograničen je na stupanj i red razvoja 1420. Izračunate anomalije slobodnog zraka za modele EGM2008 i EIGEN-6C prikazane su na slici 5.6. Razlike anomalija slobodnog zraka dobivenih pomoću modela EGM2008 i EIGEN-6C znatno su manje u odnosu na prethodni primjer.



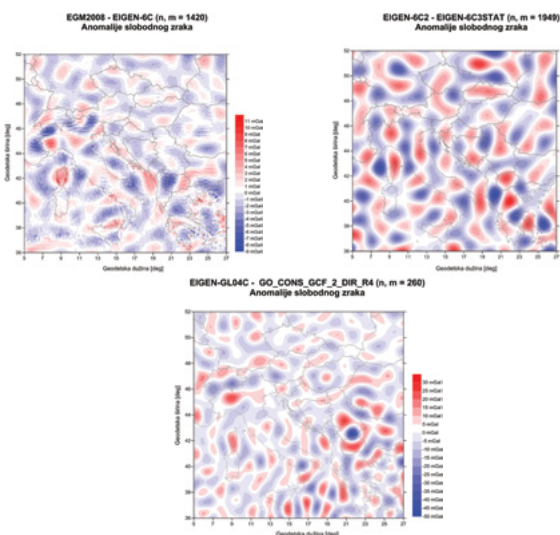
Slika 5.6. Anomalije slobodnog zraka modela EGM2008 i EIGEN-6C

5.2.3 Usporedba modela EIGEN-6C2 i EIGEN-6C3stat

Razlike anomalija slobodnog zraka dobivene za modele EIGEN-6C2 i EIGEN-6C3stat su ispod razine od 1 mGal (Slika 5.8). Minimalna vrijednost razlika iznosi 0,077 mGal, dok maksimalna vrijednost razlika iznosi 0,069 mGal. Korelacija anomalija slobodnog zraka i topografije i ovdje je prisutna i uočljiva je na slici 5.7.



Slika 5.7. Anomalije slobodnog zraka modela EIGEN-6C2 i EIGEN-6C3stat



Slika 5.8. Razlike anomalija visina uspoređivanih modela EIGEN-GL04C, GO_CONS_GCF_2_DIR_R4, EGM2008, EIGEN-6C, EIGEN-6C2 i EIGEN-6C3stat

6. ZAKLJUČAK

Ciljevi satelitskih misija CHAMP, GRACE i GOCE su proučavanje sustava Zemlje u geoznanstvenom smislu, kao i fizike atmosfere. Misije imaju međudisciplinarno znanstveno-stručno obilježje u kojem se isprepliću oceanografija, geodezija, geofizika, hidrologija, meteorologija i geologija kao glavna područja (Hećimović i Bašić, 2005). Gravitacijsko polje Zemlje dominantno je tematsko područje misija koje daju podatke koji omogućuju rješavanje problema modeliranja oblika Zemlje.

Na određenoj lokaciji na fizičkoj površini Zemlje razlika realnog potencijala i potencijala dobivenog razvojem u red po sfernim harmoncima ovisi o točnosti koeficijenata kao i o maksimalnom stupnju i redu razvoja. Točnost modela trebala bi rasti porastom reda i stupnja razvoja u redu po sfernim funkcijama.

Zadatak ovog rada bio je obrada i analiza podataka najznačajnijih geopotencijalnih modela objavljenih u razdoblju od 2006. do 2014. godine. Podaci se odnose na različite funkcionalne gravitacijskog polja, a ovdje razmatrane undulacije geoida i anomalije slobodnog zraka. Od posebnog interesa nam je promatranje Republike Hrvatske i užeg okolnog područja te smo se na njih ograničili pri izračunu potrebnih vrijednosti. Korišteni globalni geopotencijalni modeli su rezultat prikupljenih podataka satelitskih misija te gravimetrijskih i altimetrijskih mjerenja, osim modela GO_CONS_GCF_2_DIR_R4. Prilikom izračunavanja određenih parametara ICGEM kalkulacijski servis koristi koeficijente sfernih harmonika kao i topografske modele dane kao grid (2 min × 2 min).

Na slikama prikazanim u petom poglavlju jasno je uočljiva međuzavisnost anomalija slobodnog zraka s planinskim izdizanjima. Slična situacija je prisutna prilikom razmatranja undulacija geoida.

U konačnici, usporedba modela istog stupnja i reda razvoja doводи do zaključka da se za područje Republike Hrvatske uspoređene veličine ne razlikuju značajno. Ipak, izbor najboljega za upotrebu treba se temeljiti na usporedbi s raspoloživim GNSS/niveliranim podacima.

LITERATURA

- › Barthelmes, F., (2013), Definition of Functionals of the Geopotential and Their Calculation from Spherical Harmonic Models, Scientific Technical Report STRO9/02, Revised Edition, January 2013, Potsdam.
- › Barthelmes, F., Köhler, W., (2010), The ICGEM-Poster, Second International Symposium of the International Gravity Field Service, 20-22 September 2010, University of Alaska Fairbanks.
- › Bašić, T., (2013), Predavanja iz kolegija "Fizikalna geodezija", Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu.
- › Bašić, T., Markovinović, D., (2013), Predavanja iz kolegija "Geofizička geodezija", Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu.
- › Bašić, T., (2012), Predavanja iz kolegija "Fizikalna geodezija", Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu.
- › Hećimović, Ž., Bašić, T., (2003), Globalni geopotencijalni modeli na teritoriju Hrvatske, Geodetski list, vol. 57, no. 2, str. 73-89.
- › Hećimović, Ž., Bašić, T., (2005), Satelitska misija CHALLENGING Minisatelite Payload (CHAMP), Geodetski list, vol. 59, no. 2, str. 129-147.
- › Pavlis, N. K., Holmes, S. A., Kenyon, S. C., Factor, J. K., (2012), The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008), Journal of Geophysical research, vol. 117.
- › URL-1: International Centre for Global Earth Models (ICGEM). [Internet]. <raspoloživo na: <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/>>, [pristupljeno 6. 3. 2014.]
- › URL-2: European Space Agency (ESA). [Internet]. <raspoloživo na: https://earth.esa.int/documents/10174/436590/DataSheet_DIR_R4.pdf/a9a6eea2-cc70-403f-92c4-8a806331aeb6?version=1.0>, [pristupljeno 8. 1. 2014.]
- › URL-3: International Centre for Global Earth Models (ICGEM), Evaluation of the models. [Internet]. <raspoloživo na: <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/evaluation/evaluation.html>>, [pristupljeno 3. 1. 2014.]