

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEODETSKI FAKULTET

Samanta Bačić

Dina Grubišić

Senka Jukić

**Analiza vremenskih promjena geoidnih undulacija modela geoida
ITSG-Grace2014 na području Europe s posebnim osvrtom na
područje Republike Hrvatske**

Zagreb, 2017.

Ovaj rad izrađen je na Zavodu za geomatiku Geodetskog fakulteta u Zagrebu, Katedra za državnu izmjeru, pod vodstvom prof. dr. sc. Tomislava Bašića i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2016./2017.

Popis kratica

CHAMP – Challenging Mini-Satellite Payload for Geo-scientific Research and Applications program

CROPOS – Croatian Positioning System

DGU – Državna geodetska uprava

DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

DMR – Digitalni model reljefa

DOT – Dynamic Ocean Topography

DTM – Digital Terrain Model

EGM2008 – Earth Gravitational Model 2008

EIGEN-6C4 – European Improved Gravity model of the Earth by New techniques

ESE – Earth Science Enterprise

ESSP – Earth System Science Pathfinder

EUVN – European Vertical Reference Network

EUVN_DA – European Vertical Reference Network - Densification Action

GNSS – Global Navigation Satellite System

GOCE – Gravity Field and Steady - State Ocean Circulation Explorer

GPS – Global Positioning System

GRACE – Gravity Recovery and Climate Experiment

GRACE-FO – GRACE Follow-on

GRGS – Groupe de Recherches de Geodesie Spatiale

GFZ – Geo Forschungs Zentrum

HRG2000 – Hrvatski referentni geoid 2000

HRG2009 – Hrvatski referentni geoid 2009

ICGEM – International Center of Global Earth Models

IMU – Inertial Measuring Unit

JPL – Jet Propulsion Laboratory

LEOP – Launch and Early Operations Phase

LVS – Launch Vehicle System

MOS – Mission Operations System

NASA – National Aeronautics and Space Administration

RDC – Raw Data Center

SAT – Satellite System

SDS – Science Data System

SIS – Science Instrument System

SLR – Satellite Laser Ranging

SRTM – Shuttle Radar Topography Mission

SSG – Satellite Gravity Gradiometry

SSH – Sea Surface Height

SS/L – Space Systems/Loral

SST – satellite-to-satellite-tracking

UTCSR – University of Texas Center for Space Research

WGS84 – World Geodetic System 1984

Sadržaj:

| | |
|---|----|
| 1. Uvod..... | 1 |
| 2. Oblik Zemlje | 2 |
| 2.1. Geoid | 2 |
| 2.2. Metode određivanja geoida | 3 |
| 3. Globalni geopotencijalni modeli..... | 4 |
| 3.1. Modeli geoida..... | 6 |
| 3.1.1. EGM2008..... | 6 |
| 3.1.2. EIGEN-6C4..... | 6 |
| 3.1.3. ITSG-Grace2014 | 6 |
| 3.1.4. HRG2009 | 7 |
| 4. Gravimetrijske satelitske misije..... | 9 |
| 4.1. CHAMP misija | 9 |
| 4.2. GRACE misija..... | 11 |
| 4.2.1. Razvoj..... | 12 |
| 4.2.2. Mjerenja | 14 |
| 4.2.3. Obrada podataka..... | 15 |
| 4.2.4. Aktualni status i planirani nastavak | 16 |
| 4.3. GOCE misija..... | 17 |
| 5. Podaci i obrada podataka | 21 |
| 5.1. Podaci | 21 |
| 5.2. Obrada podataka | 21 |
| 5.2.1. Obrada podataka za područje Europe..... | 21 |

| | |
|---|----|
| 5.2.2. Obrada podataka za područje Republike Hrvatske | 22 |
| 6. Rezultati i analiza..... | 24 |
| 6.1. Ispitivanje kvalitete modela geoida ITSG-Grace2014 na području Europe..... | 24 |
| 6.2. Regionalna promjena modela geoida ITSG-Grace2014 na području Europe | 30 |
| 6.3. Regionalna promjena modela geoida ITSG-Grace2014 na području Republike Hrvatske..... | 34 |
| 6.4. Ispitivanje kvalitete modela geoida ITSG-Grace2014 na području Republike Hrvatske..... | 37 |
| 7. Zaključak..... | 39 |
| Zahvala | 40 |
| Literatura | 41 |
| Popis slika | 45 |
| Popis tablica | 47 |
| Sažetak | 48 |
| Summary | 49 |

1. Uvod

Gravimetrija je grana geofizike čija je zadaća određivanje polja sile teže Zemlje i drugih nebeskih tijela kao funkcije položaja i vremena pomoću mjerenja ubrzanja sile teže i gradijenta ubrzanja sile teže, izvedenih na ili u blizini Zemljine površine (Torge, 1989). Sila teža smatra se osnovnom fizikalnom silom u prirodi, a suvremene satelitske misije CHAMP (Challenging Mini-Satellite Payload for Geo-scientific Research and Applications program), GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) i GOCE (Gravity Field and Steady - State Ocean Circulation Explorer) omogućile su dobivanje globalnih modela polja sile teže s visokom točnošću, kao i njihovih prostornih i vremenskih varijacija (Mulić i Đonlagić, 2012).

Globalni geopotencijalni modeli značajni su zbog upotrebljivosti na području cijele Zemlje. Pouzdani podaci o potencijalu ubrzanja sile teže Zemlje, na globalnoj razini i vrlo visoke rezolucije, fundamentalni su preduvjet za razne geodetske, geofizičke, oceanografske i inženjerske aplikacije te znanstvena istraživanja. U zadnjih 50 godina kontinuirana poboljšanja i usavršavanja teorije gravitacijskog modeliranja razvijana su usporedno s dostupnošću točnijih i kompletnijih podataka. U današnje vrijeme, istaknuta je potreba za modelima visoke rezolucije. Koriste se za određivanje orbita umjetnih satelita u Zemljinoj orbiti, u inercijalnim navigacijskim sustavima, za računanje geoidnih undulacija, određivanje dinamičke topografije oceana (engl. Dynamic Ocean Topography, DOT) i nagiba iz altimetrijski određenih visina morske površine (engl. Sea Surface Height, SSH). Također, globalni model može se iskoristiti kao referentna ploha za realizaciju globalnog vertikalnog datuma (Pavlis i dr., 2012).

U ovom radu naglasak je stavljen na njihovu primjenu kod računanja geoidnih undulacija. Cilj rada je analiza vremenskih promjena geoidnih undulacija dobivenih iz mjesečnih rješenja modela geoida ITSG-Grace2014 koji su izvedeni iz podataka GRACE misije. U radu je analizirana regionalna promjena geoida na području Europe te posebno na području Republike Hrvatske. Na temelju mjesečnih rješenja modela geoida ITSG-Grace2014 analizirana je regionalna promjena geoida na području Europe i Republike Hrvatske. Također, na području Republike Hrvatske napravljena je usporedba geoidnih undulacija modela geoida ITSG-Grace2014 s geoidnim undulacijama modela geoida EGM2008 (Earth Gravitational Model 2008), EIGEN-6C4 (European Improved Gravity model of the Earth by New techniques) i HRG2009 (Hrvatski referentni geoid 2009). Za analizu i obradu podataka

razvijeni su algoritmi i postupci u programskim sučeljima MathWorks Matlab i Golden Software Surfer.

2. Oblik Zemlje

Proučavanjem polja sile teže Zemlje izvorno se namjerava odrediti njen oblik. Mjerenja ubrzanja sile teže daju informaciju o rasporedu masa u unutrašnjosti Zemlje i na površini Zemlje. Oblik Zemlje ne opisuje se njenom stvarnom nepravilnom površinom, nego geoidom (Torge, 2001).

Budući da se ovaj rad bazira na praćenju promjena geoida dobivenih iz mjesečnih rješenja modela ITSG-Grace2014, u nastavku će biti objašnjena ekvipotencijalna ploha (nivo-ploha), odnosno ploha geoida.

2.1. Geoid

Geoid je najvažnija ekvipotencijalna ploha (nivo-ploha) Zemljinog polja sile teže na koju normala ima smjer vertikale, tj. smjer vektora ubrzanja sile teže g (Torge, 2001).

Johann Carl Friedrich Gauss (1777-1855) govori o geoidu kao poboljšanom modelu oblika Zemlje. Definirao je geoid kao ekvipotencijalnu plohu koja se u nekim svojim dijelovima poklapa sa srednjom razinom mora. Morske površine smatraju se kao slobodno gibajuće plohe, čiji je oblik uvjetovan ubrzanjem sile teže. Geoid možemo u grubom približenju zamisliti kao plohu površine mora provučenu ispod svih kontinenata. U geodeziji i oceanografiji geoid služi kao referentna ploha za visine pri opisu kopnenih morskih površina. To je ujedno i fizikalno definirana ploha konstantnog potencijala W_0 (Torge, 2001):

$$W = W(\vec{r}) = W_0 = \text{const.} \quad (2.1)$$

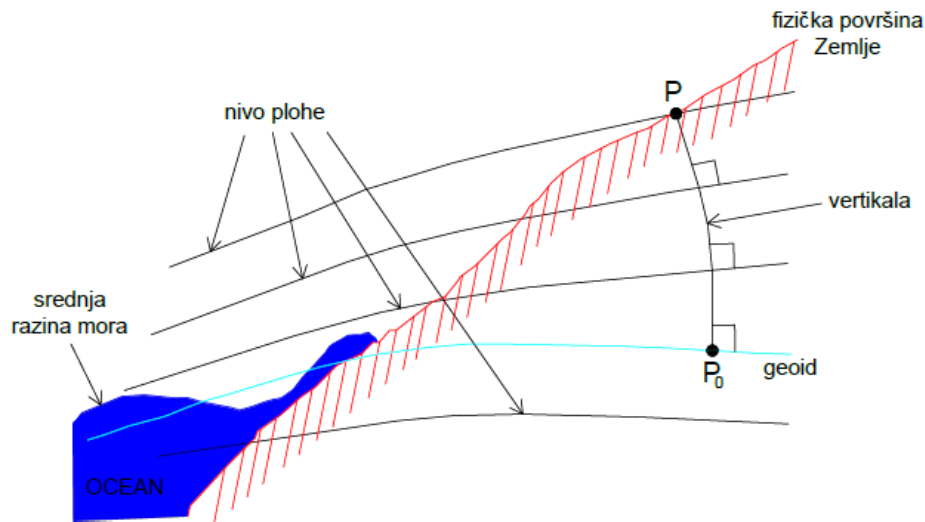
gdje je:

\vec{r} - radij vektor položaja točke na ekvipotencijalnoj plohi

W_0 - iznos potencijala sile teže na plohi geoida.

Kako slijedi iz svojstava potencijala, geoid je zatvorena i kontinuirana ploha. Zakrivljenost geoida bit će uvjetovana promjenama u gustoći Zemljine kore (slika 2.1). Ukoliko primijenimo uvjet minimuma na odstupanje srednje razine mora od geoida, geoid može biti definiran kao ekvipotencijalna ploha koja najbolje aproksimira srednju razinu mora u

određenoj epohi. Poboljšana definicija geoida mora uključiti i vremenske promjene kao posljedicu razmještaja masa unutar Zemlje (Torge, 2001).



Slika 2.1: Neparalelnost nivo ploha

Geodetski značaj geoida (Torge, 2001):

- predstavlja referentnu plohu za ortometrijske visine,
- otkloni vertikale i geoidne undulacije potrebni su za redukciju geodetskih mjerenja s fizičke površine Zemlje na referentni elipsoid,
- lokalni, regionalni ili globalni geoid služi za transformaciju između koordinatnih sustava,
- uvjet za primjenu GNSS (Global Navigation Satellite System) mjerenja je visokotočni geoid, kao razlike geoidnih undulacija i elipsoidnih visina (GNSS nivelman).

2.2. Metode određivanja geoida

Visoka točnost današnjeg pozicioniranja GNSS-om zahtjeva visoku točnost određivanja geoida, tj. kvazigeoida. Za postizanje tako velike točnosti potrebno je imati gustu mrežu geoidnih točaka na kojima su određeni otkloni vertikale i/ili gusti gravimetrijski premjer na kopnu i moru (Kuhar i Mulić, 2009).

Metode za određivanje plohe geoida s obzirom na način prikupljanja podataka mogu se podijeliti na (Kuhar i Mulić, 2009):

1. terestričke metode (astrogeodetska, gravimetrijska metoda),

2. satelitske metode (satelitska altimetrija, GPS (Global Positioning System) mjerenja),
3. kombinirane metode (dinamičke i gravimetrijske metode, astrogravimetrijski nivelman, kolokacija po najmanjim kvadratima i spektralne metode po najmanjim kvadratima).

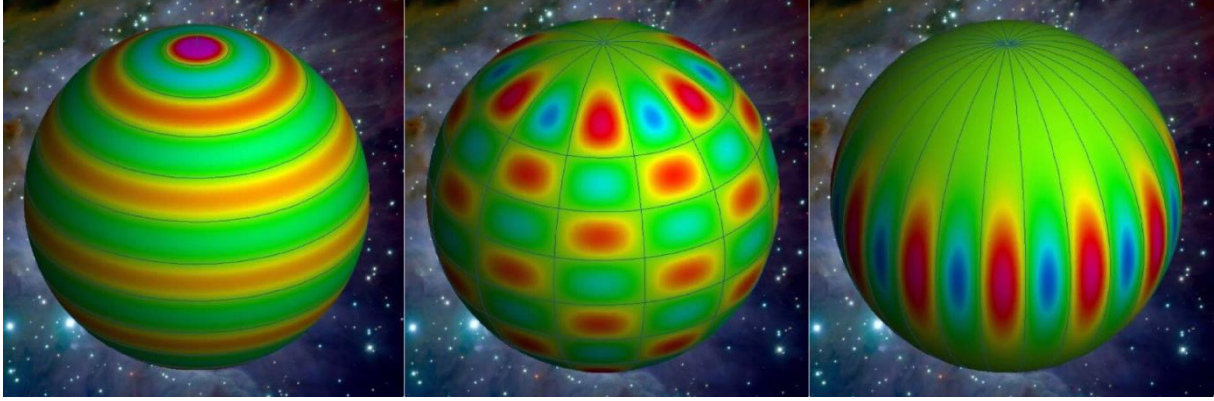
3. Globalni geopotencijalni modeli

Globalni geopotencijalni modeli su matematičke funkcije koje opisuju Zemljino polje ubrzanja sile teže u 3D prostoru (Barhelmes, 2014). Također, one aproksimiraju realni gravitacijski potencijal Zemlje te omogućuju izračun različitih funkcionala polja ubrzanja sile teže (potencijal ubrzanja sile teže, smjer vektora ubrzanja sile teže, anomalija slobodnog zraka ubrzanja sile teže, poremećajno ubrzanja sile teže, geoidna visina, komponente otklona vertikale, anomaliju visine itd.) na i izvan Zemlje (Barhelmes, 2013). Sastoje se od gravitacijskog dijela prema Newtonovom zakonu privlačenja masa i centrifugalnog dijela zbog rotacije Zemlje (Barhelmes, 2014).

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 globalnog geopotencijalnog modela ovisi o gustoći i spektralnoj razlučivosti korištenih podataka za njegovo računanje. Pouzdanost globalnog geopotencijalnog modela nije homogena za cijelo područje Zemlje. Ona ovisi o gustoći i kvaliteti korištenih podataka za pojedino područje (Hećimović i Bašić, 2003). U radu su korišteni podaci homogene gustoće i kvalitete.

Zanimljivo je ispitati kvalitetu raspoloživih globalnih geopotencijalnih modela, odnosno kako dobro oni aproksimiraju konkretne podatke Zemljina polja ubrzanja sile teže na području Republike Hrvatske, i to kroz usporedbu ploha geoida izračunatih iz pojedinih modela s plohom geoida dobivenom uz pomoć GNSS-nivelmanskih podataka (Hećimović i Bašić, 2003).

Geometrijskom interpretacijom razvoja u red po sfernim funkcijama dobiju se (slika 3.1) zonalni ($m = 0$), teseralni ($n \neq m$) i sektorijalni sferni harmonici ($n = m$) (Torge, 2001).



Slika 3.1: Zonalni ($n=12, m=0$), teseralni ($n=12, m=6$) i sektorijalni ($n=m=12$) sferni harmonici

Poznato je da iz globalnog geopotencijalnog modela preko razvoja u red po sfernim funkcijama dolazi do izraza za poremećajni potencijal ubrzanja sile teže (T) (Torge, 2001):

$$T = \frac{GM}{r} \sum_{n=2}^{n_{\max}} \left(\frac{a}{r}\right)^n \sum_{m=0}^n (\Delta\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \Delta\bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos\Theta) \quad (3.1)$$

gdje je GM - geocentrična gravitacijska konstanta, (r, λ, Θ) - kugline koordinate, n i m stupanj i red razvoja globalnog geopotencijalnog modela, a - velika poluos elipsoida, $\Delta\bar{C}_{nm}$, $\Delta\bar{S}_{nm}$ - razlike između potpuno normaliziranih koeficijenata sfernih harmonika realnog i normalnog polja ubrzanja sile teže, $\bar{P}_{nm}(\cos\Theta)$ - normalizirani Legendreovi polinomi, n_{\max} - maksimalni razvoj globalnog geopotencijalnog modela (Torge, 2001).

U sfernoj aproksimaciji, izraz za geoidnu undulaciju (anomalije visina) pomoću izraza za poremećajni potencijal ubrzanja sile teže (T) glasi (Torge, 2001):

$$N = \frac{GM}{r\gamma} \sum_{n=2}^{n_{\max}} \left(\frac{a}{r}\right)^n \sum_{m=0}^n (\Delta\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \Delta\bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos\Theta) \quad (3.2)$$

Linearni funkcionali poremećajnog potencijala (anomalije visina, anomalije ubrzanja sile teže, komponente otklona vertikalne) dani su izrazima (Torge, 2001):

$$\zeta = \frac{T}{\gamma}, \Delta g = -\frac{\partial T}{\partial r} - \frac{2}{r}T, \xi = -\frac{1}{r\gamma} \frac{\partial T}{\partial \varphi}, \eta = -\frac{1}{r\gamma \cos \varphi} \frac{\partial T}{\partial \lambda}. \quad (3.3)$$

3.1. Modeli geoida

3.1.1. EGM2008

EGM2008 predstavlja model sfernih harmonika Zemljina polja ubrzanja sile teže nastao na temelju metode najmanjih kvadrata ITG-Grace03s (Mayer-Gürr, 2007) gravitacijskog modela i pridružene kovarijacijske matrice, s informacijama o ubrzanju sile teže dobivenim iz globalnog seta srednjih anomalija slobodnog zraka definiranih u mrežu jednakokutnih 5-minutnih gravitacijskih podataka. Za procjenu anomalija i ostalih aspekata rješenja potreban je globalni digitalni model terena (engl. Digital Terrain Model, DTM) visoke rezolucije, od kojih je korišten DTM2006 (Pavlis i dr., 2012). Model je kompletan do reda i stupnja 2159 te sadrži dodatne koeficijente do stupnja 2190 i reda 2159 (Pavlis i dr., 2012).

3.1.2. EIGEN-6C4

Statički globalni geopotencijalni model EIGEN-6C4 (Forste i dr., 2014) je najrecentniji kombinirani globalni geopotencijalni model razvijen od strane geodetskog istraživačkog centra - GFZ (Geo Forschungs Zentrum) u Postdamu u Njemačkoj i istraživačke grupe prostorne geodezije - GRGS (Groupe de Recherches de Geodesie Spatiale) u Toulouseu u Francuskoj. EIGEN-6C4 je zadan koeficijentima sfernih harmonika s maksimalnim stupnjem i redom razvoja 2190. Nastao je kombinacijom LAGEOS 1 i 2 podataka satelitskih laserskih opažanja, SLR (Satellite Laser Ranging), GRACE podataka mjerenja, GOCE podataka satelitske gradiometrije i terestričkih podataka (Kostelecký i dr., 2015).

3.1.3. ITSG-Grace2014

ITSG-Grace2014 je gravitacijski geopotencijalni model koji je nastao iz GRACE podataka mjerenja. Razvijen je na Institutu za Geodeziju na Tehničkom sveučilištu u Grazu (Kvas i dr., 2015).

ITSG-Grace2014 se sastoji od tri dijela (URL-1):

1. Statičko rješenje ITSG-Grace2014s

- Rezultat je statičko rješenje visoke rezolucije do stupnja i reda 200 i kompletne stoljetne i godišnje varijacije do stupnja i reda 100. Referentna epoha ovog modela je 1. siječnja 2008. godine.

2. Slobodna mjesečna rješenja

- Setovi sfernih harmoničkih koeficijenata za različite maksimalne stupnjeve (60, 90, 120) procijenjeni su za svaki mjesec opažanja bez bilo kakve matematičke regularizacije. Za svako mjesečno rješenje i za svaku rezoluciju je dana odgovarajuća matrica varijance i kovarijance.

3. Dnevna rješenja uglačana Kalman filterom

- Za izračun dnevnih GRACE rješenja potrebno je povećati vremensku rezoluciju, a to dovodi do smanjenja točnosti procijenjenih parametara. Kako bi se vremenska razlučivost poboljšala bez gubitka prostornih informacija koristi se Kalman filter.

U usporedbi s prethodnim GRACE modelima, ovaj model je poboljšán u postupku obrade, odnosno pri ažuriranju pozadinskih modela, modeliranju ionosferskih utjecaja iz GPS opažanja. Poboljšán je i položaj satelita u kombinaciji sa zvjezdanom kamerom i kutnim ubrzanjima, poboljšana je procjena K-band varijacija centra antene u sklopu gravitacijskog polja kao i određivanja pogrešaka funkcije kovarijance, te su modelirane dnevne varijacije gravitacijskog polja u procesu korekcije kako bi se smanjile pogreške uzrokovane isticanjem vremena. S navedenim poboljšanjima došlo je do povećanja broja parametara te je računski proces opsežniji u odnosu na prethodne modele (Kvas i dr., 2015).

3.1.4. HRG2009

Korištenjem nadograđenih podataka Zemljinog gravitacijskog polja i primjenom tehnike računanja kolokacije po najmanjim kvadratima izračunat je novi hrvatski model geoida HRG2009 (Bašić i Bjelotomić, 2014).

Nekoliko značajnih studija prethodilo je računanju novog nacionalnog geoida HRG2009 (Bašić i Bjelotomić, 2014):

- analiza recentnih globalnih geopotencijalnih modela baziranih na CHAMP i GRACE misijama te posebno EGM2008 rješenja,
- prikupljanje i kontrola kvalitete znatno većeg broja podataka za silu težu,
- izrada i provjera 3"x3" DMR-a (Digitalni model reljefa) iz podataka SRTM-a (Shuttle Radar Topography Mission) za potrebe računanja visokofrekventnog dijela spektra Zemljina polja ubrzanja sile teže,

- uspostava osnovne gravimetrijske mreže, EUVN (European Vertical Reference Network) i EUVN_DA (European Vertical Reference Network - Densification Action) (kontrola),
- analiza razlika visina između starog i novog visinskog datuma,
- uspostava oko 500 novih GNSS/nivelmanskih točaka diljem kopnenog dijela RH za potrebe bolje apsolutne orijentacije novog geoida, ali i nezavisne ocjene kvalitete HRG2000 (Hrvatski referentni geoid 2000).

Značajna povećanja točnosti postignuta su u odnosu na prethodni nacionalni model geoida HRG2000: četiri puta bolja rezolucija i 69% bolja apsolutna točnost modela. Korišteni su sljedeći skupovi podataka: novi izmjereni terestrički podaci i modeli dobiveni iz satelitske altimetrije za područje Jadranskog mora, s geoidnim undulacijama u diskretnim točkama izmjerenih GNSS/nivelmanom na gotovo 500 stajališta diljem kopna (Bašić i Bjelotomić, 2014).

Procjena kvalitete HRG2009 određena je na dva načina. Unutrašnja točnost procijenjena je kroz analizu provedenu na 495 točaka, gdje su mjerene GNSS/nivelmanske undulacije uspoređene s izračunatim undulacijama iz modela geoida HRG2009. Analiza unutarnje točnosti pokazala je visoku kompatibilnost s pripadajućim standardnim odstupanjem od 2.7 cm i prosječnom razlikom jednakom nuli (Bašić i Bjelotomić, 2014).

Napravljena je i vanjska neovisna procjena kvalitete na 59 stajališta koji nisu korišteni u procesu računanja. Usporedba je napravljena između 59 GNSS/nivelmanskih undulacija mjerenih za vanjsku kontrolu geoida i izračunatih HRG2009 undulacija za ta stajališta. Rezultat toga je standardna devijacija od 3.5 cm na cijelom području računanja. To je znatno pouzdanije u odnosu na ranije rješenje HRG2000 sa standardnom devijacijom 11.4 cm (Bašić i Bjelotomić, 2014).

Nova ploha geoida koristi se za različite namjene, prvenstveno u preciznom definiranju visina koristeći modernu GNSS tehnologiju. Zbog toga je Hrvatski pozicijski sustav CROPOS (Croatian Positioning System) nadograđen 2011. godine novom uslugom koja omogućuje transformaciju elipsoidnih visina u (normalne) ortometrijske visine u realnom vremenu koristeći HRG2009 (Bašić i Bjelotomić, 2014).

4. Gravimetrijske satelitske misije

Tri satelitske misije CHAMP, GRACE i GOCE obilježile su zadnje desetljeće u pogledu istraživanja Zemljina geosustava. Upravo zato je to desetljeće nazvano „Desetljeće geopotencijala“ (Pavlis i dr., 2012).

4.1. CHAMP misija

Satelitska misija CHAMP razvijena je u Njemačkoj i ima za cilj temeljna geoznanstvena istraživanja i istraživanja fizike atmosfere. Omogućuje nove spoznaje o statički i dinamički Zemljina gravitacijskog polja, Zemljina magnetskog polja i atmosferi. CHAMP ima potencijal pokretanja novih interdisciplinarnih istraživanja koja se primarno odnose na (Hećimović i Bašić, 2005a):

- geosferu: istraživanje strukture i dinamike unutrašnjosti Zemlje (od jezgre preko plašta do kore) i istraživanje međusobnog utjecaja oceana i atmosfere,
- hidrosferu: pouzdanije praćenje cirkulacije vode, globalne promjene razine oceana i kratkoperiodične globalne cirkulacije vode te promjene vremena i klime,
- atmosferu: globalno sondiranje slojeva atmosfere koji će dati bolju vezu meteoroloških odnosa na Zemlji s obzirom na svemirsku meteorologiju.

Ciljevi misije CHAMP su u znanstveno - stručnim područjima geoznanosti i fizike atmosfere. Temeljni cilj misije je prikupljanje i distribucija podataka mjerenja omogućuje nove spoznaje o procesima u geosustavu. Misija CHAMP ispunjava osnovne znanstvene zadaće (Hećimović i Bašić, 2005a):

- definiranje globalnog, vrlo preciznog modela gravitacijskog polja i prostorno-vremenske promjenjivosti polja,
- dobivanje preciznog globalnog modela glavnog magnetskog polja i magnetskog polja Zemljine kore s prostorno-vremenskom promjenjivošću polja,
- daljinska istraživanja stanja atmosfere za potrebe kratkoperiodičnih meteoroloških predikcija vremena i praćenje promjena klime.

Cilj misije CHAMP je posluživanje cijelog niza korisnika s više standardnih podatkovnih proizvoda različitih razina obrade za vrijeme trajanja cijele misije. Mjerenja u misiji CHAMP

moгу se podijeliti na: mjerenja za određivanje gravitacijskog polja, mjerenja magnetskog polja i mjerenja parametara atmosfere (Hećimović i Bašić, 2005a).

Standardni znanstveni podatkovni CHAMP proizvodi podijeljeni su na četiri razine. Povećanjem razine povećava se stupanj obrade. S obzirom na mjerenja, proizvodi podataka podijeljeni su na (URL-2):

1. Proizvode podataka za modeliranje Zemaljskog gravitacijskog polja i putanje satelita:

- razina 1: GPS/CHAMP kodna i fazna SST-mjerenja (satellite-to-satellite-tracking); GPS kodna i fazna mjerenja zemaljskih postaja,
- razina 2: obrađena akcelerometrijska mjerenja (linearna i kutna ubrzanja s podacima o visini i vremenima paljenja motora),
- razina 3: rapidne putanje CHAMP satelita u konvencionalnom terestričkom sustavu (engl. Conventional Terrestrial System), s kratkim vremenskim kašnjenjem nakon prikupljanja podataka,
- razina 4: naknadno obrađene precizne putanje CHAMP i GPS satelita i njihovom primjenom dobiveni globalni modeli gravitacijskog polja (nakon nekoliko mjeseci).

2. Proizvode podataka magnetskog polja:

- razina 1: elementarni magnetski podaci mjerenja,
- razina 2: skalarna i vektorska mjerenja parametara magnetskog polja, precizne visine dobivene s pomoću zvjezdanog kompasa,
- razina 3: potpuno kalibrirani magnetski vektori,
- razina 4: model glavnog magnetskog polja razvijen u sferne harmonike i sekularne varijacije koeficijente koji su dobiveni s obzirom na CHAMP i terestrička mjerenja (novi modeli se periodično objavljuju).

3. Proizvode podataka o atmosferi:

- razina 1: CHAMP GPS okultacijska mjerenja, GPS kodna i fazna mjerenja,

- razina 2: popis okultacijskih događaja po danima (karakteristične informacije o okultaciji),
- razina 3: vertikalni profili atmosferskih podataka.

4.2. GRACE misija

GRACE misija dio je NASA (National Aeronautics and Space Administration) ESSP (Earth System Science Pathfinder) programa koji je dio NASA ESE (Earth Science Enterprise) programa. Ti su programi pokrenuti u svrhu razvoja novih mjernih tehnologija za studiju geosustava (Hećimović i Bašić, 2005b).

GRACE je zajednički projekt NASA-e i DLR-a (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt). Glavni partneri su UTCSR (University of Texas Center for Space Research), JPL (Jet Propulsion Laboratory) i GFZ (URL-3).

Primarni znanstveni cilj GRACE misije je mjerenje Zemljinog gravitacijskog polja i njegovih vremenskih promjena (URL-3) te istraživanje statike i dinamike geosustava kombinacijom GRACE podataka s podacima različitih geofizičkih modela te terestričkim i satelitskim podacima. Dodatni cilj misije je unapređenje proučavanja Zemljine atmosfere primjenom GPS radiookultacijskih mjerenja (Hećimović i Bašić, 2005b).

GRACE je prva misija posvećena mjerenju Zemljinog gravitacijskog polja s prostornom i vremenskom rezolucijom koja doprinosi klimatskim istraživanjima. Prvotna zadaća GRACE misije bila je proširiti i nastaviti gravitacijska mjerenja započeta Lageos, Starlette, GFZ-1 i CHAMP satelitima, ti sateliti mjere samo vrlo duge valne duljine gravitacijskog polja. Razlika u odnosu na prethodne misije je ta što se GRACE misijom postiže visoka točnost mjerenja i visoka prostorna rezolucija srednjeg Zemljinog gravitacijskog polja (NASA, 2005).

GRACE misija omogućuje analizu fenomena koji uključuju procese transporta masa. GRACE mjerenja sadržavaju dinamički utjecaj svih masa koje se gibaju (Hećimović i Bašić, 2005b).

Glavne primjene GRACE misije su (NASA, 2002):

- praćenje kretanja vode na i ispod Zemljine površine,
- praćenje promjena ledenih pokrova i globalne razine mora,
- proučavanje oceanskih struja blizu površine i ispod valova,

- praćenje promjena u strukturi čvrste Zemlje.

GRACE podaci mogu se kombinirati s cijelim nizom terestričkih podataka prikupljenih na klasičan način te tako GRACE misija omogućuje razvoj više znanstvenih područja. Geodezija dobiva nove standarde modeliranja gravitacijskog polja i dinamički pristup rješavanja problema oblika Zemlje. Hidrolozi mogu bolje modelirati razinu podzemnih voda i promjenu površinskih voda u velikim slivnim bazenima. Glaciolozi mogu pouzdanije pratiti otapanja i stvaranja glečera i ledenih polarnih površina, a geofizičari dobivaju podatke o rasporedu gustoća masa i o mehaničko-fizikalnim svojstvima unutrašnjosti Zemlje i Zemljine kore (Hećimović i Bašić, 2005b).

4.2.1. Razvoj

GRACE misija odabrana je kao druga misija NASA ESSP programa u svibnju 1997. godine (URL-4), nakon što ju je 1996. godine predložio profesor Byron D. Tapley iz UTCSR-a (Gonzalez, 2002). Izabran je za voditelja projekta te je prvi voditelj NASA-ina svemirskog projekta iako nije njezin zaposlenik. Njemački voditelj je profesor Christoph Reigber iz GFZ-a (Hećimović i Bašić, 2005b).

Dva GRACE satelita lansirana su u orbitu oko Zemlje 17. ožujka 2002. godine u 9:21:27 UTC (slika 4.1). Sateliti su postavljeni u gotovo kružnu ($e < 0.005$, gdje e označava koeficijent ekscentričnosti, tj. mjeru odstupanja elipse od kružnice), blizupolarnu putanju s inklinacijom od 89° i visinom od 485 km iznad površine Zemlje. Gotovo kružna, polarna putanja odabrana je da bi se dobila globalna, homogena pokrivenost podacima. Visina od 485 km odabrana je kao optimalna s obzirom na promjenu gravitacijskog polja s visinom i trajanje misije (Tapley i dr., 2004). Planirano trajanje misije bilo je pet godina, ali je odlučeno da se nastavi s projektom, u cilju što dužeg prikupljanja podataka o gravitaciji i o stanju atmosfere (Mulić i Đonlagić, 2012).



Slika 4.1: Dva GRACE satelita u orbiti (URL-4)

Razvoj GRACE projekta podijeljen je na pet razdoblja:

1. Razdoblje prije lansiranja, u kojem je razrađen projekt misije te su dizajnirani, izrađeni i testirani sateliti i mjerni instrumenti i formiran je zemaljski segment (Hećimović i Bašić, 2005b).
2. Lansiranje i rano operacijsko razdoblje (engl. Launch and Early Operations Phase, LEOP) koje je započelo trenutkom lansiranja, a završilo je kada su postignuti sljedeći uvjeti (URL-4):
 - Oba satelita nalaze se u sigurnoj, stabilnoj putanji bez opasnosti da može doći do međusobnog sudara, sudara s raketom nosačem ili drugim satelitom,
 - Oba satelita postigla su nominalnu kontrolu visine uključujući uspješnu akviziciju zvjezdanih kamera,
 - Uspostavljena je nominalna komunikacija sa satelitima,
 - Ne postoje problemi koji bi doveli misiju u opasnost,
 - Postignuta je i stabilizirana nominalna udaljenost između satelita, oko 220 km.
3. Početno razdoblje (engl. Commissioning Phase) nastavlja se na LEOP razdoblje. U tom razdoblju se odvijaju sljedeće aktivnosti: uspostavljena je početna opskrba električnom energijom, uključeni su znanstveni instrumenti, uspostavljena je veza između GRACE satelita i provedena je početna kalibracija (Hećimović i Bašić, 2005b).
4. Razdoblje provjere (engl. Validation Phase) traje šest mjeseci i uključuje provjeru i kalibraciju znanstvenih instrumenata i sustava podataka te provođenje svih potrebnih radnji za automatsko dobivanje podatkovnih proizvoda (Hećimović i Bašić, 2005b).
5. Razdoblje mjerenja (engl. Observational Phase) nastavlja se sve do kraja misije, s kratkim prekidima zbog održavanja orbite i rekalkibracije. Nakon ove faze misija ulazi u opservacijsku fazu (URL-4).

GRACE projekt podijeljen je na pet sustava (URL-4):

1. Sustav za lansiranje (engl. Launch Vehicle System, LVS) uključuje ROCKOT raketu-nosač, multi-satelitski dozator te osoblje, testnu opremu i objekte za pripremu,

integraciju i lansiranje satelita. LVS-om upravlja DLR LVS Manager i podržan je od strane JPL projekta i njegovih izvođača.

2. Satelitski sustav (engl. Satellite System, SAT) sastoji se od dva satelita (GRACE-1 i GRACE-2) koji zajedno tvore jedan mjerni senzor. Razvoj satelitskog sustava vodi JPL u suradnji sa SS/L (Space Systems/Loral) i Astrium GmbH (GmbH). GmbH daje glavne elemente za dva satelita na temelju postojećeg malog satelita dizajniranog za CHAMP misiju. SS/L omogućuje kontrolni sustav, mikrovalnu elektroniku i ispitivanje sustava i okoliša.
3. Sustav znanstvenih instrumenata (engl. Science Instrument System, SIS) izrađen je u JPL-u i uključuje sve elemente potrebne za mjerenje udaljenosti između satelita, GPS prijamnik i dodatne senzore kao što su zvjezdane kamere i akcelerometri. Ovaj sustav također koordinira integraciju svih senzora osiguravajući njihovu međusobnu kompatibilnost i njihovu kompatibilnost sa satelitom.
4. Operacijski sustav misije (engl. Mission Operations System, MOS) sastoji se od opreme i resursa MOS antena za praćenje u Weilheimu i Neustrelitzu i drugih stanica i opreme potrebne za podupiranje LEOP-a i nepredviđenih operacija. Ta oprema koristi se za praćenje rada satelita, provođenje inicijalne obrade telemetrijskih podataka i slanje podataka za daljnju obradu i izradu znanstvenih proizvoda. Prate se i satelitske performanse i njihovo stanje za vrijeme trajanja misije. Operacije misije provode se u kontrolnom centru GSOC-a u Oberpfaffenhofenu u Njemačkoj.
5. Sustav znanstvenih podataka (engl. Science Data System, SDS) podijeljen je između više partnera, što koordinira JPL. Sustav uključuje znanstvenu obradu, distribuciju, arhiviranje i provjeru proizvoda. Podaci i proizvodi koje SDS obrađuje i arhivira su: gravitacijsko polje, GPS proizvodi, korigirani dometi između satelita i ubrzanja i putanje. SDS također prima, obrađuje i arhivira sporedne podatke (npr. meteorološke) potrebne za obradu i verifikaciju.

4.2.2. Mjerenja

GRACE je prva Earth-monitoring misija koja ne mjeri elektromagnetske valove koji se odbijaju o površinu Zemlje. Umjesto toga, misija koristi mikrovalni daljinomjer za mjerenje točnih promjena brzine i udaljenosti između dva identična satelita koji se nalaze u polarnoj orbiti na međusobnom razmaku oko 220 km i 500 km iznad Zemlje (NASA, 2002). GRACE

mjeri gravitaciju u odnosu na udaljenost između dva satelita. Kada postoji porast gravitacije ispred dva satelita, prednji satelit ubrzava i udaljenost između satelita se povećava, a kada je povećana gravitacija između satelita, njihova udaljenost se smanjuje. Suprotno se događa kada ispred ili između satelitskog para postoji smanjena gravitacija. Kada se sateliti kreću relativnom brzinom, mogu otkriti promjene međusobne udaljenosti manje od mikrometra u sekundi (URL-5).

Prikupljena mjerenja u GRACE misiji mogu se podijeliti na mjerenja za potrebe modeliranja gravitacijskog polja i podatke o atmosferi. Mjerenjima se prikupljaju podaci (Hećimović i Bašić, 2005b):

1. Za Zemljino gravitacijsko polje:

- mjerenje udaljenosti između satelita pomoću K-band daljinomjera,
- mjerenje položaja satelita pomoću GPS prijavnika u oba satelita,
- mjerenje negravitacijskih sila akcelerometra u oba satelita,

2. Za atmosferu:

- mjerenje deformacije GPS signala na putanji GRACE-GPS satelita. GPS radiookultacijska mjerenja provode se samo s jednim GRACE satelitom.

Kvaliteta mjerenih veličina za modeliranje gravitacijskog polja (Hećimović i Bašić, 2005b):

1. Mjerenje udaljenosti između GRACE satelita ($< 4 \mu\text{m}$ relativno, $< 10 \mu\text{m}$ apsolutno),
2. Precizna određivanja položaja putanje satelita ($< 0,2 \text{ mm}$ relativno, 5 cm apsolutno).

Mjerenja GRACE satelita, u kombinaciji s drugim podacima i modelima, omogućila su opažanja promjena akumuliranih voda, promjena ledenih masa, promjena tlaka na dnu oceana te promjena razine mora (URL-5).

4.2.3. Obrada podataka

Obrada podataka provodi se u središnjem procesoru GRACE satelita. On osigurava potrebne uvjete za rad mjernih instrumenata te dodatno provjerava ispravnost funkcioniranja satelitskih sustava uključujući lokalizaciju i ispravak pogrešaka. GRACE proizvodi podataka, obzirom na obradu, podijeljeni su na tri nivoa (Hećimović i Bašić, 2005b):

- Nivo-0 su sirovi telemetrijski podaci koji se dobiju u zemaljskoj stanici DLR RDC (Raw Data Center). Oko 99,5% sirovih podataka zadovoljava uvjete da se mogu poslati na daljnju obradu.
- Nivo-1 sadrži mjerenja K-band daljinomjera, akcelerometara, zvjezdanih kamera i GPS prijammnika s oba satelita. Obrada se provodi u JPL-u i nakon obrade podaci se šalju u UTCRS i GFZ, gdje se modelira statičko i dinamičko gravitacijsko polje Zemlje.
- Nivo-2 su kratkoperiodični (30 dana) modeli Zemljina gravitacijskog polja dobiveni primjenom kalibriranih i provjerenih GRACE nivo-1 podataka.

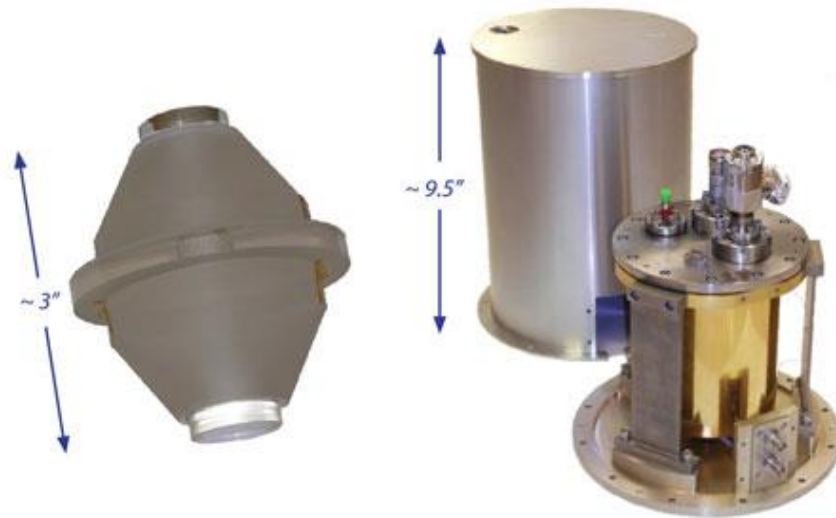
4.2.4. Aktualni status i planirani nastavak

Status misije 8. prosinca 2016. godine opisan je kao što slijedi: GRACE-1 i dalje prikuplja nominalne znanstvene podatke. GRACE-2 prikuplja podatke u reduciranim uvjetima. Akcelerometar na GRACE-2 je isključen. K-band daljinomjer prikuplja međusatelitske podatke o udaljenosti na sunčevom svjetlu i kroz djelomičnu sjenu. Funkcije letjelice se provode nominalno sve dok su sjene kratke. Kada se sjene produlje, smanjeni kapacitet baterije može utjecati na funkcije letjelice u sjeni. Trenutna operacijska strategija misije je povećati šanse sigurnog prolaza kroz takav režim. Prve naznake su da podaci prikupljeni koristeći ovu strategiju, tijekom studenog 2016., mogu dostaviti vjerodostojne znanstvene podatke. Daljnja analiza je u tijeku (URL-4).

Obzirom da je vijek GRACE misije ograničen, NASA i GFZ planiraju nastavak misije te trenutno provode GRACE-FO (GRACE Follow-on) misiju čije se lansiranje predviđa u kolovozu 2017. godine (URL-3). Timu istraživača se pridružuju i istraživači iz Australije te će jedan od glavnih ciljeva GRACE misije biti opažanje topljenja ledenih i snježnih masa na Antarktiku (URL-6).

Buduća GRACE FO misija bit će opremljena kvalitetnijim mjernim instrumentima (Slika 4.2 4.2). Planira se da budući sateliti budu opremljeni laserskim interferometrima kojima će se točnost mjerenja udaljenosti između dva satelita povećati i do deset puta. Također se očekuje da će točnost mjerenja međusatelitske udaljenosti biti reda nanometra (URL-7). Kraća valna duljina lasera i izvrsna stabilnost valne duljine poboljšati će točnost mjerenja za faktor 25 u odnosu na originalnu GRACE misiju. Prednost GRACE FO je mnogo manja valna dužina lasera, nego što je to kod aktualnih satelita. Još jedna prednost je način mjerenja vremena,

primjenjivat će se termički izolirano kućište i to će omogućiti veću stabilnost od one koju omogućuje kvarcni sat koji se koristi u aktualnoj misiji (URL-6).



Slika 4.2: Prikaz poboljšanog instrumentarija GRACE FO misije (URL-5)

4.3. GOCE misija

Glavni cilj GOCE misije je dobivanje modela statičkog gravitacijskog polja Zemlje velike rezolucije. Vrlo kvalitetna mjerenja gravitacijskog polja omogućavaju bolje razumijevanje procesa unutar Zemlje, na Zemlji i izvan nje. GOCE model Zemljina gravitacijskog polja koristi se za dobivanje (Hećimović i Bašić, 2005c):

- novih spoznaja o fizici Zemljine unutrašnjosti uključujući geodinamiku litosfere i sastav plašta,
- preciznog globalnog modela geoida koji se u kombinaciji s altimetrijskim mjerenjima koristi za modeliranje apsolutnih oceanskih struja i prijenosa topline,
- modela debljine polarnog leda primjenom podataka o topografiji čvrstog tla i mjerenja visine leda primjenom satelitske altimetrije,
- vrlo kvalitetnoga globalnog referentnog sustava visina koji služi kao referentna ploha za proučavanje topografskog procesa.

Glavni proizvodi misije GOCE koji se koriste u drugim znanstvenim područjima su globalni geoid i anomalije ubrzanja sile teže visoke rezolucije. Zahtjevi u pogledu rezultata GOCE misije, s obzirom na pojedina znanstvena područja, su (Gruber i dr., 2008):

Geodezija:

- GPS nivelman: pouzdanost visina 1 cm, prostorna razlučivost 100-1000 km,
- definiranje globalnog visinskog sustava: pouzdanost visina 1 cm, prostorna razlučivost 100-20000 km,
- inercijalni navigacijski sustav: pouzdanost $1-5 \times 10^{-5} \text{ms}^{-2}$, prostorna razlučivost 100-1000 km,
- putanje satelita: pouzdanost približno $1-3 \times 10^{-5} \text{ms}^{-2}$, prostorna razlučivost 100-1000 km.

Čvrsta Zemlja:

- gustoća litosfere i gornjeg plašta: pouzdanost $1-2 \times 10^{-5} \text{ms}^{-2}$, prostorna razlučivost 100 km,
- kontinentalna litosfera, sedimentna osnova: pouzdanost $1-2 \times 10^{-5} \text{ms}^{-2}$, prostorna razlučivost 50-100 km,
- kontinentalna litosfera, tektonska gibanja: pouzdanost $1-2 \times 10^{-5} \text{ms}^{-2}$, prostorna razlučivost 100-500 km,
- kontinentalna litosfera, seizmički rizik: pouzdanost $1 \times 10^{-5} \text{ms}^{-2}$, prostorna razlučivost 100 km,
- oceanska litosfera, seizmički rizik: pouzdanost $0,5-1 \times 10^{-5} \text{ms}^{-2}$, prostorna razlučivost 100-200 km.

Oceanografija:

- kratka skala: pouzdanost 1-2 cm, prostorna razlučivost 100 km,
- skala bazena: pouzdanost oko 0,1 cm, prostorna razlučivost 1000 km.

Ledeni pokrivač:

- čvrsta osnova: pouzdanost $1-5 \times 10^{-5} \text{ms}^{-2}$, prostorna razlučivost 50-100 km,
- vertikalno gibanje leda: pouzdanost 2 cm, prostorna razlučivost 100-1000 km.

Gradiometrijska mjerenja koja osigurava misija GOCE omogućuju kvalitetnije modeliranje Zemljina oblika. Problem određivanja Zemljina oblika temeljni je problem geodezije. Osim toga, GOCE znatno utječe na rješavanje više zadataka u geodeziji, od kojih su najvažniji (Hećimović i Bašić, 2005c):

- Dobivanje kvalitetnijeg modela Zemljina oblika. Očekuje se dobivanje globalnog geoida s pouzdanošću od 1 cm u prostornoj razlučivosti od 100 km. GOCE modeli sfernih harmonika razvijeni su od reda i stupnja 200 i više. Globalni geopotencijalni modeli dobiveni na osnovi samo satelitskih mjerenja, prije pojave modela CHAMP i GRACE, razvijani su maksimalno do reda i stupnja 71.
- Definiranje novog standarda primjene GPS nivelmana kojim bi se zamijenio klasični geometrijski nivelman. GPS-om se mogu dobiti vrlo kvalitetne elipsoidne visine. Da bi se pomoću elipsoidnih dobile ortometrijske visine, geoid treba poznavati s odgovarajućom pouzdanošću. Od GOCE modela očekuje se znatan doprinos u tom području.
- Unificiranje visinskih sustava na globalnoj razini sa centimetarskom pouzdanošću.
- Odvajanje inercijalnog signala i gravitacijskog signala pri inercijalnoj navigaciji. Žiroskop i akcelerometar osnovni su senzori inercijalnog sustava (engl. Inertial Measuring Unit, IMU), koji se montiraju na pomoćnu platformu. Akcelerometar mjeri ubrzanja koja su rezultanta ubrzanja pomične platforme i gravitacijskog ubrzanja. Ako se gravitacijsko ubrzanje ne može otkloniti iz mjerenja sa zadovoljavajućom pouzdanošću, ni ubrzanja gibanja pomične platforme ne mogu se pouzdano procijeniti.
- Pouzdanije određivanje putanje Zemljinih umjetnih satelita. Poboljšani model Zemljina gravitacijskog polja omogućava bolje modeliranje poremećaja putanje i bolje razumijevanje uzroka poremećaja putanje. To će osobito utjecati na kvalitetnije modeliranje putanje niskoletećih satelita. Novi model omogućava bolje odvajanje poremećaja zbog anomalnosti statičkog gravitacijskog polja i ostalih poremećajnih sila.

GOCE misija primjenjuje dvije osnovne tehnike mjerenja za prikupljanje podataka (Hećimović i Bašić, 2005c):

- satelitska gradiometrija (engl. Satellite Gravity Gradiometry, SSG),

- praćenje visoki-niski-satelit-satelit (engl. high-low satellite-to-satellite tracking, SST).

Proizvodi podataka misije GOCE odnose se na Zemljino gravitacijsko polje. Tri glavna proizvoda podataka su (Hećimović i Bašić, 2005c):

- druge derivacije gravitacijskog potencijala u putanji GOCE satelita,
- undulacije geoida,
- anomalije ubrzanja sile teže.

Proizvodi podataka misije GOCE podijeljeni su na skupine (Hećimović i Bašić, 2005c):

- sirovi satelitski podaci,
- razina 0: proizvodi podataka sadržavaju GOCE mjerenja kronološki kako su prikupljena uključujući i dodatne informacije (temperaturu, korekcije putanje, itd.),
- razina 1a: proizvodi podataka sadržavaju vremenske serije mjerenja sa svim dodatnim informacijama i pridruženim kalibracijskim podacima,
- razina 1b: proizvodi podataka sadržavaju potpune serije korigiranih i kalibriranih podataka,
- razina 2: proizvodi podataka sadržavaju globalni model potencijala Zemljina gravitacijskog polja u obliku koeficijenata sfernih harmonika, globalni model geoida, globalnu mrežu anomalija ubrzanja sile teže odnose se na fizičku površinu Zemlje te kao dodatak procjenu kvalitete podataka i regionalne modele geoida,
- razina 3: proizvodi podataka sadržavaju rezultate obrade koji će se dobiti kao proizvodi znanstvenih studija o čvrstoj Zemlji, cirkulaciji oceana, geodetskim studijama, dinamici gibanja leda i promjenama razine oceana.

5. Podaci i obrada podataka

5.1. Podaci

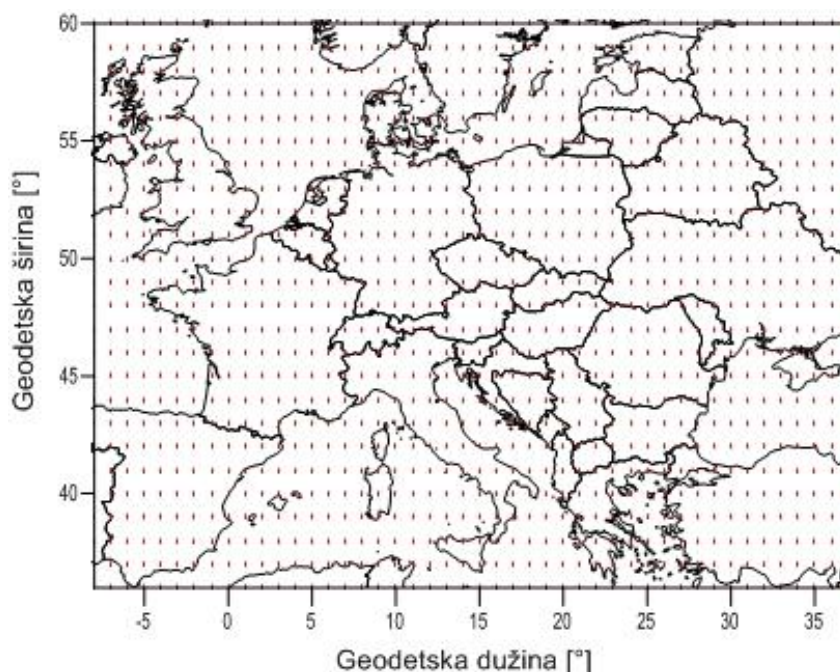
Koristeći servis ICGEM (International Center of Global Earth Models) izračunata su mjesečna rješenja modela geoida ITSG-Grace2014 u rasteru 1'x1' na području Europe (30°N-60°N i 8°W-37°E). Kao funkcional poremećajnog potencijala za vizualizaciju modela na području Europe odabrana je geoidna undulacija. Geoidna undulacija je pozitivna (iznad) ili negativna (ispod) udaljenost geoida od matematičkog referentnog elipsoida. Prema definiciji elipsoida u WGS84 (World Geodetic System 1984), geoidna undulacija predstavlja razliku između elipsoidne visine i ortometrijske visine.

5.2. Obrada podataka

5.2.1. Obrada podataka za područje Europe

U programskom sučelju Golden Software Surfer izrađeni su gridovi za mjesečna rješenja u periodu od veljače 2003. do lipnja 2014. godine. Potom je izračunata srednja vrijednost geoidnih undulacija u točkama za područje Europe u navedenom periodu. Od srednje vrijednosti za cijeli period oduzete su srednje vrijednosti svakog pojedinog mjeseca. Dobivene su varijacije geoidnih undulacija čijom se vizualizacijom razlike za svaki pojedini mjesec mogu bolje uočiti.

Za praćenje promjena geoida u točkama diljem Europe geoidna undulacija interpolirana je bilinearnom interpolacijom iz već dobivenih gridova modela geoida ITSG-Grace2014 za cijeli period promatranja, od veljače 2003. do lipnja 2014. godine. Odabrano je 1150 točaka na području Europe (slika 5.1) u kojima je praćena promjena geoida i proveden je postupak interpolacije geoidnih undulacija koristeći programsko sučelje MathWorks Matlab.



Slika 5.1: Prikaz točaka na području Europe

Kako bi rezultati bili vjerodostojnije prikazani, sistematski utjecaji uklonjeni su iz podataka mjerenja (uklanjanjem godišnjih i sezonskih efekata u Matlab-u, koristeći odgovarajuće funkcije). Tako dobiveni podaci su filtrirani i korišteni u daljnjoj analizi.

Kako bismo pojednostavnili analizu za tako veliki broj točaka, područje Europe podijeljeno je na šest regija: Zapadna, Sjeverna, Srednja, Južna, Istočna i Jugoistočna Europa. Svakoj pojedinoj regiji pripada odgovarajući broj točaka za koje je provedena interpolacija. U tim točkama određena je vrijednost undulacije za svih 137 mjeseci. Ako se odredi jedna srednja vrijednost u svakoj točki, i ako se od svakog mjeseca oduzme ta srednja vrijednost, dobije se varijacija geoidnih undulacija u pojedinoj točki. Sljedeći korak bio je za svaku regiju zbrojiti varijacije za određeni broj točaka koje toj regiji pripadaju i dobiti srednju vrijednost za svaki mjesec.

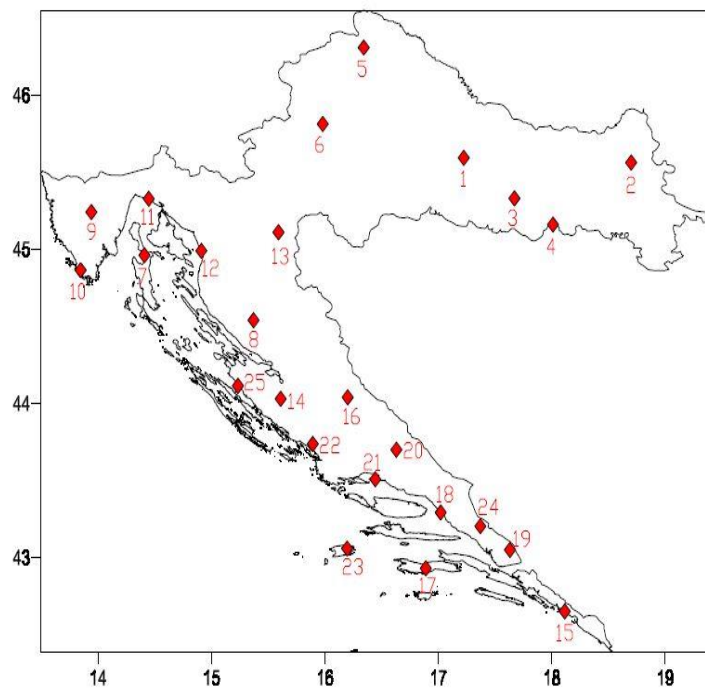
5.2.2. Obrada podataka za područje Republike Hrvatske

Za praćenje promjena geoida u točkama (gradovima) u Hrvatskoj potrebno je za te točke interpolirati vrijednosti geoidnih undulacija iz već dobivenih gridova modela geoida ITSG-Grace2014 za cijeli period promatranja, od veljače 2003. do lipnja 2014. godine. Odabrano je 25 gradova na teritoriju Republike Hrvatske u kojima je praćena promjena geoida i za koje je proveden prethodno opisan postupak interpolacije geoidnih undulacija koristeći programsko sučelje MathWorks Matlab.

Radi jednostavnosti, područje Republike Hrvatske podijeljeno je u tri regije: Unutrašnja, Središnja i Južna Hrvatska i svakoj od njih pripada određeni broj gradova (tablica 5.1, slika 5.2) za koje je provedena interpolacija. Za svaku lokaciju izračunata je srednja vrijednost geoidne undulacije s obzirom na koju su prikazane promjene kroz vrijeme. Tako definirane vrijednosti nazivamo varijacijama geoidnih undulacija. Sljedeći korak bio je za svaku regiju zbrojiti varijacije geoidnih undulacija za gradove koji toj regiji pripadaju i dobiti srednju vrijednost za svaki mjesec.

Tablica 5.1: Podjela gradova po regijama

| | |
|---------------------|---|
| UNUTRAŠNJA HRVATSKA | Daruvar (1), Osijek (2), Požega (3), Slavonski Brod (4), Varaždin (5), Zagreb (6) |
| SREDIŠNJA HRVATSKA | Cres (7), Gospić (8), Pazin (9), Pula (10), Rijeka (11), Senj (12), Slunj (13) |
| JUŽNA HRVATSKA | Benkovac (14), Dubrovnik (15), Knin (16), Korčula (17), Makarska (18), Metković (19), Sinj (20), Split (21), Šibenik (22), Vis (23), Vrgorac (24), Zadar (25) |



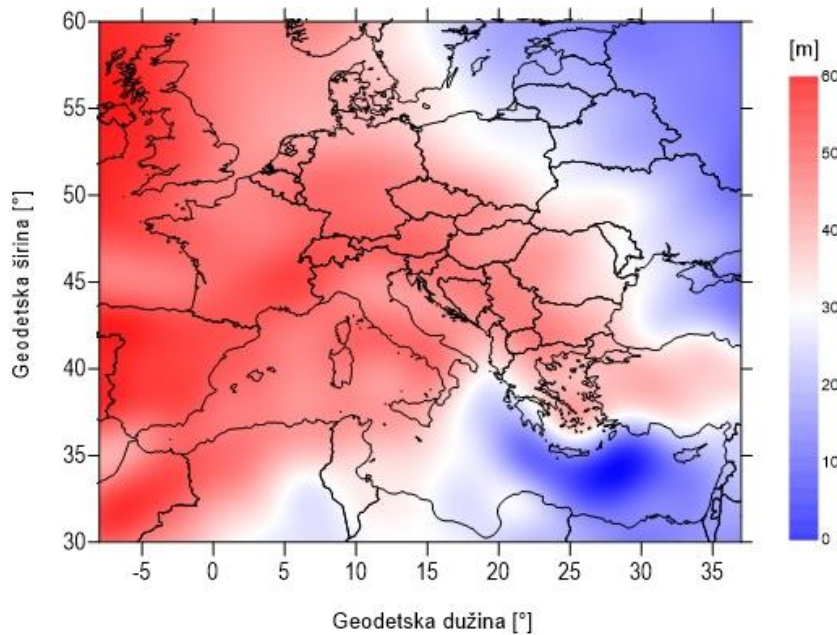
Slika 5.2: Prikaz gradova na području Republike Hrvatske

U službenom softveru T7D, DGU-a (Državna geodetska uprava), izračunate su geoidne undulacije koristeći službeni model geoida Republike Hrvatske, HRG2009. Pomoću servisa ICGEM izračunate su geoidne undulacije za modele geoida EIGEN-6C4, EGM2008 i ITSG-Grace2014 u rasteru 15'x15' geodetske širine 41°-48°N i geodetske dužine 12°-21°E, koji obuhvaća cijelo područje Republike Hrvatske. Za obradu podataka korišteno je programsko sučelje Golden Software Surfer. Dobiveni su gridovi za svaki od tih modela. Kako bi prikazali kako model geoida ITSG-Grace2014 odgovara za područje Republike Hrvatske usporedili smo ga s modelima HRG2009, EGM2008 i EIGEN-6C4. Dakle, od vrijednosti undulacija dobivenih iz modela ITSG-Grace2014 oduzete su vrijednosti sva tri modela i provedena je njihova usporedba i analiza.

6. Rezultati i analiza

6.1. Ispitivanje kvalitete modela geoida ITSG-Grace2014 na području Europe

Na slici 6.1 je grafički prikaz usrednjenih vrijednosti geoidnih undulacija u periodu od veljače 2003. do lipnja 2014. godine. Može se vidjeti da je geoidna undulacija pozitivna na cijelom području Europe što znači da je visina geoida iznad visine elipsoida. U tablici 6.1 dan je pregled statističkih pokazatelja. Vrijednosti geoidnih undulacija kreću se na području Europe od minimalnih 1 m do maksimalnih 58 m. Vrijednost standardnog odstupanja iznosi približno 12 m što je velika vrijednost, no to je očekivano s obzirom na velike varijacije u vrijednostima geoidnih undulacija.

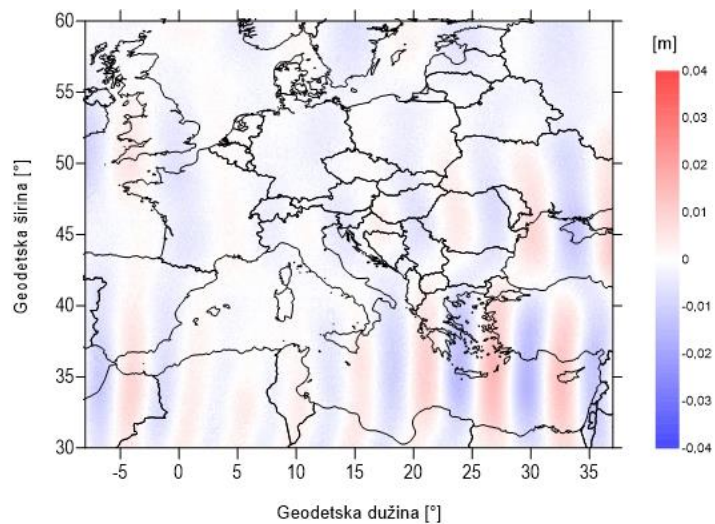


Slika 6.1: Grafički prikaz usrednjenih vrijednosti varijacija geoidnih undulacija na području Europe

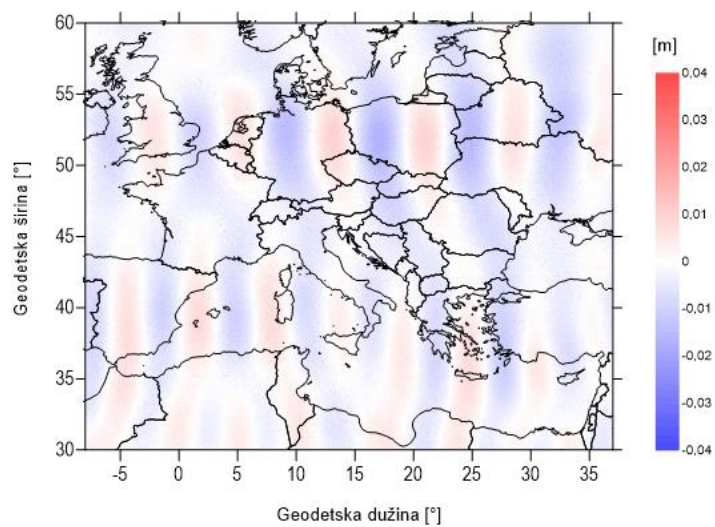
Tablica 6.1: Statistički pokazatelji usrednjenih vrijednosti varijacija geoidnih undulacija na području Europe

| Statistički pokazatelji | [m] |
|-------------------------|--------|
| MINIMUM | 0.967 |
| MAKSIMUM | 57.624 |
| STANDARDNO ODSUPANJE | 12.250 |
| SREDINA | 36.339 |

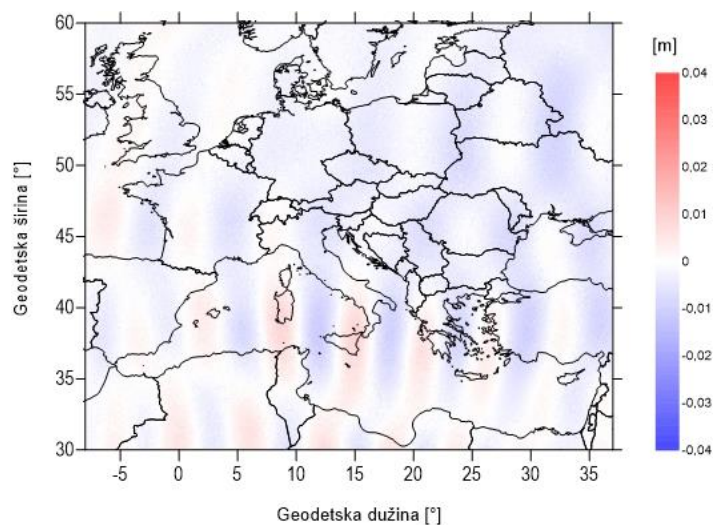
Na slikama 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 6.7, 6.8, 6.9, 6.10, 6.11, 6.12 i 6.13 grafički su prikazane vrijednosti varijacija geoidnih undulacija za dvanaest mjeseci na području Europe. Može se vidjeti da se vrijednosti varijacija uglavnom kreću oko nule, s obzirom da je gotovo na svim prikazima uglavnom većina područja bijele boje. Izuzetak su dva mjeseca, svibanj i rujan. Pretpostavka je da je to zbog toga što su tijekom ta dva mjeseca klimatske promjene izraženije, nego tijekom ostalih mjeseci. Samim tim dolazi i do promjene geoida.



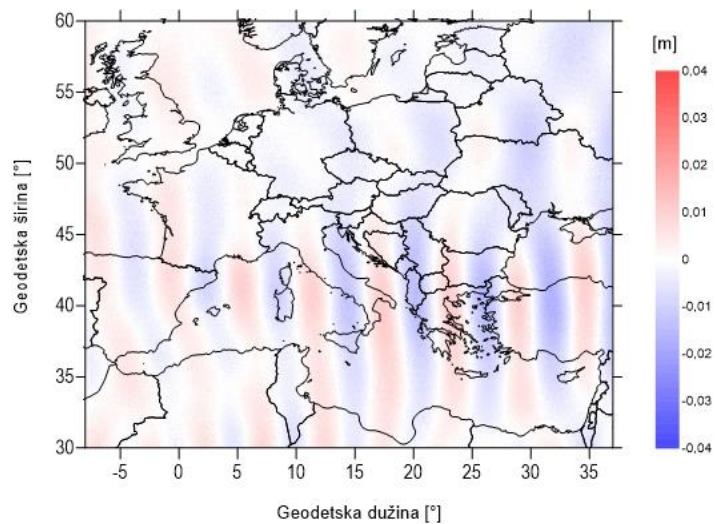
Slika 6.2: Varijacije geoidnih undulacija za siječanj na području Europe



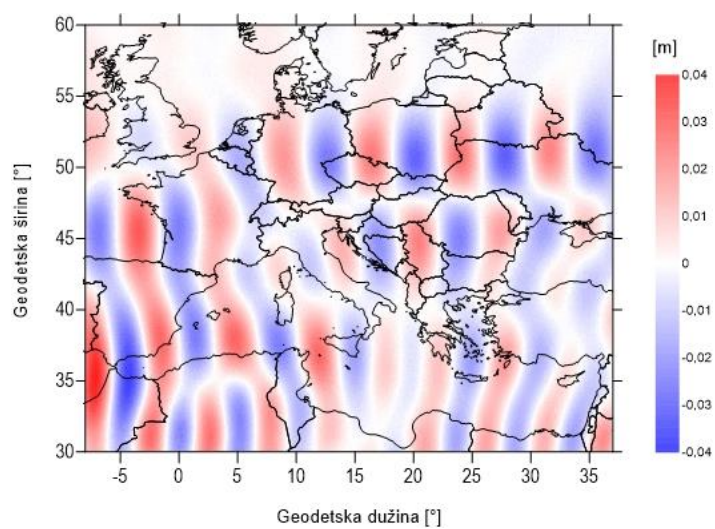
Slika 6.3: Varijacije geoidnih undulacija za veljaču na području Europe



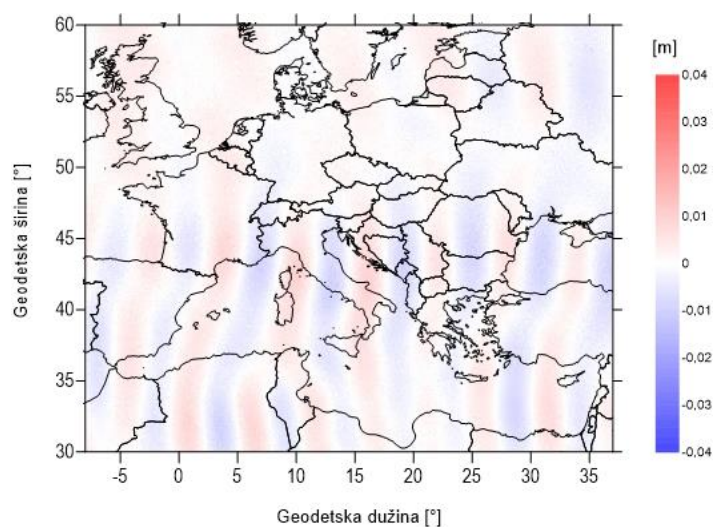
Slika 6.4: Varijacije geoidnih undulacija za ožujak na području Europe



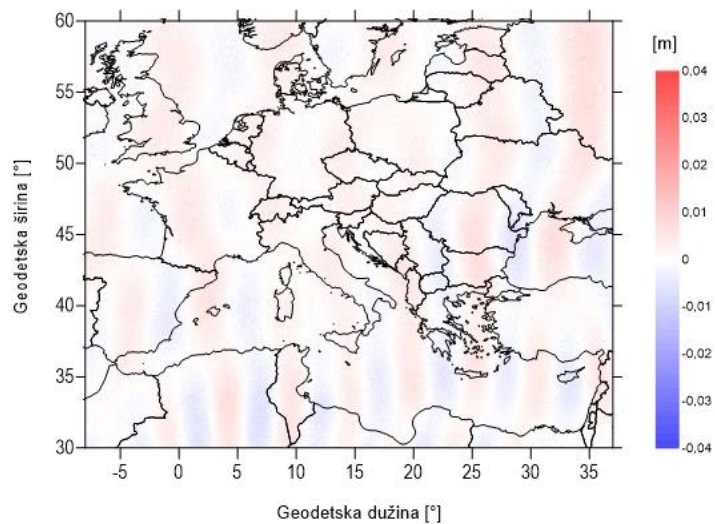
Slika 6.5: Varijacije geoidnih undulacija za travanj na području Europe



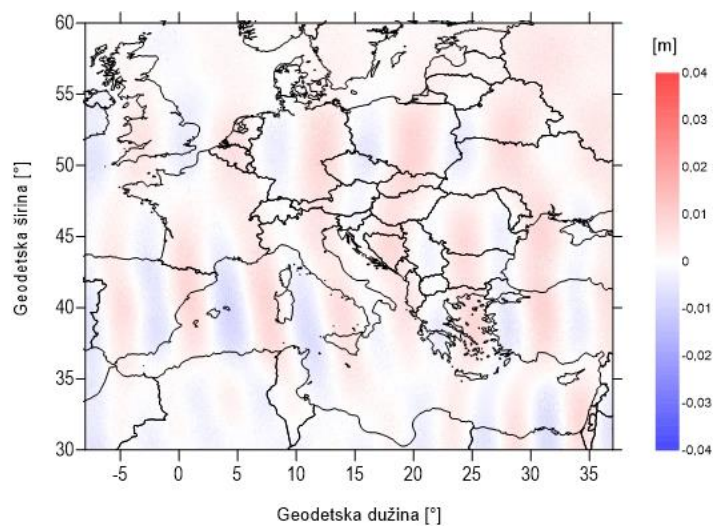
Slika 6.6: Varijacije geoidnih undulacija za svibanj na području Europe



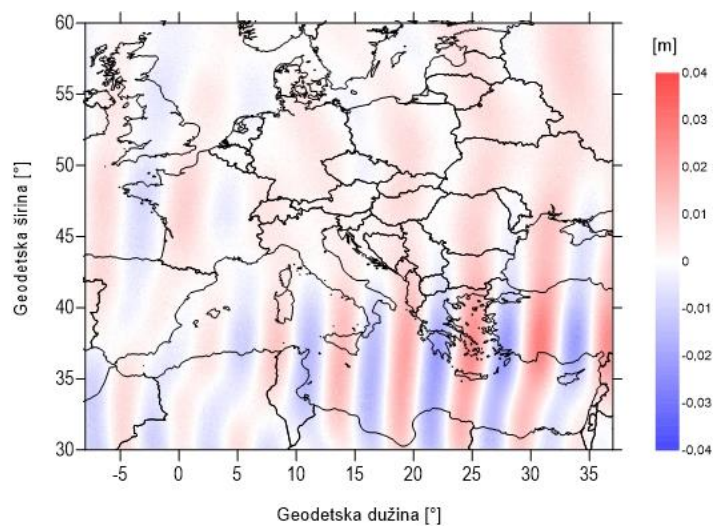
Slika 6.7: Varijacije geoidnih undulacija za lipanj na području Europe



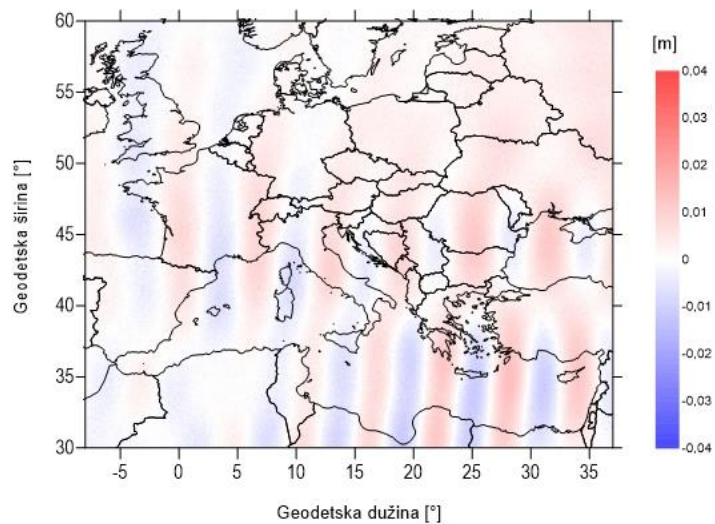
Slika 6.8: Varijacije geoidnih undulacija za srpanj na području Europe



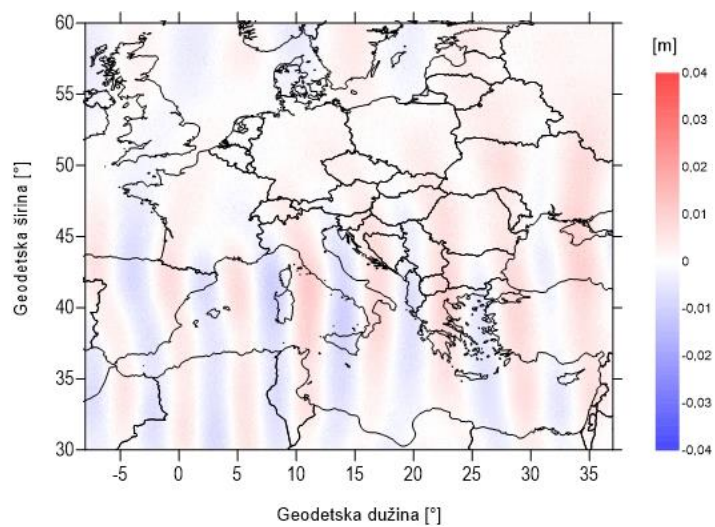
Slika 6.9: Varijacije geoidnih undulacija za kolovoz na području Europe



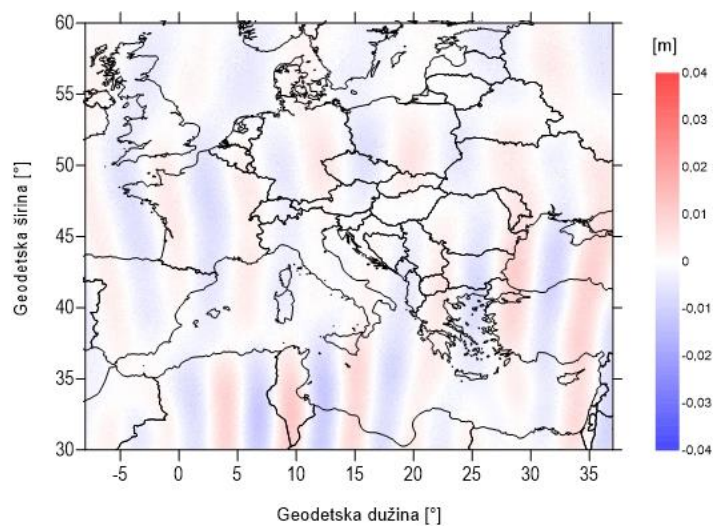
Slika 6.10: Varijacije geoidnih undulacija za rujan na području Europe



Slika 6.11: Varijacije geoidnih undulacija za listopad na području Europe



Slika 6.12: Varijacije geoidnih undulacija za studeni na području Europe



Slika 6.13: Varijacije geoidnih undulacija za prosinac na području Europe

U tablici 6.2 dan je pregled statističkih pokazatelja za dvanaest mjeseci. Vrijednosti varijacija geoidnih undulacija variraju od minimalnih -3 cm do maksimalnih 4 cm. Sredina definira srednju vrijednost varijacija geoidnih undulacija pa je iz tablice vidljivo da te vrijednosti variraju od -1 mm do 1 mm. Osim toga, najveće standardno odstupanje ima mjesec svibanj te nešto manje rujan, dok su standardna odstupanja ostalih mjeseci približno jednaka. Kao što je već prethodno navedeno, pretpostavlja se da je to zbog činjenice što se tijekom svibnja i rujna događaju najveće klimatske promjene pa samim tim dolazi i do većih razlika u geoidnim undulacijama u odnosu na ostale mjesece.

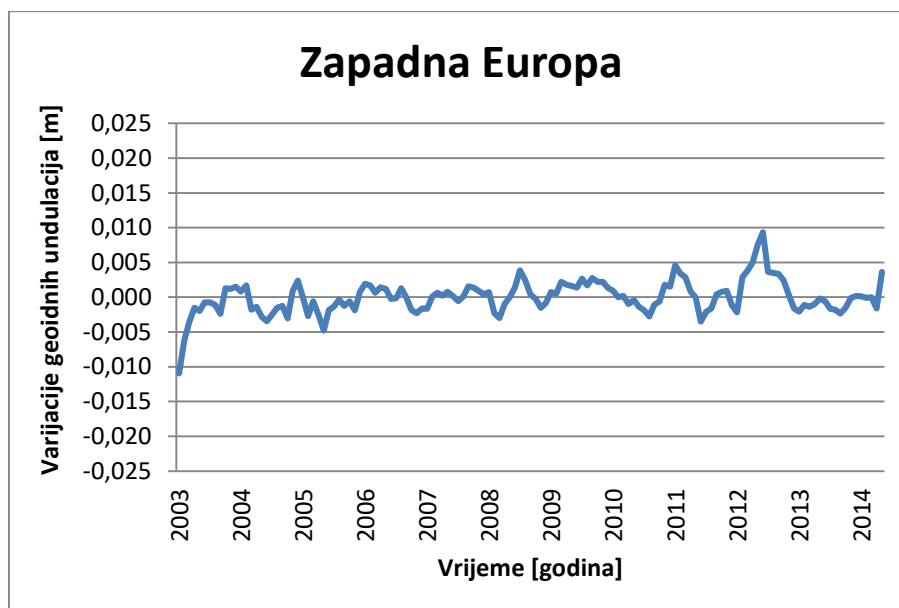
Tablica 6.2: Statistički pokazatelji usrednjenih vrijednosti varijacija geoidnih undulacija svih mjeseci na području Europe

| Statistički pokazatelji | MINIMUM [m] | MAKSIMUM [m] | SREDINA [m] | STANDARDNO ODSTUPANJE [m] |
|-------------------------|-------------|--------------|-------------|---------------------------|
| Siječanj | -0,012 | 0,013 | -0,001 | 0,003 |
| Veljača | -0,013 | 0,009 | -0,001 | 0,003 |
| Ožujak | -0,009 | 0,008 | -0,001 | 0,002 |
| Travanj | -0,013 | 0,009 | -0,001 | 0,003 |
| Svibanj | -0,031 | 0,036 | 0,000 | 0,009 |
| Lipanj | -0,009 | 0,009 | 0,000 | 0,003 |
| Srpanj | -0,006 | 0,007 | 0,001 | 0,002 |
| Kolovoz | -0,008 | 0,009 | 0,001 | 0,002 |
| Rujan | -0,017 | 0,022 | 0,001 | 0,005 |
| Listopad | -0,010 | 0,011 | 0,001 | 0,003 |
| Studeni | -0,009 | 0,010 | 0,001 | 0,003 |
| Prosinac | -0,010 | 0,010 | 0,000 | 0,003 |

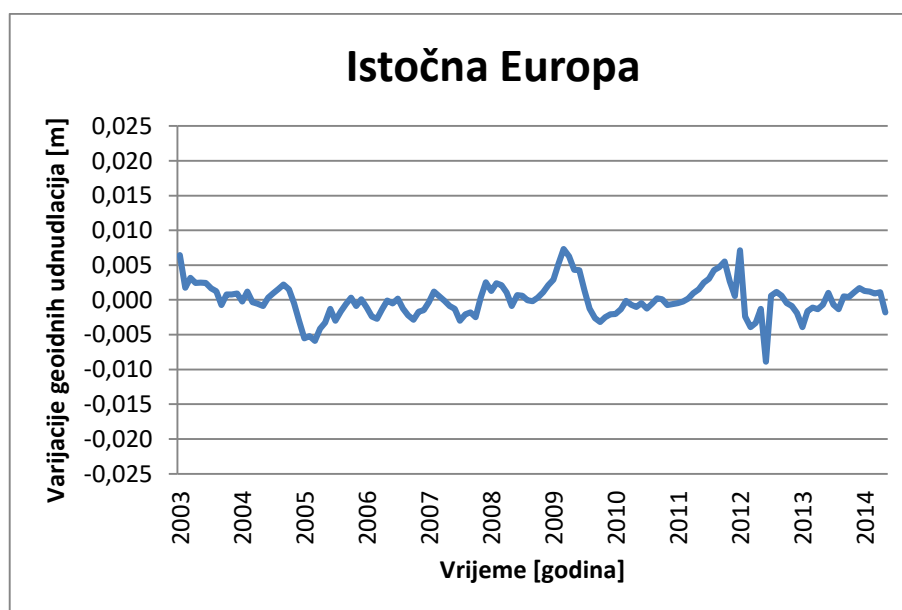
6.2. Regionalna promjena modela geoida ITSG-Grace2014 na području Europe

Promjene usrednjenih vrijednosti varijacija geoidnih undulacija prikazane na slikama 6.14, 6.15, 6.16, 6.17, 6.18 i 6.19 predstavljaju regionalnu promjenu geoida na području Europe. Vidljivo je kako u 2012. godini postoje "skokovi" na grafovima koji ukazuju na odstupanje od srednje vrijednosti varijacija geoidnih undulacija. Uzrok su predstavljale velike količine

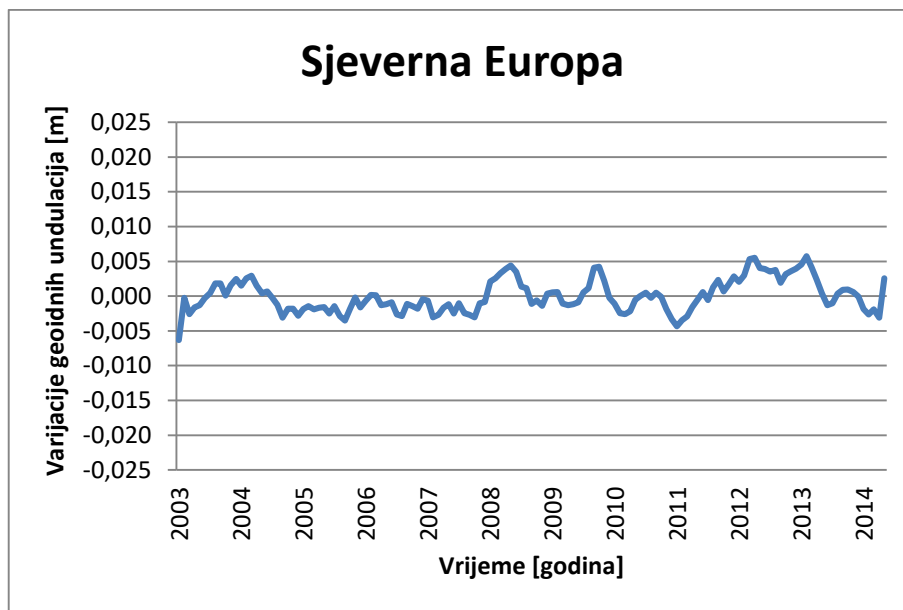
snijega u Istočnoj, Srednjoj, Jugoistočnoj i Južnoj Europi, čijim otapanjem je došlo do poplava.



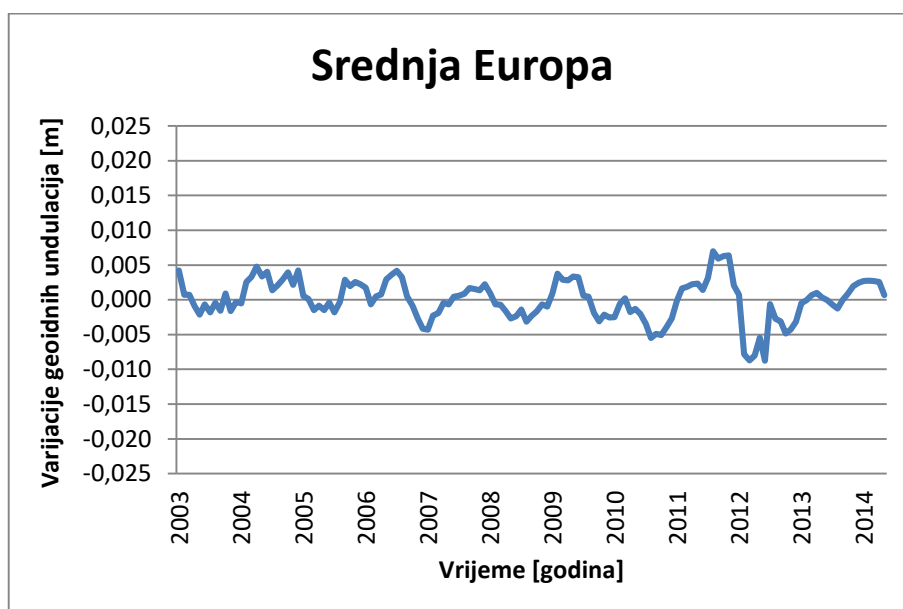
Slika 6.14: Promjene usrednjenih vrijednosti varijacija geoidnih undulacija na području Zapadne Europe



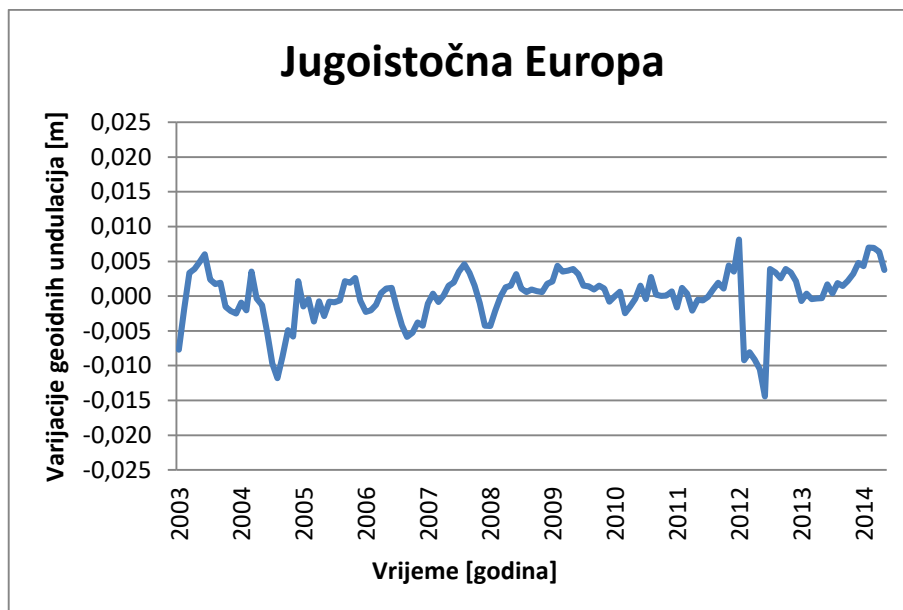
Slika 6.15: Promjene usrednjenih vrijednosti varijacija geoidnih undulacija na području Istočne Europe



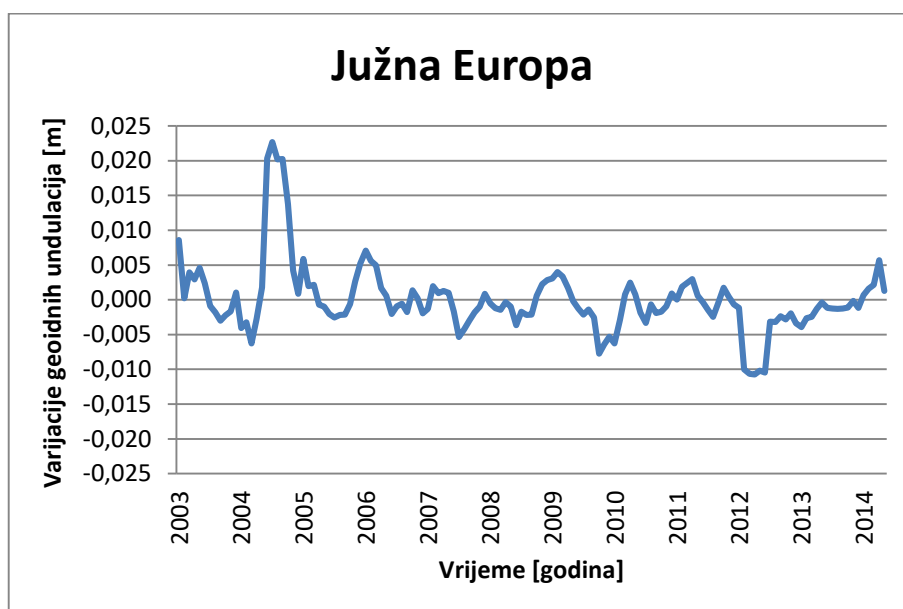
Slika 6.16: Promjene usrednjenih vrijednosti varijacija geoidnih undulacija na području Sjeverne Europe



Slika 6.17: Promjene usrednjenih vrijednosti varijacija geoidnih undulacija na području Srednje Europe



Slika 6.18: Promjene usrednjenih vrijednosti varijacija geoidnih undulacija na području Jugoistočne Europe



Slika 6.19: Promjene usrednjenih vrijednosti varijacija geoidnih undulacija na području Južne Europe

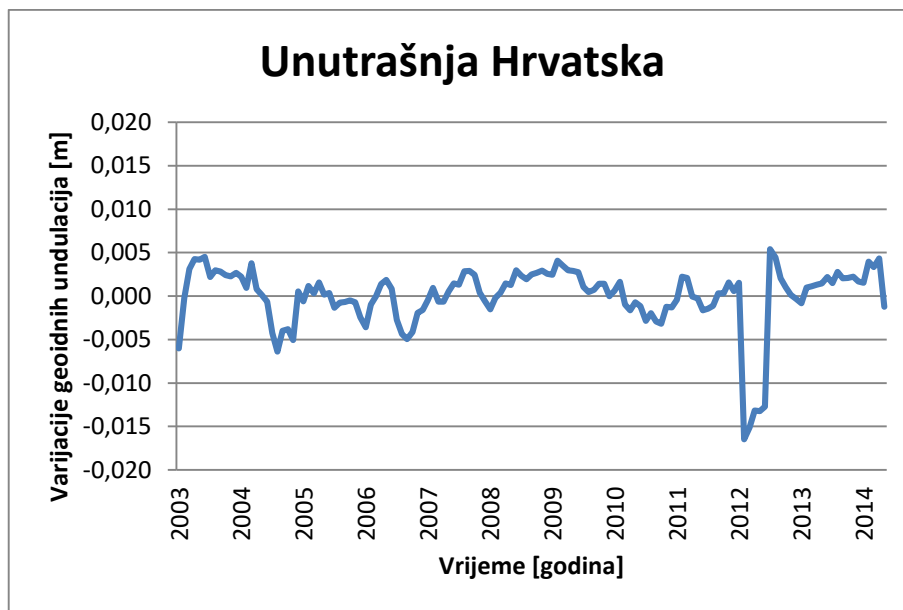
U tablici 6.3 dan je pregled statističkih pokazatelja za pojedinu regiju. Vrijednosti varijacija geoidnih undulacija variraju od minimalnih -1,5 cm do maksimalnih 1 cm. Pri tome Sjeverna Europa malo odstupa od ostalih regija, s obzirom da se vrijednosti kreću od minimalnih -0,6 cm do maksimalnih 0,6 cm. Sredina definira srednju vrijednost varijacija geoidnih undulacija pa je iz tablice vidljivo da te vrijednosti variraju oko nule za svaku pojedinu regiju. Osim toga, vidljivo je da najveće standardno odstupanje ima Južna Europa te nešto manje Jugoistočna, dok su standardna odstupanja ostalih regija približno jednaka.

Tablica 6.3: Statistički pokazatelji usrednjenih vrijednosti varijacija geoidnih undulacija za sve regije

| Statistički pokazatelji | MINIMUM [m] | MAKSIMUM [m] | SREDINA [m] | STANDARDNO ODSTUPANJE [m] |
|-------------------------|-------------|--------------|-------------|---------------------------|
| Zapadna Europa | -0,011 | 0,009 | 0,000 | 0,002 |
| Istočna Europa | -0,009 | 0,007 | 0,000 | 0,002 |
| Sjeverna Europa | -0,006 | 0,006 | 0,000 | 0,002 |
| Srednja Europa | -0,009 | 0,007 | 0,000 | 0,003 |
| Jugoistočna Europa | -0,014 | 0,008 | 0,000 | 0,004 |
| Južna Europa | -0,011 | 0,023 | 0,000 | 0,005 |

6.3. Regionalna promjena modela geoida ITSG-Grace2014 na području Republike Hrvatske

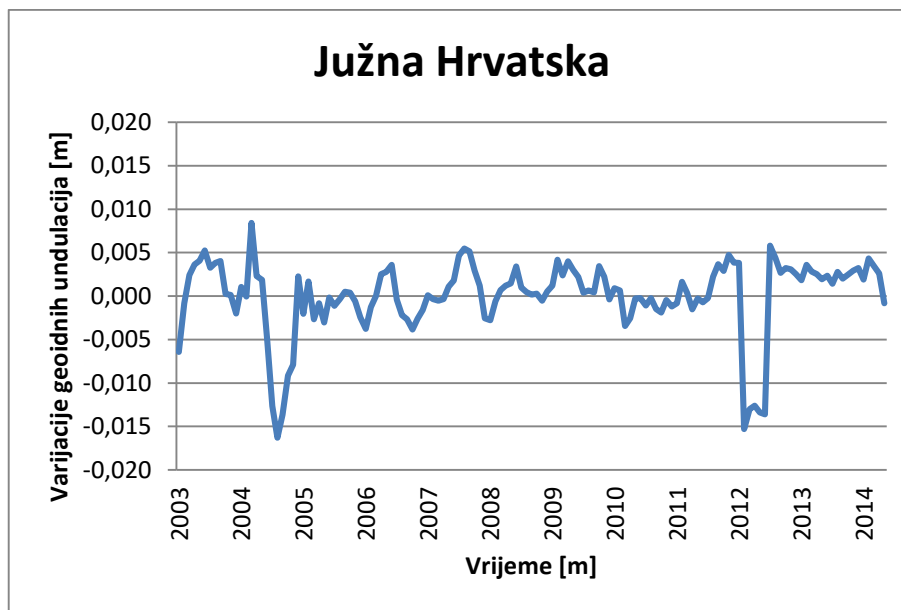
Promjene usrednjenih vrijednosti varijacija geoidnih undulacija prikazane na slikama 6.20, 6.21 i 6.22 predstavljaju regionalnu promjenu geoida. Za razliku od Europe, u Hrvatskoj je situacija malo drugačija. 2012. godine u Unutrašnjoj i Južnoj Hrvatskoj dolazi do velikih poplava zbog otapanja snijega, ali i jakih kiša te jakog vjetera koji utječe na razinu mora. S druge strane te iste godine, u Središnjoj Hrvatskoj javljaju se suše zbog nedostatka oborina u proljetnim i ljetnim mjesecima. Ista situacija s poplavama javlja se u Južnoj Hrvatskoj sredinom 2004. godine.



Slika 6.20: Promjene usrednjenih vrijednosti varijacija geoidnih undulacija za područje Unutrašnje Hrvatske



Slika 6.21: Promjene usrednjenih vrijednosti varijacija geoidnih undulacija za područje Središnje Hrvatske



Slika 6.22: Promjene usrednjenih vrijednosti varijacija geoidnih undulacija za područje Južne Hrvatske

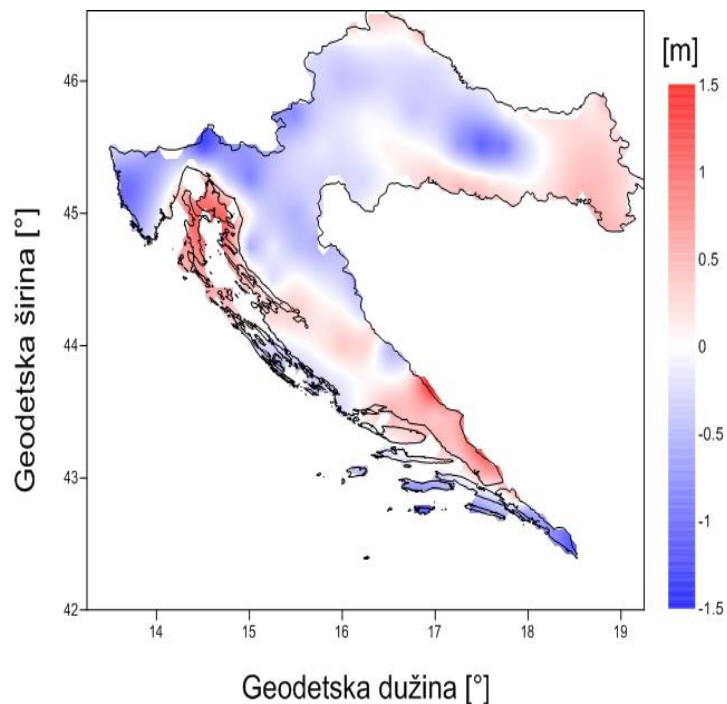
U tablici 6.4 dan je pregled statističkih pokazatelja za pojedinu regiju. Vrijednosti varijacija geoidnih undulacija kreću se od minimalnih -1,6 cm do maksimalnih 1 cm. Izuzetak je Središnja Hrvatska čije se minimalne vrijednosti kreću od -0,5 cm, dok se maksimalne kreću do 1,5 cm. Pretpostavljamo da je to zbog velikih suša u tom dijelu Hrvatske. Sredina definira srednju vrijednost varijacija geoidnih undulacija pa je iz tablice vidljivo da te vrijednosti variraju oko nule za svaku pojedinu regiju. Osim toga, može se vidjeti da najveće standardno odstupanje ima Južna Hrvatska, dok su standardna odstupanja ostalih dviju regija jednaka.

Tablica 6.4: Statistički pokazatelji usrednjenih vrijednosti varijacija geoidnih undulacija za sve regije Republike Hrvatske

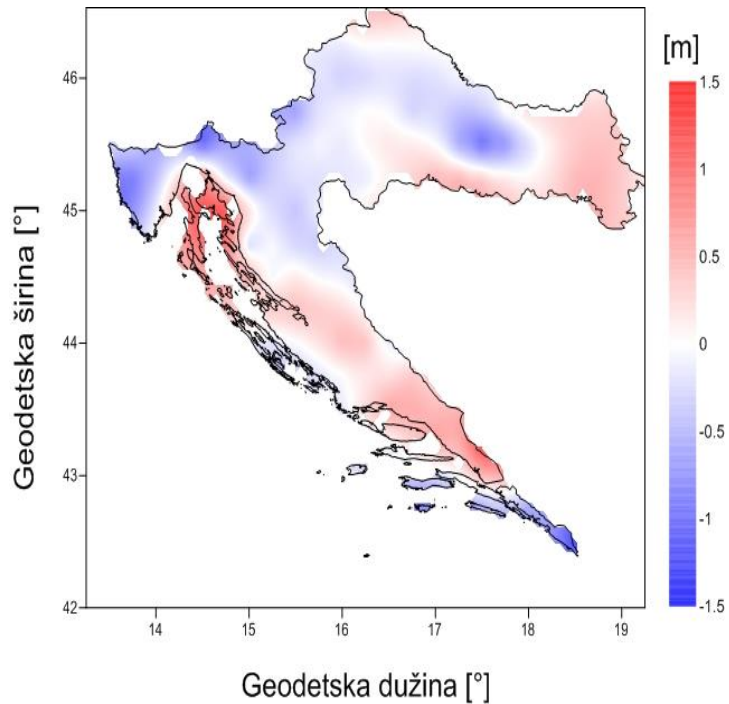
| Statistički pokazatelji | MINIMUM [m] | MAKSIMUM [m] | SREDINA [m] | STANDARDNO ODSTUPANJE [m] |
|-------------------------|-------------|--------------|-------------|---------------------------|
| Unutrašnja Hrvatska | -0,016 | 0,005 | 0,000 | 0,003 |
| Središnja Hrvatska | -0,005 | 0,015 | 0,000 | 0,003 |
| Južna Hrvatska | -0,016 | 0,008 | 0,000 | 0,004 |

6.4. Ispitivanje kvalitete modela geoida ITSG-Grace2014 na području Republike Hrvatske

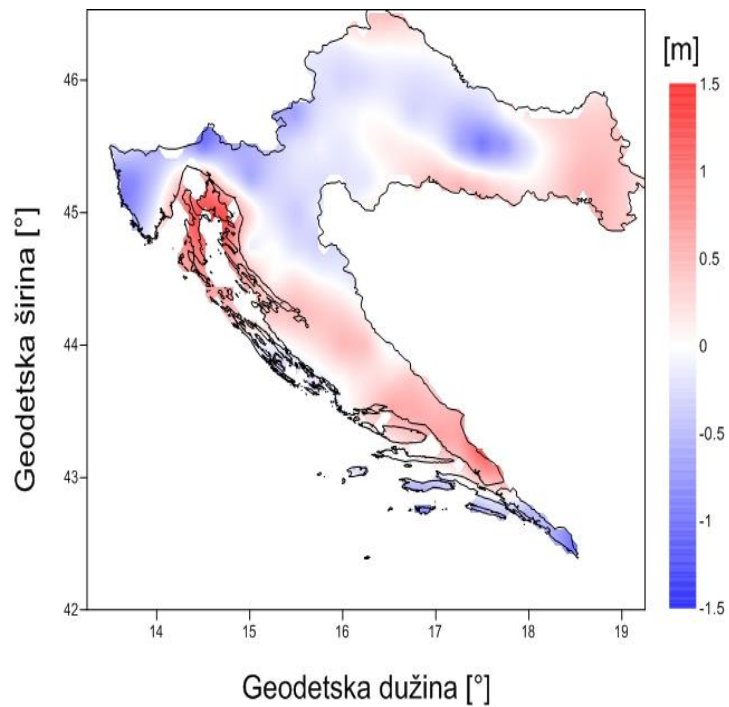
Na slikama 6.23, 6.24 i 6.25 prikazane su razlike geoidnih undulacija izabranih modela geoida u odnosu na model geoida ITSG-Grace2014. Vidljivo je da se vrijednosti razlika geoidnih undulacija kreću od minimalnih -1,5 m do maksimalnih 1,5 m. Također, vidi se da model geoida ITSG-Grace2014 najviše odstupa od modela geoida HRG2009. To je bilo očekivano, s obzirom da je model geoida HRG2009 referentni model geoida za područje Republike Hrvatske. S druge strane, model geoida ITSG-Grace2014 manje odstupa od modela geoida EGM2008 i EIGEN-6C4 koji su referentni modeli za područje Europe.



Slika 6.23: Razlike geoidnih undulacija modela ITSG-Grace2014 i HRG2009 na području Republike Hrvatske



Slika 6.24: Razlike geoidnih undulacija modela ITSG-Grace2014 i EGM2008 na području Republike Hrvatske



Slika 6.25: Razlike geoidnih undulacija modela ITSG-Grace2014 i EIGEN-6C4 na području Republike Hrvatske

Statistički pokazatelji razlika geoidnih undulacija na području Republike Hrvatske prikazani su u tablici 6.5. Iz tablice je vidljivo da najveće standardno odstupanje ima razlika modela geoida ITSG-Grace2014 i HRG2009, dok su standardna odstupanja razlika modela geoida EGM2008 i EIGEN-6C4 manja. Također, razlika modela geoida ITSG-Grace2014 i HRG2009 ima najveću minimalnu i maksimalnu vrijednost.

Tablica 6.5: Statistički pokazatelji vrijednosti razlika geoidnih undulacija na području Republike Hrvatske

| Statistički pokazatelji | MINIMUM [m] | MAKSIMUM [m] | SREDINA [m] | STANDARDNO ODSUPANJE [m] |
|--------------------------|-------------|--------------|-------------|--------------------------|
| ITSG-Grace2014-HRG2009 | -1,086 | 1,414 | -0,059 | 0,356 |
| ITSG-Grace2014-EGM2008 | -1,022 | 1,013 | 0,015 | 0,324 |
| ITSG-Grace2014-EIGEN-6C4 | -0,838 | 1,080 | 0,036 | 0,326 |

7. Zaključak

Podaci satelitskih misija CHAMP, GRACE i GOCE omogućili su kontinuirano praćenje promjena ubrzanja sile teže na globalnoj razini čime je omogućen značajan razvoj geodezije i povezanih znanstvenih područja. U sklopu ovog rada analizirane su regionalne promjene geoida iz mjesečnih podataka GRACE misije na području Europe s posebnim osvrtom na područje Republike Hrvatske. Iz mjesečnih podataka vidljive su promjene koje ukazuju na promjene geoida nastalih uslijed dinamičkih procesa u čvrstoj Zemlji i njezinom tekućem omotaču (promjene Zemljina oblika, uključujući površinu vode i leda) u periodu od veljače 2003. do lipnja 2014. godine. Iznosi varijacija pokazuju da su se u promatranom vremenskom periodu događale klimatske promjene koje su rezultirale povećanjem ili smanjenjem geoidne undulacije. Točnost modela trebala bi rasti porastom reda i stupnja razvoja u red po sfernim funkcijama. Pouzdanost nekog globalnog geopotencijalnog modela nije homogena na području cijele Zemlje, već ovisi o gustoći i kvaliteti podataka za područje od interesa. U ovom radu ispitana je kvaliteta modela geoida ITSG-Grace2014 na području Republike Hrvatske. Napravljena je usporedba modela geoida ITSG-Grace2014 s modelima geoida HRG2009, EGM2008 i EIGEN-6C4. Standardno odstupanje dobiveno iz razlika geoidnih undulacija na području Republike Hrvatske pokazuje da model geoida ITSG-Grace2014 najviše odstupa od modela geoida HRG2009 koji je referentni za područje Republike Hrvatske. Također odstupa i od modela geoida EGM2008 i EIGEN-6C4, ali u manjoj mjeri.

Možemo zaključiti da satelitske misije imaju značajan doprinos u području geodezije. Njihovim praćenjem mogu se otkriti promjene nastale u čvrstoj Zemlji i njezinom tekućem omotaču, može se objasniti njihov nastanak i na vrijeme predvidjeti ponašanje Zemlje.

Zahvala

Zahvaljujemo mentoru prof. dr. sc. Tomislavu Bašiću na iskazanom povjerenju i pruženoj prilici da sudjelujemo na natječaju za dodjelu Rektorove nagrade.

Veliko hvala asistentu dr. sc. Marijanu Grgiću na vodstvu, utrošenom vremenu i trudu, bezuvjetnoj podršci i ugodnom druženju tijekom izrade ovog rada.

Hvala asistentu dr. sc. Marku Pavasoviću na savjetima za korekciju završne verzije rada.

Literatura

- Barthelmes, F. (2014):** Global Models. Encyclopedia of Geodesy, Grafarend E. (ur.), Springer International Publishing Switzerland.
- Barthelmes, F. (2013):** Definition of Functionals of the Geopotential and Their Calculation from Spherical Harmonic Models: Theory and formulas used by the calculation service of the International Centre for Global Earth Models (ICGEM), Znanstveni tehnički izvještaj STR09/02, Revidirano izdanje, Siječanj 2013, GeoForschungZentrum Potsdam.
- Bašić, T. (2011):** Značaj fizikalnih parametara u redukciji mjerenih veličina s fizičke površine Zemlje na plovu elipsoida, Državna izmjera, 2. auditorne vježbe, Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.
- Bašić, T., Bjelotomić, O. (2014):** HRG2009: New High Resolution Geoid Model for Croatia. Gravity, Geoid and Height Systems: Proceedings of the IAG Symposium GGHS2012, October 9-12, 2012., Venice, Italy str. 187-191, Springer International Publishing.
- Förste, C., Bruinsma, S. L., Abrikosov, O., Lemoine, J.-M., Marty, J. C., Flechtner, F., Balmino, G., Barthelmes, F., Biancale, R. (2015):** EIGEN-6C4 The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 2190 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse.
- Gilardoni, M., Reguzzoni, M., Sampitro D. (2016):** GECO: a global gravity model by locally combining GOCE data and EGM2008, Studia Geophysica et Geodaetica, Svezak br. 60, Izdanje br. 2, str 228-247.
- Gonzalez, E. (2002):** UT professor first non-NASA employee to direct mission, The Dayly Texan, Mar. 06, 2002.
- Gruber, Th., Rummel, R., Abrikosov, O., van Hees, R. (2008):** GOCE Level 2 Product Data Handbook.
- Hećimović, Ž., Bašić, T. (2005a):** Satelitska misija CHALLENGING Minisatellite Payload (CHAMP), Geodetski list, 2, str. 129-147, Zagreb.
- Hećimović, Ž., Bašić, T. (2005b):** Satelitska misija Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE), Geodetski list, 3, str. 181-197, Zagreb.

- Hećimović, Ž., Bašić, T. (2005c):** Satelitska misija Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer (GOCE), Geodetski list, 2, str. 253-265, Zagreb.
- Hećimović, Ž., Bašić, T. (2003):** Globalni geopotencijalni modeli na teritoriju Hrvatske, Geodetski list, 2, str. 73-89, Zagreb.
- Kostelecký, J., Klokočník, J., Bucha, B., Bezděk, A., Förste, C. (2015):** Evaluation of the gravity field model EIGEN-6C4 in comparison with EGM2008 by means of various functions of the gravity potential and by GNSS/levelling, Geoinformatics FCE CTU, br.14, izdanje br.1, str.7-27.
- Kvas, A., Mayer-Gürr, T., Zehentner, N., Klinger, B. (2015):** The ITSG-Grace2014 Gravity Field Model, Conference Paper, Conference: EGU General Assembly 2015, Vienna, Austria.
- Markovinović, D. (2010):** Globalni geopotencijalni modeli, Fizikalna geodezija, 3. auditorne vježbe, Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.
- Mayer-Gürr, T. (2007):** ITG-Grace03s: The latest GRACE gravity field solution computed in Bonn, Prezentirano na Joint International GSTM and SPP Symposium, Potsdam, Germany, 15. - 17. Listopada.
- Mulić, M., Đonlagić, E. (2012):** Gravitacijske satelitske misije, Geodetski Glasnik, 46, str. 5-20, Sarajevo.
- NASA (2005):** CALIPSO, CloudSat, GRACE - Science Writer's Guide, Science Mission Directorate.
- NASA (2002):** GRACE Launch, Press kit, March 2002.
- Pavasović, M. (2007):** Analiza globalnih geopotencijalnih modela reda i stupnja do 360 na području Republike Hrvatske, Ekscentar, br. 10, str. 70-78, Zagreb.
- Pavlis, N., Holmes, S., Kenyon, S., Factor, J. K. (2012):** The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008), Journal of Geophysical Research, Svezak br. 117.

Tapley, B.D., Bettadpur, S., Watkins, M., Reigber, C. (2004): The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results, *Geophysical Research Letters*, vol.31.

Torge, W. (2001): *Geodesy*, Walter de Gruyter, New York, 2. izdanje.

Torge, W. (1989): *Gravimetry*, Walter de Gruyter, Berlin-New York.

Popis URL-ova:

URL-1: ITSG-Grace2014,

<https://www.tugraz.at/institute/ifg/downloads/gravity-field-models/itsg-grace2014/>,

(10.04.2017.)

URL-2: CHAMP: Ground segment and Data/Product Flow,

<http://www-app2.gfz-potsdam.de/pb1/op/champ/>, (20.04.2017.)

URL-3: GFZ-GRACE,

<http://isdc.gfz-potsdam.de/grace-isdc/>, (08.04.2017.)

URL-4: GRACE,

<http://www.csr.utexas.edu/grace/>, (09.04.2017.)

URL-5: JPL- GRACE,

<https://podaac.jpl.nasa.gov/GRACE>, (09.04.2017.)

URL-6: GRACE Follow-on Mission.

<http://grace.anu.edu.au/>, (09.04.2017.)

URL-7: GRACE Follow-on,

https://esto.nasa.gov/news/news_GraceFollowOn.html, (09.04.2017.)

Popis slika

| | |
|---|----|
| Slika 2.1: Neparalelnost nivo ploha | 3 |
| Slika 3.1: Zonalni ($n=12$, $m=0$), teseralni ($n=12$, $m=6$) i sektorijalni ($n=m=12$) sferni harmonici..... | 5 |
| Slika 4.1: Dva GRACE satelita u orbiti | 12 |
| Slika 4.2: Prikaz poboljšanog instrumentarija GRACE FO misije | 17 |
| Slika 5.1: Prikaz točaka na području Europe | 22 |
| Slika 5.2: Prikaz gradova na području Republike Hrvatske..... | 23 |
| Slika 6.1: Grafički prikaz usrednjenih vrijednosti varijacija geoidnih undulacija na području Europe | 25 |
| Slika 6.2: Varijacije geoidnih undulacija za siječanj na području Europe..... | 26 |
| Slika 6.3: Varijacije geoidnih undulacija za veljaču na području Europe | 26 |
| Slika 6.4: Varijacije geoidnih undulacija za ožujak na području Europe | 26 |
| Slika 6.5: Varijacije geoidnih undulacija za travanj na području Europe | 27 |
| Slika 6.6: Varijacije geoidnih undulacija za svibanj na području Europe..... | 27 |
| Slika 6.7: Varijacije geoidnih undulacija za lipanj na području Europe | 27 |
| Slika 6.8: Varijacije geoidnih undulacija za srpanj na području Europe | 28 |
| Slika 6.9: Varijacije geoidnih undulacija za kolovoz na području Europe | 28 |
| Slika 6.10: Varijacije geoidnih undulacija za rujanj na području Europe..... | 28 |
| Slika 6.11: Varijacije geoidnih undulacija za listopad na području Europe | 29 |
| Slika 6.12: Varijacije geoidnih undulacija za studeni na području Europe..... | 29 |
| Slika 6.13: Varijacije geoidnih undulacija za prosinac na području Europe..... | 29 |
| Slika 6.14: Promjene usrednjenih vrijednosti varijacija geoidnih undulacija na području Zapadne Europe..... | 31 |

| | |
|---|----|
| Slika 6.15: Promjene usrednjenih vrijednosti varijacija geoidnih undulacija na području Istočne Europe..... | 31 |
| Slika 6.16: Promjene usrednjenih vrijednosti varijacija geoidnih undulacija na području Sjeverne Europe | 32 |
| Slika 6.17: Promjene usrednjenih vrijednosti varijacija geoidnih undulacija na području Srednje Europe | 32 |
| Slika 6.18: Promjene usrednjenih vrijednosti varijacija geoidnih undulacija na području Jugoistočne Europe | 33 |
| Slika 6.19: Promjene usrednjenih vrijednosti varijacija geoidnih undulacija na području Južne Europe | 33 |
| Slika 6.20: Promjene usrednjenih vrijednosti varijacija geoidnih undulacija za područje Unutrašnje Hrvatske | 35 |
| Slika 6.21: Promjene usrednjenih vrijednosti varijacija geoidnih undulacija za područje Središnje Hrvatske..... | 35 |
| Slika 6.22: Promjene usrednjenih vrijednosti varijacija geoidnih undulacija za područje Južne Hrvatske | 36 |
| Slika 6.23: Razlike geoidnih undulacija modela ITSG-Grace2014 i HRG2009 na području Republike Hrvatske | 37 |
| Slika 6.24: Razlike geoidnih undulacija modela ITSG-Grace2014 i EGM2008 na području Republike Hrvatske | 38 |
| Slika 6.25: Razlike geoidnih undulacija modela ITSG-Grace2014 i EIGEN-6C4 na području Republike Hrvatske | 38 |

Popis tablica

| | |
|---|----|
| Tablica 5.1: Podjela gradova po regijama | 23 |
| Tablica 6.1: Statistički pokazatelji usrednjenih vrijednosti varijacija geoidnih undulacija na području Europe | 25 |
| Tablica 6.2: Statistički pokazatelji usrednjenih vrijednosti varijacija geoidnih undulacija svih mjeseci na području Europe | 30 |
| Tablica 6.3: Statistički pokazatelji usrednjenih vrijednosti varijacija geoidnih undulacija za sve regije | 34 |
| Tablica 6.4: Statistički pokazatelji usrednjenih vrijednosti varijacija geoidnih undulacija za sve regije Republike Hrvatske..... | 36 |
| Tablica 6.5: Statistički pokazatelji vrijednosti razlika geoidnih undulacija na području Republike Hrvatske | 39 |

Analiza vremenskih promjena geoidnih undulacija modela geoida ITSG-Grace2014 na području Europe s posebnim osvrtom na područje Republike Hrvatske

Samanta Bačić, Dina Grubišić, Senka Jukić

Sažetak

Praćenje promjena ubrzanja sile teže Zemlje jedan je od osnovnih zadataka u geodeziji i povezanim znanstvenim područjima. Satelitske gravimetrijske misije CHAMP, GRACE i GOCE omogućile su kontinuirano opažanje promjena ubrzanja sile teže Zemlje uz globalnu pokrivenost. U ovom radu analizirane su regionalne promjene geoida iz mjesečnih podataka GRACE misije na području Europe s posebnim osvrtom na područje Republike Hrvatske. Uz analizu mjesečnih rješenja za definirano područje, u radu je dokumentirana teorijska osnova modela geoida te načini njegova određivanja. Također, dana je teorijska osnova globalnih geopotencijalnih modela i satelitskih misija (CHAMP, GRACE i GOCE). Na temelju mjesečnih rješenja modela geoida ITSG-Grace2014 prikazane su regionalne promjene geoida i ispitana je njegova kvaliteta. Osim toga, u radu je uspoređen model geoida ITSG-Grace2014 s modelima geoida HRG2009, EGM2008 i EIGEN-6C4 na području Republike Hrvatske.

Ključne riječi: geoid, globalni geopotencijalni modeli, ITSG-Grace2014, satelitske misije.

Time variations analysis of geoid undulations computed from ITSG-Grace2014 geoid model over Europe with particular reference to the territory of Republic of Croatia

Samanta Bačić, Dina Grubišić, Senka Jukić

Summary

Monitoring of Earth gravity field variations is one of the basic tasks in geodesy and related scientific areas. Satellite gravity missions CHAMP, GRACE, and GOCE enabled continuous observation of Earth gravity field variations with global coverage. This paper analyses regional variations of geoid from monthly solutions of GRACE mission in Europe with particular reference to the territory of Republic of Croatia. Furthermore, this paper elaborates on the theoretical basis of the geoid and the ways of its determination. The theoretical basis of global geopotential models and satellite missions (CHAMP, GRACE, and GOCE) are given, as well. Based on the monthly solutions of geoid model ITSG-Grace2014, regional geoid variations were presented and their quality was examined. Furthermore, in this paper geoid model ITSG-Grace2014 was compared with geoid models HRG2009, EGM2008, and EIGEN-6C4 on the territory of Republic of Croatia.

Key words: geoid, global geopotential models, ITSG-Grace2014, satellite missions.