

UDK 52-336: 528.837:629.783
Pregledni rad

GRAVITACIJSKE SATELITSKE MISIJE

SATELLITE GRAVITY MISSIONS

Medžida Mulić, Eldin Đonlagić

SAŽETAK

Sila teže se smatra osnovnom fizikalnom silom u prirodi. Savremene satelitske misije: CHAMP, GRACE i GOCE omogućile su dobivanje globalnih modela polja sile teže s veoma visokom tačnošću, kao i njegovih prostornih i temporalnih varijacija. U ovom radu istaknuti su ciljevi, karakteristike i rezultati navedenih misija, te iznesena očekivanja u budućnosti, kao i njihov značaj i doprinos za geodetsku praksu kao i istraživanja u oblasti geodezije, geofizike i hidrologije.

Ključne riječi: CHAMP, GRACE, GOCE, gravitacijske satelitske misije, polje sile Zemljine teže, globalni model geoida.

ABSTRACT

Gravity is considered as the basic physical force in the nature. Modern satellite missions: CHAMP, GRACE and GOCE allowed modeling of the global gravity field with very high accuracy, as well as its spatial and temporal variations. This paper describes the main objectives, characteristics, the latest results of these missions, as well as the expectations of the future observations, and their importance and contributions for the surveying and geodetic practice, and scientific achievements as well, in geodesy, geophysics and hydrology.

Keywords: CHAMP, GRACE, GOCE, gravitational satellite missions, gravity field of the Earth, global geoid model.

1. UVOD

Sila teže se smatra osnovnom fizikalnom silom u prirodi. Ova kompleksna sila ima nemjerljiv utjecaj na svakodnevni život na našoj planeti, a može se reći da sila teže utiče na mnoge dinamičke procese koji se dešavaju unutar Sistema Zemlja¹. Tačnost s kojom se može mjeriti sila teže je od velikog značaja za geodeziju i proučavanje Zemljine unutrašnjosti. U moderno doba, koje je okarakterisano visokorazvijenom industrijom i tehnologijom, čovječanstvo se suočava i s problemom klimatskih promjena. Radi omogućavanja praćenja srednjeg nivoa svjetskog mora, pomjerenja ledenih masa, te cirkulacije masa u okeanima u istraživačke svrhe, neophodno je mjeriti silu teže s visokom tačnošću.

Godina 2000. bit će u historiji čovječanstva zasigurno zapamćena kao prekretnica na putu određivanja globalnog polja sile teže naše planete. Ova nova epoha započeta je lansiranjem prve satelitske misije čiji je osnovni cilj bio određivanje globalnog Zemljinog polja sile teže, te se slobodno može reći da su dosadašnje gravitacijske satelitske misije revolucionarizirale naše poznavanje ove oblasti istraživanja.

¹ Planeta Zemlja je u skladu s najnovijim spoznajama toliko kompleksna da su moderni geoznanstvenici uveli novi termin Sistem Zemlja.

Ovaj rad se fokusira na novine u aktuelnim, kao i planiranim produženjima satelitskih gravitacijskih misija.

2. GRAVITACIJSKE SATELITSKE MISIJE

2.1 CHAMP misija

Lansiranjem satelita CHAMP (Challenging Minisatellite Payload), dana 15. jula 2000. godine otpočelo je precizno satelitsko mjerenje parametara gravitacijskog i magnetnog polja Zemlje, kao i istraživanje atmosfere. Instrumenti instalirani na CHAMP satelitu, neophodni za mjerenje parametara polja sile Zemljine teže, bili su: GPS prijemnik i mikro-akcelorometar, koji je bio postavljen u centru mase satelita. Ova dva instrumenta omogućili su izvođenje sile teže iz kombiniranja dvije vrste mjerenja: kontinuiranog određivanja 3D položaja CHAMP satelita, a u odnosu na GPS satelite, te istovremenog 3D mjerenja ne-gravitacijskih sila na satelit pomoću akcelorometara.

Početna visina orbite CHAMP satelita bila je 454 km, nakon čega se postepeno smanjivala. Prikupljena mjerenja omogućila su poboljšanje poznatih karakteristika globalnog statičkog polja sile teže, na cijeloj planeti, pri čemu su se prvi put dobili homogeni i kvalitetni podaci o polju teže u polarnim oblastima. Misija se nastavila i nakon planiranog perioda, te se konačno završila 19. septembra 2010., nakon deset godina, dva mjeseca i četiri dana, tj. nakon 58 277 obilazaka oko Zemlje (URL1).

Jedan od prvih modela razvijenih iz CHAMP podataka mjerenja u periodu od 6 mjeseci dao je poboljšanje globalnog modela GRIM5-S1 (Biancale i dr., 2000).

2.2 GRACE misija

Dvije godine poslije početka misije CHAMP započela je druga gravimetrijska misija, kao rezultat američko-njemačke saradnje (URL 2). Naziv ove zajedničke misije je GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment). Ova misija ima značajno drugačiji pristup od CHAMP misije. U orbiti se kreću dva „satelita blizanca“ na međusobnom rastojanju oko 220 km (Mulić, i dr., 2012). Cilj ove misije je određivanje vremenskih varijacija (mjesečnih, sezonskih i godišnjih) polja sile Zemljine teže. Naravno, nastavljeno je s analizom komponenti statičkog polja teže (URL 3). Osim vrijednih podataka gravitacijskih mjerenja, ova misija ima ogroman značaj za proučavanje hidrologije na planeti, jer je moguće identificirati gdje na površini planete voda nestaje ili se akumulira. Naravno, hidrološka istraživanja zasnivana na GRACE podacima imaju ograničenja, jer se baziraju na podacima koja se odnose na mjesečne „izvještaje“, a hidrološka istraživanja preferiraju podatke u realnom vremenu (URL 8).

GRACE misija je osmišljena s ciljem da mjeri promjene u polju Zemljine teže, što može biti iskorišteno za monitoring premještanja masa na planeti: u atmosferi, u okeanima, kao i voda na kontinentima, bilo da se radi o vodama na površini, vodi u zemljištu u obliku vlage, ili pak podzemnim vodama. Premještanje ovih voda nužno prouzrokuje promjene u polju sile teže planete. Promjene polja teže se manifestiraju kao prostorne i temporalne. Otkrivanjem ovih promjena moguće je odrediti varijacije masa, a prema tome, ustanoviti geofizičke procese koje se dešavaju na i/ili unutar Zemlje. Opažanja prikupljena misijom GRACE koriste se za sljedeća istraživanja: kontinentalne hidrologije, smanjenja masa na Grenlandu i Antarktiku, poplava, elastičnih i viskozno-elastičnih deformacija na Zemlji (Darbeheshi, i dr., 2012). Na (URL 12)

je moguće koristiti besplatni „on-line“ servis vizualizacije podataka mjerenja ove misije (slika 3).

Relativno kretanje i dužina između dva satelita mjeri se veoma preciznim radarskim mikrovalnim sistemom. Na svakom satelitu instalirana je GPS antena, kao i mikroakcelerometar u centru mase satelita. Ovim je omogućeno 3D praćenje svakog GRACE satelita u odnosu na GPS satelite, a istovremeno i mjerenje ne-gravitacijskih sila na svakom satelitu. Ovaj satelitski sistem je osmišljen tako, da se dobiju precizna mjerenja za gravitacijske utjecaje, na velikim i srednjim udaljenostima, te na taj način omogućiti određivanje vremenski promjenljivih varijacija polja sile teže (Mulić, 2012).

2.2.1 Aktuelni status i planirani nastavak GRACE misije

Iako je misija odavno završila planirane zadatke (planirano trajanje misije je pet godina), odlučeno je da se nastavi s projektom, a u cilju što dužeg prikupljanja podataka o gravitaciji i stanju atmosfere. Tako su 17. marta 2012. godine blizanci obilježili deseti „rođendan“. Zahvaljujući podacima prikupljenim tokom ove misije, objavljen je model polja sile Zemljine teže nazvan GRACE RL05 (URL 23; URL 24), kao rezultat ponovne obrade desetogodišnjeg skupa mjerenih podataka, koji se bazira na: detaljnoj analizi GRACE podataka, uz primjenu poboljšanog pristupa u modeliranju, boljem kvalitetu prikupljenih podataka, te uz korištenje podataka prikupljenih tokom produženja misije (URL 7).

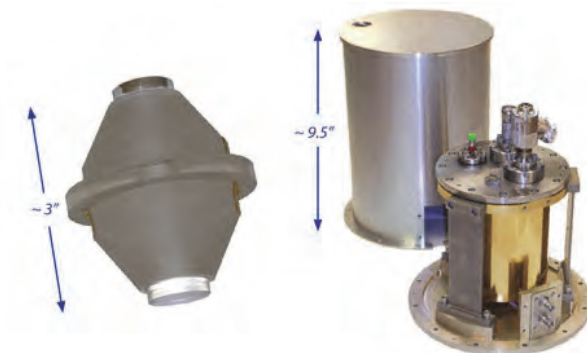
Trenutni status misije GRACE bi se mogao sažeti u sljedećem: svi instrumenti rade ispravno, (URL 4). Prema zvaničnom izvještaju iz septembra 2012. godine (Flechtner, 2012), status misije na dan 1. oktobra 2012. godine opisan je kao što slijedi: sateliti blizanci orbitirali su na udaljenosti od 262 km, sa promjenama od 0,20 km/dan. Predviđa se da će se sljedeći manevar satelita organizirati u februaru 2013. godine. Operativni status GOCE misije ovisi uglavnom o stanju baterija u svakom satelitu blizancu. Ipak, ne očekuje se produženje misije poslije 2013. godine.

Međutim, nastavak misije GRACE očekuje se 2017. godine, (projekt nazvan Follow-On GRACE ili skraćeno GRACE FO), ali uz doprinos proširene međunarodne saradnje. Naime, timu se pridružuju istraživači iz Australije. Glavni cilj, osim navedenog, sljedeće GRACE misije bio bi opažanje topljenja ledenih i snježnih masa na Antarktiku (URL 5).

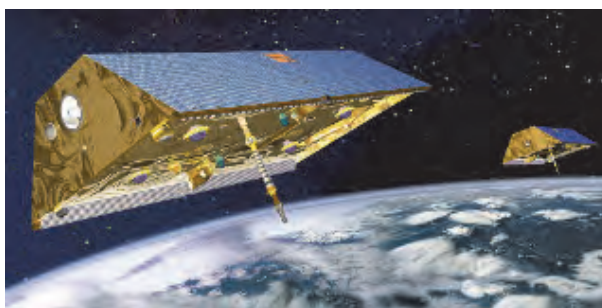
Najznačajnija novina u budućoj misiji GRACE FO, je poboljšanje kvaliteta mjernih instrumenata kojima će sateliti biti opremljeni. Naime, planira se da budući sateliti blizanci budu opremljeni laserskim interferometrima, kojima će se tačnost mjerenja udaljenosti između blizanaca povećati deset puta, te se očekuje da će tačnost mjerenja međusatelitske udaljenosti (od oko 220 km) biti reda nanometra. Smatra se da će poboljšanja u instrumentariju dati poboljšanje osjetljivosti za faktor 25, u odnosu na podatke originalne misije GRACE (URL 6).

Dakle, GRACE FO misija će primjenjivati istu tehniku: pažljivo mjerenje varijacija orbite između dva satelita blizanca². Međutim, kao što je već rečeno, mjerenje će biti mnogo tačnije. Prednost novog sistema je mnogo manja valna dužina lasera, u usporedbi s valnom dužinom mikrovalova radarskog daljinomjera kod aktuelnih satelita. Druga prednost je način mjerenja vremena novog sistema, gdje će se primjenjivati termički izolirano kućište (slika 1), što omogućava veću stabilnost u odnosu na kvarcni sat, korišten u aktualnoj misiji (URL 9).

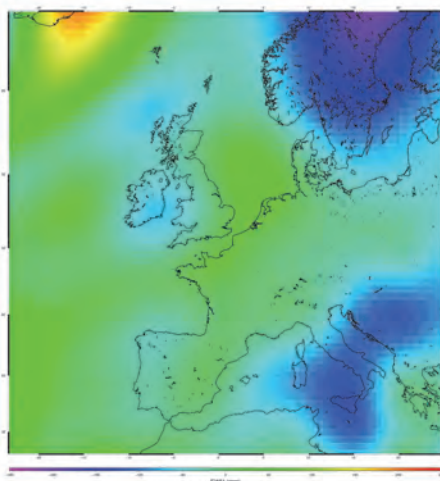
² U Friedrichshafen-u, Njemačka, 29. novembra 2012. godine potpisan je ugovor između njemačke kompanije Astruim i NASE, za izgradnju dva nova GRACE FO satelita, koji će tokom najmanje 5 godina prikupljati mjerenja u orbiti, nakon što budu lansirani 2017. godine.



Slika 1: Prikaz poboljšano instrumentarija za nastavak GRACE misije, nazvane „Follow-on GRACE“: desno iza - prototip laserskog kućišta, desno sprijeda - prototip uređaja spremnog za montažu (URL 6)



Slika 2: Sateliti blizanci u orbiti (URL 10)



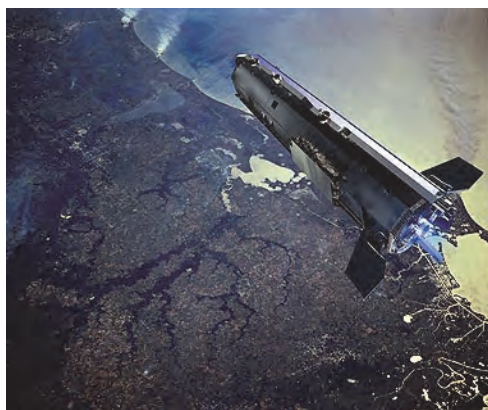
Slika 3: Vizualizacija podataka GRACE misije za područje dijela Evrope i Mediterana. Karta pokazuje viskoznu-elastičnost Zemljine kore za period podataka GRACE misije: za devet dana 2002. godine (dani 210-219) (URL 12)

2.3 GOCE misija

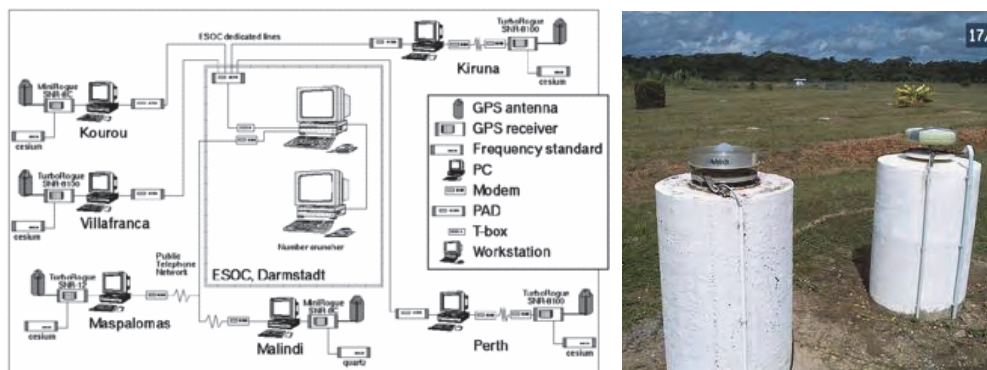
Treću satelitsku misiju, pod imenom GOCE (Gravity field and steady-state and Ocean Circulation Explorer), u potpunosti je realizirala Evropska svemirska agencija–ESA (European Space Agency). Satelit je lansiran je 17. marta 2009. godine, ali je operativne podatke počeo prikupljati u septembru iste godine. Cilj misije izražen je kao: globalni model geoida s kumulativnom tačnošću od 1-2 cm, za sferne harmonike stepena 200, što bi odgovaralo polovici valne dužine od oko 100 km. U usporedbi s globalnim geopotencijalnim modelom EGM2008 (Mulić, 2012, Pavlis, i dr. 2008) tačnost je 7 cm za harmonike stepena 200, (Pail, i dr., 2011, str. 820).

Sve gravitacijske modele dobijene iz podataka prikupljenih prije GOCE misije karakterizira da, kvalitet redukcije podataka ovisi o tačnosti s kojom se mogla rekonstruirati dinamika satelita. Ovo nije slučaj s GOCE satelitskim modelima, jer se prvi put koriste mjerenja gradiometrom. Gradiometar direktno mjeri druge izvode gravitacijskog potencijala. Zbog ove činjenice nije neophodna linearizacija jednačina opažanja, pa tako nije potreban ni iterativan pristup u procesu izjednačenja. Principijelno, dovoljno je poznavati položaj mjenog gradijenta sile teže s tačnošću od 5-10 m, što je u potpunosti ostvareno tehnikama GPS pozicioniranja orbite GOCE satelita.

Planirana dužina misije bila je dvadeset mjeseci, ali je misija produžena i još traje. Kao što je opisano u (Mulić, i dr., 2012) satelitski segment ove misije ima samo jedan satelit, osmougaonog poprečnog presjeka, kao što je prikazano na slici 4. Vizualizacija satelita u orbiti i rezultirajući globalni geoid prikazuje video na (URL 17). Po prvi put u historiji, satelit je imao ugrađen gradiometar, kojim se mjere varijacije polja sile teže na globalnom planu.



Slika 4: Lijevo - GOCE satelit u orbiti (URL 18); desno - ESA Navigacijski centar misije, Darmstadt-Njemačka (URL 19)



Slika 5: ESA sistem za GPS praćenje GOCE satelitske misije. Kontrolni centri nalaze se na različitim lokacijama, kao što pokazuje slika lijevo. Sistem uključuje prijemnike na ko-lociranim stanicama, slika desno. (URL 19)

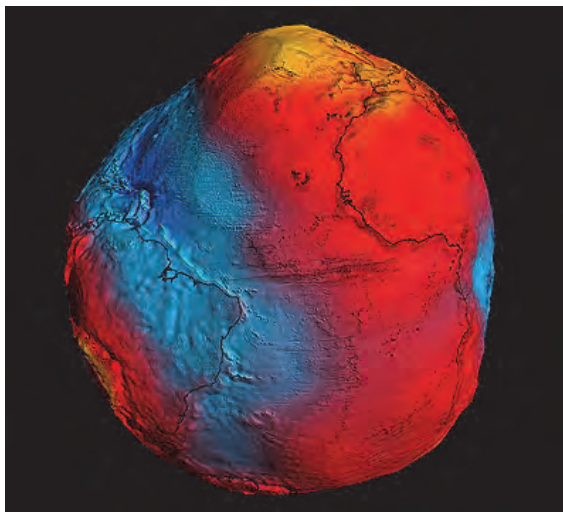
2.3.1 Rezultati GOCE misije

Na osnovu početnih rezultata GOCE misije, publicirani su u 2010. godini, kao rezultat saradnje deset evropskih univerziteta i istraživačkih institucija (Peil, i dr., 2010; Peil, i dr., 2011), modeli geoida s najboljom tačnoscí u dotadašnjoj historiji, izračunati samo iz podataka prikupljenih tokom prvih 71 dana ove misije. Ovi modeli su se primjenjivali za usporedbu modela izvedenih iz satelitskih podataka, kao i za kombiniranje s podacima iz drugih misija. Kombinirani podaci GRACE i GOCE misije rezultirali su modelom pod nazivom GOCO 01S (Peil, i dr., 2011; URL 26).

Rezultati misije pokazuju da su podaci prikupljeni gradiometrom svakim mjesecom sve bolji. Rezultirajući modeli se uveliko primjenjuju u različitim istraživanjima. GOCE je omogućio dobivanje dinamičke topografije i visokokvalitetnog uzorka cirkulacije okeana, što pomaže boljem razumijevanju dinamike svjetskog okeana, kao i unutrašnje strukture planete. Očekuje se da će podaci o promjenama u polju sile teže dobiveni pomoću GOCE satelita, pomoći u razumijevanju procesa koji prouzrokuju pojavu zemljotresa.

Pošto zemljotresi obično nastaju zbog pomjeranja tektonskih ploča ispod okeana, kao što se u Vatrenom pojasu³ najčešće dešava, pomjeranje ploča se ne može opažati direktno iz satelita. Međutim, zemljotresi ostavljaju trag u promjeni sile teže, što se može upotrijebiti za bolje razumijevanje procesa koji dovode do ovih prirodnih katastrofa, kao i predviđanju takvih pojava.

³Vatreni pojas (ili Vatreni prsten-*eng.* Ring of fire-URL 25) zove se pojas gdje su zemljotresi manjeg intenziteta svakodnevna pojava, a tamo se dešavaju često i zemljotresi velikog intenziteta, bilo da su uzrok potresa tektonski poremećaji ili pak vulkanske erupcije. Oblast leži ispod Pacifičkog okeana, a obuhvata Novi Zeland, Filipine, Indoneziju, Japan, zapadne obale Sjeverne i Južne Amerike, itd.



Slika 6: GOCE geoid (URL 19)

2.3.1.1 Doprinos GOCE satelita za buduće satelitske misije

Pored karata Zemljinog polja sile teže s visokom tačnošću zadatak GOCE satelita je i dobivanje uvida u gustinu zraka i vjetrove u svemiru. Očekuje se da će se na osnovu ovih informacija popraviti dizajn i operacije budućih misija opažanja Zemlje pomoću satelita.

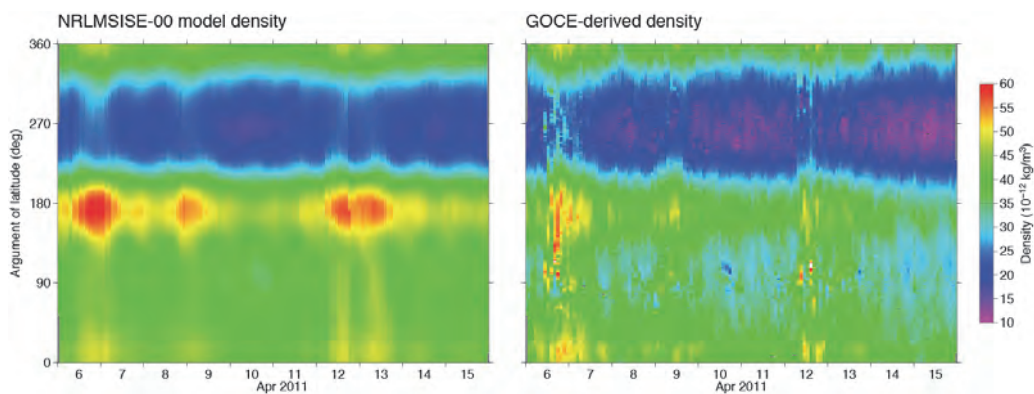
Većina satelita iz grupe LEO (Low Earth Orbiting) imaju orbite iznad 400 km. Ispod ove visine, zbog utjecaja atmosfere, sateliti brzo usporavaju svoje kretanje po orbiti, te preuranjeno ulaze u atmosferu. Ova činjenica je dizajnerima GOCE misije predstavljala problem, budući da je ovaj satelit trebao letjeti mnogo bliže Zemljinoj površini (na visini oko 270 km), a da bi se omogućilo precizno mjerenje malih varijacija gravitacijskog polja pomoću gradiometra.

Istaknuti problem je riješen ugradnjom malog električnog jonskog motora (URL 13; URL 14). Ovaj novi sistem neprekidno stvara mali potisak, kojim kompenzira otpor zraka koji GOCE satelit trpi, zbog toga što njegova orbita prolazi kroz Zemljinu atmosferu. Zbog visoke učinkovitosti jonskog motora, misija GOCE satelita produžena je sve do danas. Satelit dakle prikuplja mjerenja duže od tri godine, iako je planirani radni vijek ove misije bio oko 20 mjeseci. Problem koji se smatrao komplikacijom u procesu dizajniranja, pokazao se kao mogućnost za buduća znanstvena istraživanja. Tim na Univerzitetu u Delft-u (Holandija) kombinira mjerenja akcelometara u GOCE satelitu s podacima aktiviranja jonskog propelera. Iako ova istraživanja nemaju puno veze s izradom karata polja sile Zemljine teže, rezultati se koriste za proučavanje gustine zraka i brzine vjetra, koji satelit susreće duž svoje orbitalne putanje. Neki od rezultata ovih istraživanja stanja u atmosferi prikazani su na slikama 7 i 8. Slika 7 prikazuje detalje svemirskog vremena na visini satelita, te potvrđuje korisnost GOCE instrumenata za ove dodatne aplikacije. Informacije koje se dobiju iz modela gustine atmosfere, imaju mnogo praktičnih koristi za procjene dužine funkcioniranja satelita u svemiru. Ovo posljednje je korisno za planiranje troškova, optimiziranje orbita misije, planiranje povratka satelita, te izbjegavanje sudara sa svemirskim krhotinama⁴. Podaci o gustini atmosfere i

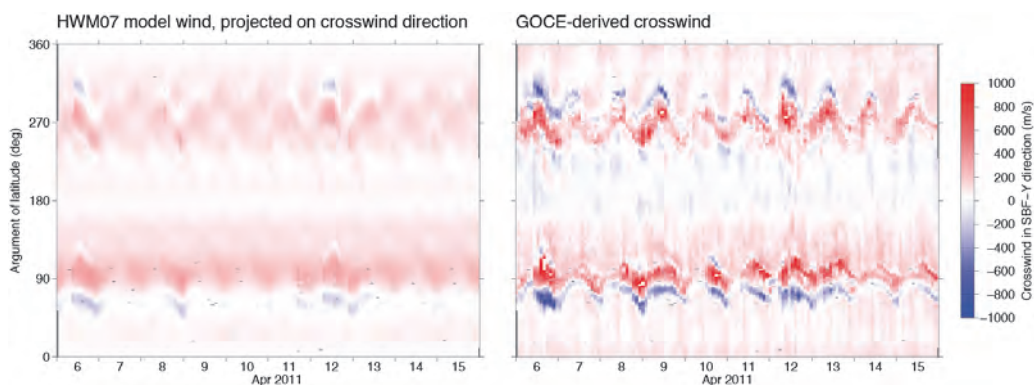
⁴ Svemirskim krhotinama nazivaju se ostaci satelitskih misija, koji se nazivaju i svemirskim otpadom.

vjetrovima u svemiru će uskoro biti pripremljeni za dalje analize stručnjaka za atmosferu i svemirsku fiziku.

Međutim, na osnovu dosadašnjih podataka proističe da mjerenja gustine atmosfere pokazuju niže vrijednosti od vrijednosti koje daje empirički model atmosfere po nazivom NRLMSISE-00 (URL 28), kojeg je ranije publicirala US Naval Research Observatory. Ovo se slaže s rezultatima posljednjih istraživanja, koja sugeriraju da se gornja atmosfera hladi i skuplja tokom posljednjeg desetljeća. Postoji i dodatni pad temperature kao i gustine atmosfere u periodu lansiranja GOCE satelita. Šta je uzrok ovih padova temperature nije u potpunosti razumljivo. Međutim, GOCE satelitu je pogodovalo ovakvo stanje u okruženju, jer je koristio manje goriva za potiskivanje nego je bilo predviđeno. Ova neplanirana okolnost je omogućila produžetak misije, a samim tim i nastavak mjerenja koja će doprinijeti boljoj spoznaji o polju sile Zemljine teže, ali i gornjih slojeva atmosfere.



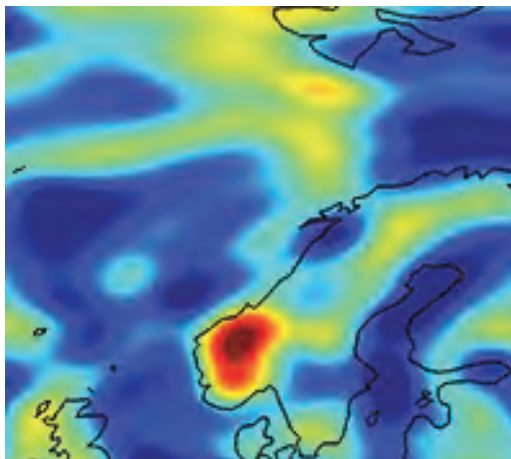
Slika 7: Evidentne su razlike između modela gustine zraka: iz podataka GOCE satelita (desno) i empiričkog modela neutralnog dijela atmosfere NRLMSISE-00 (lijevo) (URL 15)



Slika 8: Empirički globalni model horizontalnog vjetra HWM0-poprečni profil za nižu i srednju atmosferu, tj. za visine od 0 do 500 km visine (lijevo), koji predstavlja statističku reprezentaciju polja horizontalnog vjetra, a izračunat je iz brojnih mjerenja na površini Zemlje i satelita, koji su prikupljeni tokom 50 godina (Drob, i dr., 2008). Desno, prema GOCE podacima, sa više detalja u odnosu na model HWM07, koji je do 2007. godine predstavljao najviše dostignuće u ovom području istraživanja (URL 16).

2.3.2 Druga GOCE misija

Već je rečeno da je na osnovu podataka prikupljenih pomoću satelita GOCE omogućena izrada karte gravitacijskog polja Zemlje, s najboljom tačnošću u historiji. Satelit GOCE se kreće u orbiti oko Zemlje na visini 255 km, tj. oko 500 km niže od većine satelita korištenih za opažanje Zemlje, s ciljem da bude bliže Zemljinoj površini i osjetljiviji za promjene u Zemljinom gravitacijskom polju.



Slika 9: Model novog GOCE gravitacijskog polja Zemlje s popravljenom rezolucijom, za područje Skandinavije i polarnih oblasti. (URL 21)

Međutim, iako je visina orbite značajno smanjena, aktivnosti na smanjivanju visine ovog satelita još traju, a sve uz podršku ESA kontrolnog tima. Na taj način je omogućeno prikupljanje podataka koji daju još bolje rezultate.

Dakle, GOCE je nakon lansiranja 17. marta 2009. godine, ostvario ambiciozno postavljeni cilj prikupljanja podataka za pravljenja karata gravitacijskog polja, s tačnošću koja nikad prije ni izbliza nije postignuta. Kako je planirana misija izvršena, a potrošnja goriva manja od očekivane, te zbog niskih solarnih aktivnosti tokom zadnje dvije godine, otvorena je mogućnost za produženje misije, uz bolji kvalitet gravitacijskog modela.

U avgustu 2012. godine, ESA kontrolni centar je počeo manevre s ciljem postepenog smanjivanja visine GOCE satelita. Visina je smanjivana za oko 300 m dnevno. Smanjivanjem visine povećava se tačnost mjerenja sensorima na GOCE satelitu. Tako se dobiva bolji uvid u dinamiku okeana, vrtložna kretanja u vodi ili pak u atmosferi.

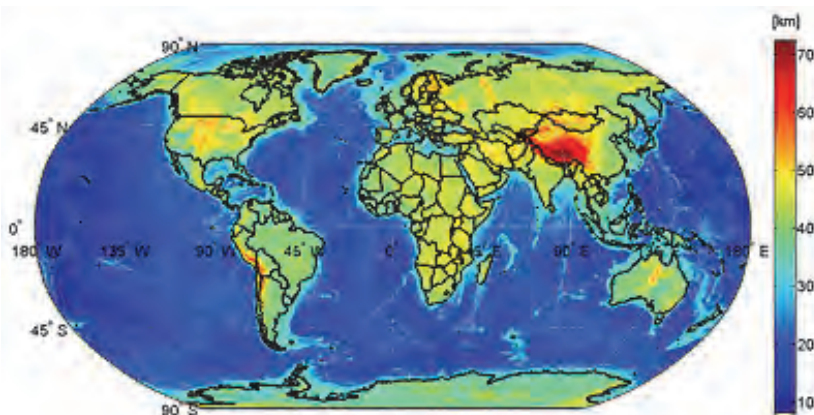
Kad je satelit spušten za 8,6 km urađeno je ispitivanje njegovih performansi, nakon čega se nastavilo sa spuštanjem. Očekuje se da će u februaru 2013. godine GOCE satelit biti spušten na visinu 235 km (URL 21). Na osnovu kontinuiranih mjerenja prave se nove karte gravitacijskog polja Zemlje.

Sa opadanjem visine satelita, atmosfera ga jače povlači ka Zemlji. Međutim, GOCE satelit pomoću potiska ostvarenog jonskim motorom, kompenzira otpor zraka. Kako je već rečeno, sa opadanjem visine kvalitet podataka značajno raste, tako da su znanstvenici ovu fazu nazvali „druga GOCE misija“.

Znanstvenici iz ESA izjavili su da ih GOCE neprekidno iznenađuje. Ovo što trenutno inženjeri u Evropskoj svemirskoj agenciji rade nije rutina i predstavlja pravi izazov. Očekuje se da će ovo omogućiti nova istraživanja polja sile Zemljine teže, koja će se bazirati upravo na mjeranjima iz „druge GOCE misije“.

Prvi „geoid“ koji se zasnivao na GOCE gravitacijskim mjeranjima, objavljen je u junu 2010. godine. Jedna od definicija geoida je da je to idealna površina globalnog okeana, bez plime i oseke, okeanskih struja, te mu je oblik definiran jedino poljem sile teže. Geoid je geodetima veoma važan jer je osnovna referentna površina za visine. Međutim, geoid je također veoma važna referentna površina za precizna mjerenja okeanske cirkulacije, promjena nivoa mora i dinamike ledenih masa. Pored navedenog, značajno je još jednom naglasiti da je GOCE misija dala novi uvid u gustinu zraka i vjetra, te njihov raspored u prostoru. Ove nove informacije su se nedavno iskoristile za pravljenje prve globalne karte granice između Zemljine kore i omotača, poznate kao Moho⁵ diskontinuitet. Bolje razumijevanje Moho diskontinuiteta dat će indicije o dinamici unutrašnjosti Zemlje.

Zemljina kora kao čvrsta školjka naše planete, čini manje od 1% zapremine planete. Međutim, usprkos činjenici da čini tako mali dio Zemljine mase, veoma je značajna, ne samo zato što živimo na njoj, nego zato što se u njoj nalaze svi geološki resursi, kao što su minerali, nafta, ili prirodni gas. Također se većina značajnih geoloških procesa dešava u Zemljinoj kori i gornjem omotaču. To su npr. orogeni procesi ili pak procesi povezani s vulkanima, zemljotresima i slično.



Slika 10: Prvi Globalni model Moho diskontinuiteta koji se zasniva na podacima GOCE misije. (URL 22)

Današnje se proučavanje dubokih slojeva Zemlje zasniva na dvije metode: seizmičkoj i gravimetrijskoj. Seizmička metoda se zasniva na opažanju promjena u širenju brzine seizmičkih valova između kore i omotača. Gravimetrijska metoda posmatra efekte sile privlačenja nastale zbog različite gustine i rasporeda Zemljinih masa, koje se uglavnom dešavaju zbog promjena u sastavu kore i omotača.

Međutim, Moho modeli koji se zasnivaju na terestričkim podacima sile teže, ili pak na seizmičkim podacima, imaju značajno ograničenje tačnosti, što je uvjetovano lošim rasporedom

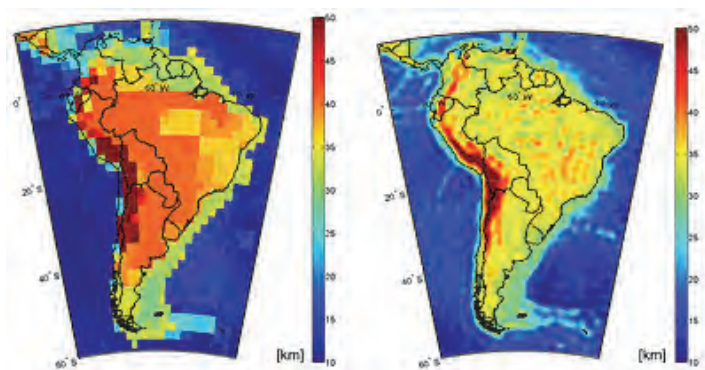
⁵ Moho ili Mohorovičić diskontinuitet, nazvan po pronalazaču, hrvatskom seizmologu Andriji Mohorovičiću. Prije samo jednog stoljeća čovječanstvo nije znalo da Zemlja ima koru. Tek je 1909. godine Mohorovičić ustanovio da na dubini oko 50 km dolazi do naglih promjena u brzini seizmičkih valova. Od tada se granica između Zemljine kore i omotača naziva Mohorovičić diskontinuitet ili kratko Moho.

podataka mjerenja, kao i nedostatkom mjerenja na ogromnim površinama Zemlje. Često su ti podaci rađeni samo za jedan profil. Također, terestrički gravimetrijski podaci potpuno nedostaju na ogromnoj morskoj površini. Takva mjerenja su bila veoma skupa i manje tačna.

Na osnovu podataka prikupljenih pomoću GOCE satelita, ustanovljen je projekat GEMMA (GOCE Exploitation for Moho Modelling and Applications). Rezultat ovog projekta je prva globalna karta velike rezolucije, koja pokazuje dubinu na kojoj se nalazi granica između Zemljine kore i omotača (slika 10).

Slika 11 prikazuje poređenje jednog starog Moho modela (lijevo), (koji je zasnovan na seizmičkim podacima i podacima polje sile teže za Južnu Ameriku), s novim Moho modelom, koji je izrađen na osnovu GOCE podataka. Određivanje globalnog polja sile teže i modela globalnog geoida s visokom tačnošću na osnovu GOCE mjerenja omogućava proučavanje cirkulacije okeana (ovo ima važnu ulogu u proučavanju razmjene energije na planeti), promjenama nivoa mora i procesa u Zemljinoj unutrašnjosti.

Karta Moho nastala kao rezultat projekta GEMMA, zasniva se na inverziji homogenih, dobro distribuiranih podataka. Po prvi put u historiji je moguće procijeniti Moho dubinu na bilo kojem mjestu na planeti. Ovo je od ogromne važnosti za područja gdje ne postoje podaci terestričkih mjerenja. Ovo daje indicije za razumijevanje dinamike Zemljine unutrašnjosti, otkrivanju gravitacijskog signala koji se dobio zbog nepravilnog rasporeda masa, različite gustine ispod Zemljine površine.



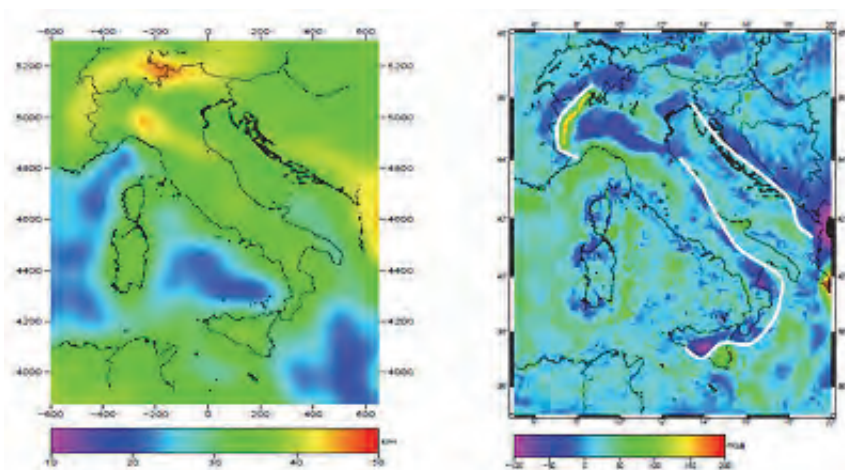
Slika 11: Usporedba Moho modela za Južnu Ameriku (lijevo) izrađenog iz terestričkih seizmičkih i gravimetrijskih podataka s globalnim Moho modelom iz GOCE podataka (desno) (URL 22).

2.3.2.1. GEMMA projekt

Mohorovičićev diskontinuitet je dakle granica između Zemljine kore i omotača, a predstavlja tanku površinu koja odvaja stijene različitih osobina na dubini, koja se kreće od 25 do preko 90 km ispod kontinenata, te od 5 do 15 km ispod dna mora i okeana. Dobro poznavanje Moho diskontinuiteta predstavlja dobru polaznu osnovu za istraživanje dinamike čvrste Zemlje. Ovo poznavanje omogućava bolje razumijevanje heterogenosti litosfere i predstavlja osnovni ulazni podatak za modeliranje geodinamičkih procesa, kao npr. procjenjivanje seizmičkog rizika i pouzdanog područja mehaničkog izvora zemljotresa.

Zbog činjenice da je gornji Zemljin omotač veće gustine, dubina Moho diskontinuiteta može se dobiti iz podataka sile teže. Glavni cilj projekta GEMMA je napraviti karte diskontinuiteta između kore i omotača, u ključnim oblastima, uz korištenje opažanja iz satelitske misije GOCE. Ovo bi po prvi put omogućilo procjenjivanje Moho modela, bez geofizikalnih interpretacija. Međutim, zbog činjenice da su ulazni podaci GOCE gravimetrijska mjerenja, bit će moguće procijeniti Moho bilo gdje na planeti, čak i tamo gdje gravimetrijska i seizmička mjerenja nisu dostupna iz političkih razloga. Slika 12 pokazuje karte Moho dubina u području Zapadnog Balkana i Apeninskog poluotoka, dobivene u ovom projektu. Na karti je uočljiva granica glavnih tektonskih ploča u bijeloj boji, kao i utjecaj sedimentnih stijena u oblasti Po na sjeveru Italije.

Nadalje, kombiniranjem GOCE gravimetrijskih podataka s altimetrijskim podacima dobijenim sa CryoSat 2 satelita⁶, bit će moguće popraviti poznavanje kriosfere⁷. Bit će također moguće, bolje razumijevanje rasporeda Zemljinih masa zarobljenih u zaleđenim oblastima. Integriranje podataka svemirske i satelitske geodezije sa geofizičkim podacima poboljšat će sposobnost razumijevanja, monitoringa, predviđanja i kontrole geofizičkih procesa. Ovo posljednje će opet dati bolju podlogu za određivanje geodetskih referentnih okvira, što za geodetsku i geofizičku zajednicu ima ogroman značaj.



Slika 12: Lijevo - Moho dubine dijela Zapadnog Balkana i Apeninskog poluotoka na osnovu GOCE podataka. Desno - polje sile teže na površini Zemlje, reducirano za Moho efekat. (URL 22)

⁶ ESA satelit koji na sebi nosi veoma sofisticiran radarski altimetar. Ciljevi ovog satelita su istraživanja kriosfere. Istraživanja bi se uglavnom mogla svrstati u dva osnovna zadatka. Prvi zadatak bi bio: da izvrši tačna mjerenja debljine plutajućih santi leda, na osnovu kojih bi se mogle odrediti godišnje varijacije količine leda. Drugi zadatak ove satelitske misije je da se odredi topografija ledene površine s dovoljnom tačnošću da se mogu otkriti male promjene u dimenzijama leda. URL 27

⁷ Kriosferom se nazivaju oblasti Zemlje gdje su vodene mase u čvrstom agregatnom stanju, bilo da su u obliku leda, snijega, glečera, zaleđenih rijeka, jezera, ledenih santi, zamrznutog tla, ledene kape, itd.

3. ZAKLJUČAK

Nove satelitske gravitacijske misije, GRACE i GOCE, a naročito nastavci misija poslije prvobitno planiranog perioda ili druge misije, (kao što je planirana GRACE FO misija), osiguravaju dobivanje modela geoida s tačnosti kakva do sad nije mogla biti ostvarena terestričkim metodama. Novi modeli približit će globalnu geodetsku zajednicu ostvarenju zacrtanog cilja s kraja XX stoljeća: dobivanje globalnog geoida s centimetarskom tačnošću. Ovo daje mogućnost za dobivanje ortometrijskih visina centimetarske tačnosti, kombinacijom metoda GNSS pozicioniranja s globalnim geoidnim modelom. Nadati se da će nova računanja visina BiH trigonometrijskih tačaka, kao što je najavljeno u (Mulić, 2012; i Mulić, i dr. 2012) iskoristiti prednosti koje ove najnovije misije omogućuju.

LITERATURA

Biancale, R., Balmino, G., Lemoine, J.-M., Marty, J.-C., Moynot, B., Barlier, F., Exertier, P., Laurain, O., Gegout, P., Schwintzer, P., Reigber, C., Bode, A., Gruber, T., König, R., Massmann, F.-H., Raimondo, J.C., Schmidt, R., Zhu, S.Y., (2000): A new global Earth's gravity field model from satellite orbit perturbations: GRIM5-S1. *Geophysical Research Letters*, 27(22): pp. 3611–3614.

Darbeheshti, N., L. Zhou, P. Tregoning and S.C. McClusky, (2012): The ANU GRACE visualisation web portal, *Computers and Geoscience*, in press. (draft –oktobar 2012.-URL 11).

Drob, D. P., J. T. Emmert, G. Crowley, J. M. Picone, G. G. Shepherd, W. Skinner, P. Hays, R. J. Niciejewski, M. Larsen, C. Y. She, J. W. Meriwether, et al. (2008): An empirical model of the Earth's horizontal wind fields: HWM07, *Journal of Geophysical Research*, 113, A12304, 18PP doi:10.1029/2008JA013668.

Flechtner, F., (2012): GRACE Science Data System Monthly Report, September 2012.

Mulić, M., (2012): Istraživanje uticaja ITRF realizacija na koordinate, njihovu tačnost i određivanje vektora brzina GPS tačaka na području BIH, Građevinski fakultet Sarajevo, doktorska disertacija.

Mulić, M., Đonlagić, E., Krdžalić, Dž., Bilajbegović, A. (2012): Analiza tačnosti visina Bosanskohercegovačke trigonometrijske mreže pomoću GPS/EGM podataka. *Geodetski glasnik*, br. 42, str. 5-19, Sarajevo.

Pail, R., Bruinsma, S., Migliaccio, F., Förste, C., Goiginger, H., Schuh, D.W., Höck, E., Reguzzoni, M., Brockmann, J.M., Abrikosov, O., Veicherts, M., Fecher, T., Mayrhofer, R., Krasbutter, I., Sansò, F., Tscherning, C.C., (2011): First GOCE gravity field models derived by three different approaches. *Journal of Geodesy*, 85, pp. 819–843 DOI 10.1007/s00190-011-0467-x, Springer.

Pail, R., Goiginger, H., Mayrhofer, R., Schuh, W.D., Brockmann, J.M., Krasbutter, I., Höck, E., Fecher, T., (2010): Global gravity field model derived from orbit and gradiometry data applying the time-wise method. In: Lacoste-Francis H (ed) *Proceedings of the ESA living planet symposium*. ESA Publication SP-686, ESA/ESTEC. ISBN:978-92-9221-250-6; ISSN:1609-042X

Pavlis, N.K., Holmes, S.A., Kenyon, S.C., Factor, J.K., (2008): An Earth gravitational model to degree 2160: EGM2008. In: Paper presented at the 2008 General Assembly of the European Geosciences Union, Vienna, Austria, April 13–18, 2008

[URL 1]: CHAMP satelitska misija

<http://op.gfz-potsdam.de/champ/>

(2.12.2012.)

[URL 2]: Projekt GRACE

<http://www.gfz-potsdam.de/portal/gfz/Struktur/Departments/Department+1/sec12/projects/grace;jsessionid=CC869B4D41A2D597FA9625AE7FFB87DC>

(2.12.2012)

[URL 3]: GRACE misija

<http://www.csr.utexas.edu/grace/>

(2.12.2012)

[URL 4]: Status GRACE misije

http://www.csr.utexas.edu/grace/operations/mission_status/

(2.12.2012)

[URL 5]: Nastavak GRACE misije

<http://grace.anu.edu.au/>

(2.12.2012)

[URL 6]: Laserski sistem na budućim GRACE satelitima za mjerenje sile Zemljine teže kao nikad prije

http://esto.nasa.gov/news/news_GraceFollowOn.html

(2.12.2012)

[URL 7]: GRACE sistem za znanstvene mjesečne izvještaje: Septembar 2012

<http://isdc.gfz-potsdam.de/index.php?module=pagesetter&func=viewpub&tid=1&pid=35>

(2.12.2012)

[URL 8]: NASA program GRACE vidi površinsku vodu iz svemira

<http://www.circleofblue.org/waternews/2012/world/satellite-perspectives-nasas-grace-program-sees-groundwater-from-space/>

(2.12.2012)

[URL 9]: Princip mjerenja Follow-on GRACE misije

<http://grace.anu.edu.au/technology-development/freq-stabilisation.php>

(2.12.2012)

[URL 10]: GRACE Follow-on satelitska misija

<http://grace.anu.edu.au/>

(2.12.2012)

[URL 11]: Analiza satelitske gravimetrije-opis računanja

<http://grace.anu.edu.au/docs.php>

(2.12.2012)

[URL 12]: Vizualizacija podataka GRACE misije: u vidu karata ili vremenskih serija (npr. deformacija Zemljine kore za period prikupljenih podataka GRACE mjerenja)
<http://grace.anu.edu.au/plothistory.php>
(3.12.2012)

[URL 13]: Jonski motor-Novi motori za jeftiniji pogon u kosmosu
<http://www.astronomija.co.rs/oprema/810-novi-motori-za-jeftiniji-pogon-u-kosmosu.html>
(17. 11. 2012.)

[URL 14]: Nove rakete teže ka jeftinijem potiskivanju kroz svemir
<http://web.mit.edu/newsoffice/2009/plasma-rocket-0224.html>
(18.11. 2012)

[URL 15]: Benefit budućih satelitskih misija iz satelitske gravimetrije-GOCE Model gustine atmosfere
http://due.esrin.esa.int/stse/news/stse_inews.php?id=208&idf=1
(18.11. 2012)

[URL 16]: Benefit budućih satelitskih misija iz satelitske gravimetrije-GOCE poprečni presjek vjetrova
http://due.esrin.esa.int/stse/news/stse_inews.php?id=208&idf=2
(18.11. 2012)

[URL 17]: Stvaranje slike polja sile Zemljine težje
<http://www.esa.int/esa-mm/mmg.pl?b=b&topic=Atmosphere&subtopic=Climate%20change&single=y&start=45>
(18.11. 2012)

[URL 18]: GOCE misija
http://www.esa.int/SPECIALS/Operations/SEM4Z8L6VE_1.html#subhead1-pristup
(17. 11. 2012)

[URL 19]: GPS praćenje, te objekti i oprema za analizu podataka
http://www.esa.int/SPECIALS/Operations/SEMDP14ENXE_1.html#subhead1
(17. 11. 2012)

[URL 20]: Benefit budućih satelitskih misija iz satelitske gravimetrije-GOCE geoid
http://due.esrin.esa.int/stse/news/stse_inews.php?id=208&idf=3
(17. 11. 2012)

[URL 21]: Druga misija GOCE popravljja karte polja Zemljine težje
http://www.esa.int/esaEO/SEMFCFGPI9H_index_0.html
(17. 11. 2012)

[URL 22]: ESA novosti- Mapiranje MOHO na osnovu GOCE podataka
http://www.esa.int/esaEO/SEMMC68YBZG_index_0.html
(17. 11. 2012)

[URL 23]: FTP server za preuzimanje svih GRACE modela
<ftp://podaac.jpl.nasa.gov/allData/grace/L2/CSR/RL05/>
(9.12. 2012)

[URL 24]: Geodetskih/gravimetrijski podaci GOCE misije
<http://podaac.jpl.nasa.gov/datasetlist?ids=Measurement&values=Geodetics%2FGravity&search=GRACE>
(9.12. 2012)

[URL 25]: Svjetski atlas-karta vatrenog prstena
<http://www.worldatlas.com/aatlas/infopage/ringfire.htm>
(9.12. 2012)

[URL 26]: Procjena kvaliteta globalnih modela izvedenih iz GOCE podataka
http://www.geod.nrcan.gc.ca/hm/pdf/ince_iugg2011_poster.pdf
(9.12. 2012)

[URL 27]: Satelitska misija CRIOSAT
http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/The_Living_Planet_Programme/Earth_Explorers/CryoSat-2/Overview
(18.12.2012)

[URL 28]: Model atmosfere NRMSISE-00
<http://www.mathworks.com/help/aeroblks/nrlmsise00atmospheremodel.html>
(18.12.2012)

Autori

Doc.dr.sc. Medžida Mulić, dipl.inž.geod.

Građevinski fakultet, Univerzitet u Sarajevu
Patriotske lige 30, 71000 Sarajevo
Bosna i Hercegovina
E-mail: medzida_mulic@gf.unsa.ba

Spec.sc. Eldin Đonlagić, dipl.inž.geod.

Federalna uprava za geodetske i imovinsko-pravne poslove
Reisa Džemaludina Čauševića 6, 71000 Sarajevo
Bosna i Hercegovina
E-mail: eldin.donlagic@fgu.com.ba