

UDK 629.783:550.831:551.58:556
Pregledni znanstveni članak

Satelitska misija Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)

Željko HEĆIMOVIĆ¹, Tomislav BAŠIĆ²*Twins in orbit fly
Linked by microwaves reveal
Earth mass in motion*

GRACE-haiku (URL 1)

SAŽETAK. GRACE je satelitska misija kojoj je primarni cilj dobivanje statičkog i dinamičkog modela gravitacijskog polja Zemlje velike rezolucije. Sekundarni je cilj prikupljanje parametara atmosfere GPS radiookultacijskim mjerenjima. Misija upotrebljava dva satelita u istoj putanji kao senzore za dobivanje veličina za modeliranje Zemljina gravitacijskog polja. Glavna mjerna veličina je kontinuirano vrlo precizno mjerenje udaljenosti između GRACE satelita. Zemljino gravitacijsko polje u godišnjim se periodama mijenja za male iznose i ono je dominantno statičko polje. Tom se misijom prikupljaju slabi, vremenski promjenljivi gravitacijski signali: gibanja masa vode u hidrološkoj cirkulaciji, gibanja tektonskih ploča, gibanja magme, i dr. GRACE sateliti trebaju mjesec dana da bi prikupili podatke za cijelu Zemlju pa se GRACE modeli izrađuju za svaki mjesec. GRACE globalni geopotencijalni modeli Zemlje razvijaju se do velike rezolucije u kojima je matematičkim modeliranjem signal topografije jasno artikuliran. Jedan od posljednjih GRACE modela GGM01S razvijen je do stupnja i reda 120 (odabrani koeficijenti od 140). Problem određivanja oblika Zemlje primjenom GRACE podataka postat će dinamički problem. GRACE će imati osobito velik utjecaj na razvoj oceanografije, geodezije, geofizike, geologije i hidrologije.

Ključne riječi: satelitska misija GRACE, geosustav, gibanje masa, cirkulacija vode, statičko i dinamičko Zemljino gravitacijsko polje.

1. Uvod

Poznavanje polja ubrzanja sile teže i oblika Zemlje, što je temeljna zadaća geodezije, osnova je koju primjenjuju ostale geoznanosti i potrebna je za cjelokupnu ljudsku djelatnost. Oblik Zemlje je povezan s modeliranjem Zemljina gravitacijskog po-

¹ Doc. dr. sc. Željko HEĆIMOVIĆ, Av. M. Držića 76, 10000 Zagreb, zeljko.hecimovic@zg.htnet.hr.

² Prof. dr. sc. Tomislav BAŠIĆ, Sveučilište u Zagrebu Geodetski fakultet, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, tbasic@geof.hr.

lja, a ono je prostorna funkcija koja ovisi o nepravilnosti rasporeda masa i njihovih gustoća. Kako je masa pritom osnovna varijabla, ona je osnovna veličina mnogih jednadžbi fizikalnih fenomena. Osim tih utjecaja koji stvaraju statičko gravitacijsko polje u geosustavu dolazi do gibanja masa zbog čega se mijenja gravitacijsko polje. Mase se kontinuirano gibaju pa se i Zemljino gravitacijsko polje kontinuirano mijenja. Količina masa u gibanju (hidrološki ciklus, gibanje atmosfere, gibanje magme, gibanje tektonskih ploča i dr.) u kratkoperiodičnoj vremenskoj skali (od jedne godine) je malena. Zbog toga je utjecaj vremensko-prostorne promjenljivosti Zemljina gravitacijskog polja bio zanemarivan za većinu stručnih i znanstvenih problema.

Svaki proces koji je vezan uz gibanje masa uključuje različite procese i ima karakterističnu prostorno-vremensku skalu. Očekuje se da površinske vode, kao što su jezera i rijeke, stvaraju brže vremenske promjene nego oceanske struje, a one pak stvaraju brže promjene gravitacijskog polja nego dubinska gibanja magme.

Dosadašnje satelitske misije redovito prikupljaju podatke reflektirane od površine Zemlje, a podatci o gravitacijskom polju omogućuju "pogled" u unutrašnjost Zemlje (dubine oceana i čvrste Zemlje). To omogućuje bolje razumijevanje procesa u litosferi i bolje razumijevanje dinamike unutrašnjosti Zemlje (viskoznosti dubljih područja i konvekcija u kori). S obzirom na te mogućnosti i činjenicu da će GRACE misija davati vremenske promjenljivosti Zemljina gravitacijskog polja ona ima poseban značaj.

Iako se danas za modeliranja Zemljina gravitacijskog polja koriste mjerenja nekoliko desetaka satelitskih misija i podatci terestričkih mjerenja, današnji globalni geopotencijalni modeli nisu dovoljno kvalitetni da bi se mogli koristiti za modeliranje slabih signala Zemljina gravitacijskih polja koji su prouzrokovani gibanjem masa. Testiranje globalnoga geopotencijalnog modela EGM96 širom Zemlje, dobivene su njegove nepouzdanosti u rasponu od 0,2 do 0,9 metara (IGS 1996), a dva globalna geopotencijalna modela EGM96 i GFZ97, koji najbolje opisuju gravitacijsko polje na teritoriju Hrvatske, pokazuju na tom prostoru nepouzdanost undulacija geoida od 0,5 m (Hećimović i Bašić 2003). Za razliku od globalnih modela, regionalni i lokalni modeli geoida dosegili su potkraj 1980-ih godina kvalitetu decimetra (Bašić 1989), a danas kvalitetu centimetra (Sanso i Rummel 1997). Međutim, lokalni modeli ne mogu se koristiti za studije vezane uz fenomene na većim područjima ili na cijeloj Zemlji. Osim što kvaliteta današnjih globalnih modela gravitacijskog polja ne omogućuje modeliranje slabih signala, oni su statički modeli, tj. ne omogućuju analizu vremenskih promjena gravitacijskog polja.

Promjene položaja masa unutar geosustava prouzrokuju vremenske promjene gravitacijskog polja koje stvaraju gravitacijski tok (Adam 2002). Statički pristup modeliranju gravitacijskog polja održao se do danas zbog neraspodaganja sustavnim kvalitetnim mjerenjima velike gustoće u duljem vremenskom razdoblju i zato što je utjecaj vremenske promjene Zemljina gravitacijskog polja za većinu praktičnih problema zanemarivan.

Geosustav je objekt proučavanja više znanstvenih disciplina (geodezija, geofizika, geologija, hidrologija, oceanografija,...). Poznavanje količine masa geosustava koje se gibaju omogućuje bolje razumijevanje procesa u geosustavu. Studiranje gravitacijskog polja omogućuje neizravan odgovor na taj problem (URL 2). Cirkulacija vode definira dominantno gibanje masa u geosustavu, a gibanje magme i geotekton-

skih ploča znatno su sporiji prostorno-vremenski procesi (Malik 2002). Zbog toga je dinamički dio gravitacijskog polja primarno prouzrokovan gibanjem vodenih masa. Zračne mase gibaju se najbrže, ali zbog prijenosa malih količina masa imaju malen utjecaj na promjenu gravitacijskog polja. Oceanske su struje (površinske i dubinske) nakon zračnih struja najbrži prijenosnici masa. Osim utjecaja na dinamiku gravitacijskog polja, gibanje masa oceana ima velik utjecaj na promjenu klime. Oceani akumuliraju i prenose toplinu. Male promjene u oceanskim strujama mogu prouzrokovati velike klimatske promjene na cijeloj Zemlji. Uloga oceana u procesima promjene klime još nije zadovoljavajuće rasvijetljena jer do sada nisu bila na raspolaganju dovoljno kvalitetna mjerenja gravitacijskog polja u dužem razdoblju da bi se utjecaj morskih struja ili promjena otapanjem glečera mogao proučavati na osnovi promjene gravitacijskog polja. Nedovoljno poznavanje Zemljina gravitacijskog polja i nepoznavanje njegova dinamičkog dijela postao je ograničavajući faktor pri proučavanju geosustava u više disciplina.

Dinamička topografija oceana sadrži informacije o brzini i smjeru oceanskih struja. Za određivanje dinamičke topografije oceana potrebno je poznavati visinu površine oceana (satelitska altimetrijska mjerenja) i Zemljin geoid. Mase u gibanju koje prouzrokuju dinamičku topografiju oceana prouzrokuju jedva jedan postotak promjene gravitacijskog polja. Zbog toga je gravitacijsko polje dominantno statičko polje, a promjenljivi, dinamički dio gravitacijskog polja vrlo je malen³. Oceanske struje prouzrokuju male promjene na površini oceana (altimetrijska mjerenja) i male promjene geoida (globalni modeli geoida). Da bi se tim podacima mogle proučavati oceanske struje, oni moraju biti vrlo kvalitetni. Za potrebe određivanja dinamičke topografije oceana globalni geoid mora biti poznat s istom pouzdanošću kao i altimetrijska visina oceana. Danas se satelitskom altimetrijom mjere visinu površine oceana s točnošću boljom od 4 cm, a to je znatno bolje od poznavanja globalnoga geoida. Zbog toga je kvaliteta dosadašnjih modela globalnoga gravitacijskog polja Zemlje ograničavajući faktor pri modeliranju oceanskih struja. Primjenom altimetrijskih podataka TOPEX/Poseidon misije od 12/1992. do 8/1999. utvrđeno je da je globalno povećanje nivoa oceana 3 mm/god. (URL 4). Međutim, na osnovi samo altimetrijskih mjerenja ne može se razlikovati koji je iznos izdizanja nivoa oceana prouzrokovan povećanjem volumena vode (zbog zagrijavanja), a koji dio povećanjem količine vode (povećanje masa zbog otapanja leda). GRACE misija treba dati znatan doprinos rješavanju tog problema.

Laserska satelitska mjerenja, kojima se udaljenost do satelita mjeri s pouzdanošću 2-3 mm, mjerna je tehnika kojom je utvrđeno da u ekvatorskom području dolazi do gomilanja masa. Pretpostavlja se da je promjena gravitacijskog polja u ekvatorskom području rezultat prijenosa masa oceanom (JPL 2002a). Studije o otapanju polarnog leda upućuju na trostruko povećanje otapanja. Godine 1989. otopljeno je 100 kubičnih kilometara, a u 1998. godini 320 kubnih kilometara leda (Bentley 2002). Polarno otapanje glečera utječe na cirkulaciju oceana, pri čem se velike količine vode premještaju iz polarnih u ekvatorska područja. Podatci GRACE misije omogućiti će da se utvrdi koliko je mase geosustava u gibanju. Omogućit će praćenje gibanja vode u velikim mjerilima. Zbog toga se naziva i misijom praćenja vode.

³ Za razliku od gravitacijskog polja, Zemljino je magnetsko polje mnogo dinamičnije. Zbog toga se globalni magnetski modeli izrađuju redovito za epohe od 5 godina. Zadaju se s pomoću koeficijentata sfernih funkcija koji definiraju globalno statičko magnetsko polje i koeficijentata koji definiraju linearne vremenske promjene modela polja s vremenom (Brkić i dr. 2003).

Oceani mogu vrlo brzo prenositi mase, a masa vode ovisi u prvom redu o salinitetu. AQUARIUS satelitska misija, koju planira JPL, dat će prvi globalni model koncentracije soli u površinskim slojevima oceana, a to je potrebno za procjenu spremljene i transportirane termičke energije u oceanima (ibid.).

Konferencija American Geophysical Union (AGU) održana u San Franciscu u prosincu 2002. godine upozorila je na potrebu dviju satelitskih misija za praćenje klime (Bentley 2002): GRACE i *Ice, Cloud and Land Elevation* (ICESat)⁴. Kombinacija podataka GRACE i ICESat misija imaju velik potencijal za napredno studiranje promjena klime (Velicogna and Wahr 2002).

GRACE je nastavak i nadopuna CHAMP misije. GRACE će za modeliranje gravitacijskog polja osim GPS mjerenja i mjerenja akcelerometara, koristiti i vrlo kvalitetna mjerenja udaljenosti između dvaju GRACE satelita koji služe kao senzori pri njihovu gibanju u Zemljinu gravitacijskom polju (URL 3).

2. Satelitska misija Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)

GRACE misija dio je NASA Earth System Science Pathfinder Program (ESSP) koji je dio NASA Earth Science Enterprise (ESE) programa (NASA 2002a). Ti su programi pokrenuti u svrhu razvoja novih mjernih tehnologija za studiju geosustava. ESSP program uključuje satelitske misije:

- GRACE – dobivanje globalnoga gravitacijskog polja Zemlje, bolje razumijevanje oceanskih struja i prijenosa topline, modeliranje tlaka na oceanskom dnu, nadgledanje gibanja masa oceana, praćenje promjena masa vode i leda na kontinentima (lansiran: 17. 3. 2002.),
- CloudSat – satelitski eksperiment dizajniran da radarom mjeri vertikalnu strukturu oblaka (lansiranje: 15. travnja 2005),
- OCO (Orbiting Carbon Observatory) – određivanje karbon dioksida u atmosferi koji je generator promjene klime,
- AQUARIUS – određivanje površinskog saliniteta oceana (Sea Surface Salinity, SSS) radi povezivanja cirkulacije oceana i klime,
- HYDROS – dobivanje globalnog uvida u promjene vlažnosti tla i odnos smrzavanja/otapanja tla radi povezivanja cirkulacije vode, energije i karbonskog ciklusa.

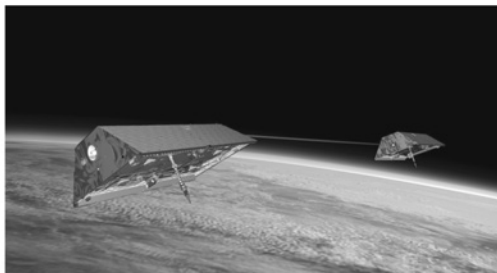
Primarni znanstveni cilj GRACE misije dobivanje je modela Zemljina gravitacijskog polja velike rezolucije i njegovih vremenskih promjena u razdoblju trajanja misije od 5 godina s vremenskom razlučivošću od 30 dana.

⁴ Cilj satelitske misije ICESat prikupljanje je informacija o stanju ledenog pokrivača (NASA 2002c, NASA 2002d). ICESat satelit lansiran je 13.1.2003. i kruži na visini od oko 600 km, u približno kružnoj putanji s inklinacijom od 94°. ICESat daje podatke o morskom ledu, atmosferi, oceanu i kopnu (Zwally i dr. 2002). Primarni znanstveni instrument je Geoscience Laser Altimeter System (GLAS). GLAS je laserski altimeter dizajniran da mjeri topografiju ledenog pokrivača i njegove vremenske promjene te parametre atmosfere. GLAS prikuplja podatke i prilikom preljetanja preko kopnenih i oceanskih područja. Za primjenu na ledom pokrivenim područjima laserski altimeter mjeri visinu od satelita do ledenog pokrivača s preciznošću boljom od 10 cm, a širina je laserskog snopa oko 70 m na ledenoj površini. Mjerene visine i poznavanje pozicije satelita omogućuje dobivanje nepravilnosti topografije. Promjene ledenog pokrivača znatno utječu na nivo mora i zbog toga su kritične informacije za promjenu klime. Glaceolozi nemaju dovoljno kvalitetne podatke da bi sa zadovoljavajućom pouzdanošću mogli utvrditi kako se mijenjaju velika područja pod ledom na Grenlandu i na Antarktici. To je prvi satelitski laserski altimeter koji se koristi za detektiranje balansa masa ledenog pokrivača. Trenutačno su na raspolaganju bolji podatci laserskih altimetrijskih mjerenja za planet Mars nego za Zemlju.

GRACE upotrebljava dva identična satelita u istoj putanji (v. sl. 1 i 2).



Slika 1. GRACE sateliti u izradbi
(© Astrium 6/2001)

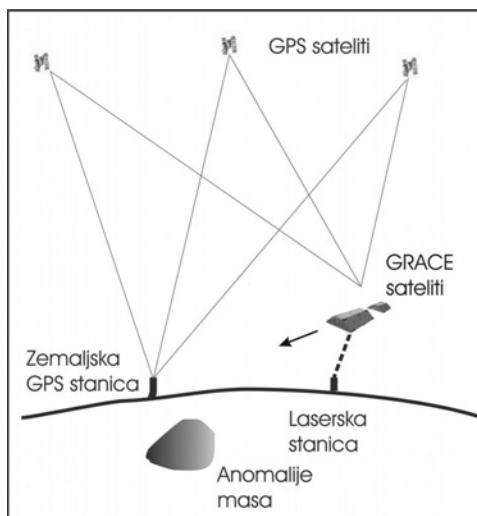


Slika 2. GRACE sateliti u putanji
(© GFZ-Potsdam, Germany)

Primarni je znanstveni cilj misije istraživanje statike i dinamike geosustava kombinacijom GRACE podataka s podatcima različitih geofizičkih modela te terestričkim i satelitskim podatcima. Dodatni je cilj misije unapređenje proučavanja Zemljine atmosfere primjenom GPS radiookultacijskih mjerenja.

Prilikom gibanja GRACE satelita iste anomalije gravitacijskog polja utječu na drugi satelit s zakašnjenjem. Pritom se mijenja udaljenost između satelita koja se kontinuirano mjeri. Sateliti su udaljeni 220 ± 50 km. Ideja o mjerenju promjene udaljenosti između satelita u istoj putanji postoji najmanje 30 godina. Kontinuirano mjerenje udaljenosti između satelita s preciznošću od jednog mikrona omogućuje određivanje minutnih anomalija gravitacijskog polja na površini Zemlje. Zbog gotovo globalne pokrivenosti homogenim podatcima visoke kvalitete, mnoge kompleksne strukture prouzrokovane planinama, ledenim površinama i subdukcijom oceanskih ploča postat će u GRACE modelu jasno raspoznatljive (Baguio i dr. 2002). Na slici 3 prikazana je GRACE konfiguracija.

GRACE sateliti upotrebljavaju se kao senzori kojima se putanja deformira s obzirom na anomalije gravitacijskog polja. Kada prednji satelit prolazi područjem jačega gravitacijskog polja, bit će privučen prema području jačeg polja i njegovo će se gibanje ubrzati. To će povećati razmak između satelita. Nakon što prednji satelit napusti područje povećane gravitacije usporit će, a prateći GRACE satelit će ulaskom u anomalno polje ubrzati. On će



Slika 3. GRACE konfiguracija

ponovno usporiti kada napusti jače anomalno područje. Prilikom kruženja satelita oko Zemlje oni će ubrzavati i usporavati ovisno o anomalijama gravitacijskog polja. Kontinuirano mjerene promjene udaljenosti između GRACE satelita omogućiti će modeliranje anomalija gravitacijskog polja.

Osim znanstvenih krugova, i velike naftne kompanije prate razvoj GRACE misije jer će ona omogućiti daljinska istraživanja Zemljine unutrašnjosti i traženje naftnih polja (Morring 2003), a vojska nalazi interes u GRACE misiji zbog navođenja balističkih projektila kroz anomalno gravitacijsko polje Zemlje.

3. Projekt, institucije i ciljevi GRACE misije

GRACE je zajednički projekt National Aeronautics and Space Administration (NASA) i Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). Od institucija uključenih u realizaciju projekta najvažnije su:

- University of Texas Center for Space Research (UTCSR),
- GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ),
- Jet Propulsion Laboratories (JPL),
- Astrium GmbH,
- Space Systems/Loral (SSL).

Profesor Byorn Tapley iz Centre for Space Research University Texas (UTCSR) predložio je 1996. godine GRACE misiju (Gonzalez 2002). Izabran je za voditelja projekta te je on prvi voditelj NASA-ina svemirskog projekta koji nije NASA-in zaposlenik. Njemački je voditelj GRACE projekta profesor Christoph Reigber iz GFZ-a.

Izradba projekta i satelitskih sustava u nadležnosti je JPL-a, a DLR je odgovoran za provođenje misije (nadgledanje, kontrola i korekcije satelitskih sustava i putanje satelita, prikupljanje i distribucija podataka, itd.). Troškovi misije procijenjeni su na 120 do 130 milijuna USD i podijeljeni su između SAD-a i njemačkih partnera. NASA snosi troškove od približno 97 milijuna USD, a njemački dio iznosi oko 30 milijuna USD.

GRACE misija omogućit će analizu fenomena koji uključuju procese transporta masa. GRACE mjerenja sadržavat će dinamički utjecaj svih masa koje se gibaju. Trebat će razlučiti uzrokuje li promjenu gravitacijskog polja cirkulacija vode, premještanje zračnih masa, geotektonski procesi, premještanje podzemnih masa ili otapanje stijena u unutrašnjosti Zemlje. To su slabi signali pa se razvijaju sofisticiranije tehnike za prostorno-vremensko razlučivanje signala. Obradba ima velike zahtjeve prema hardvaru. U Texas University (TU) već se više godina pripremaju za obradbu GRACE podataka (Stanley 2002). Vremenska rezolucija GRACE podataka je mjesec dana, a to je razdoblje potrebno da bi sateliti prikupili podatke za cijelu Zemlju. GRACE misija će dati prilog (NASA 2002a):

- definiranju novog standarda modeliranja Zemljina gravitacijskog polja,
- spoznaji o promjenama akumulirane vode i snijega na kontinentu,
- spoznaji o promjenama razine mora,
- definiranju novog standarda modeliranja površinskih oceanskih struja,
- modeliranju dubokih oceanskih struja,

- spoznaji o balansu masa ledenih pokrivača i glečera,
- spoznaji o elastičnosti Zemlje,
- spoznaji o isparavanju vode na velikim površinama,
- spoznaji o promjeni vlažnosti tla,
- spoznaji o postglacijalnom izdizanju Zemljine kore,
- spoznaji o izostatskoj ravnoteži,
- spoznaji o oceanskom toku temperature,
- definiranju novog standarda modeliranja
- vertikalnog temperaturnoga gradijenta mora,
- preciznom pozicioniranju,
- određivanju putanje satelita,
- određivanja visina (nivelmanu),
- boljem definiranju oceanografskog utjecaja na cijeli geosustav.

GRACE podatci kombinirat će se s cijelim nizom terestričkih podataka prikupljenih na klasičan način. Promjena položaja masa prouzrokovana hidrološkim procesom može se s velikom sigurnošću detektirati određivanjem korelacije s podacima o oborinama koje prikupljaju meteorolozi. GRACE misija omogućit će bolje razumijevanje promjene klime i njezinih globalnih utjecaja kao što je promjena razine mora i raspoloživih vodenih resursa (Leary 2002).

Nakon otapanja ledenog pokrivača, zbog elastičnih svojstava Zemlje, dolazi do post-glacijalnog vraćanja Zemlje u ravnotežni položaj (Velicogna and Wahr 2002). To je spor proces. On se manifestira u prvom redu kroz izdizanja Zemljine kore, koja utječu na relativnu visinu mora u lokalnim obalnim područjima. Mijenjaju se od mjesta do mjesta, utječu na mareografska mjerenja u obalnim područjima i kompliciraju dobivanje globalne promjene razine mora. Postglacijalno izdizanje utvrđeno je na više područja (Skandinavija, sjeverna Kanada i dr.). GRACE misije omogućit će procjenu iznosa deformacije Zemlje prouzrokovane tim utjecajem.

GRACE misija omogućuje razvoj više područja znanosti. Geodezija dobiva nove standarde modeliranja gravitacijskog polja i dinamički pristup rješavanja problema oblika Zemlje. Hidrolozi će moći bolje modelirati razinu podzemnih voda i promjenu površinskih voda u velikim slivnim bazenima. Glaciolozi će moći pouzdanije pratiti otapanja i stvaranja glečera i ledenih polarnih površina. Geofizičari dobivaju podatke o rasporedu gustoća masa i o mehaničko-fizikalnim svojstvima unutrašnjosti Zemlje i Zemljine kore.

4. Zemaljski segment, sateliti, instrumenti i putanja GRACE misije

GRACE sateliti lansirani su u orbitu oko Zemlje raketom nosačem Rockot/Breeze-KM. u nedjelju 17. 3. 2002. u 9:21:27 UTC s ruskoga kozmodroma Plesetsk (62,7° N, 40,3° E, 800 km od Moskve). Vremenski prozor lansiranja bio je 9:21 – 9:31 UTC. Raketa je proizvedena u Khrunichev State Research and Production Center, a dobivena je na osnovi sovjetskog SS-19 balističkog projektila. Sateliti su lansirani jedan dan kasnije od planiranoga zbog jakoga vjetrova u gornjem dijelu atmosfere (NASA 2002b, URL 5, URL 6, URL 7).

Razdoblje nakon oslobađanja satelita iz rakete nosača bilo je razdoblje povećana rizika misije. Da bi se povećala kontrola satelita u tom razdoblju za telemetriju i prijenos komandi upotrijebljena je NASA-ina mreža polarnih zemaljskih stanica, koje su omogućile postavljanje satelita u stabilnu konfiguraciju i osigurale robusnu, rutinsku kontrolu satelita. Telemetrijske i komandne aktivnosti provodi German Space Operations Center u Oberpfaffenhofenu, a komunikacija sa satelitima provodi se iz zemaljskih stanica Weilheim i Neustrelitz u Njemačkoj.

Sateliti su postavljeni u gotovo kružnu ($e < 0,005$), 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. Sateliti su oslobođeni iz rakete nosača u 10:46:50,875 UTC. Keplerovi elementi razdvajanja su bili:

	GRACE-1	GRACE-2
velika poluos [km]:	6876,4816	6876,9926
numerički ekscentricitet:	0,00040989	0,00049787
inklinacija [$^\circ$]:	89,025446	89,024592
rektascenzija uzlaznog čvora [$^\circ$]:	354,447149	354,442784
argument perigeja [$^\circ$]:	302,414244	316,073923
srednja anomalija [$^\circ$]:	80,713591	67,044158

Nakon razdvajanja prednji se satelit udaljavao relativnom brzinom od 0,5 metara u sekundi i nakon nekoliko dana dosegnuta je tražena udaljenost od 220 km. Sateliti kruže oko Zemlje 16 puta dnevno. Visina satelita će se tijekom misije postupno smanjivati, a nakon pet godina sateliti će ući u troposferu u kojoj će pri padu zbog trenja izgorjeti. Zbog razlika u silama trenja na satelite uzrokovanog atmosferom, putanja će im se po potrebi korigirati svakih 30 do 60 dana (JPL 2002b).

Razvoj GRACE projekta podijeljen je na pet razdoblja:

- *Razdoblje prije lansiranja*, u kojem je razrađen projekt misije, dizajnirani su, izrađeni i testirani sateliti i mjerni instrumenti te formiran zemaljski segment.
- *Lansiranje i rano operacijsko razdoblje* (Launch and Early Operations Phase, LEOP) započelo je trenutkom lansiranja, a završilo je:
 - kada su se oba satelita nalazila u sigurnoj, stabilnoj putanji, međusobno udaljeni oko 220 km, bez opasnosti da može doći do međusobnog sudara, sudara s raketom nosačem ili drugim satelitima,
 - kada je postignuta nominalna kontrola visine obaju satelita,
 - kada je uspostavljena nominalna komunikacija sa satelitima,
 - kada nisu postojali problemi koji bi dovodili misiju u opasnost.
- *Početno razdoblje satelitske misije (Commission phase)* kronološki se nastavlja na LEOP razdoblje. U tom razdoblju uspostavljena je početna opskrba električnom energijom, uključeni su znanstveni instrumenti, uspostavljena je veza između GRACE satelita i provedena početna kalibracija.

- *Razdoblje provjere (Validation phase)* uključuje provjeru i kalibraciju znanstvenih instrumenata i sustava podataka te provođenje svih potrebnih radnji za automatsko dobivanje podatkovnih proizvoda (trajanje: 6 mjeseci).
- *Razdoblje mjerenja* nastavlja se kronološki na prethodno razdoblje i trajat će do kraja misije, s kratkim prekidima za vrijeme manevara satelita i ponovne kalibracije instrumenata.

GRACE projekt podijeljen je na pet sustava:

- *GRACE satelitski sustav* sastoji se od dvaju satelita (GRACE-1 i GRACE-2). Oni su proizvedeni u Astrium GmbH, Friedrichshafen. Glavne dijelove osigurao je JPL i Space Systems/Loral. Osnovne su tehničke specifikacije satelita: širina: 1942 mm, duljina: 3123 mm, visina: 720 mm, masa: 487 kg (svaki satelit). Kao osnova za izradbu satelita upotrebljavana je carbon-fiber plastika. Taj materijal ima vrlo malen koeficijent termičkog širenja i osigurava stabilnost dimenzija neophodnu za precizno mjerenja promjena udaljenosti između satelita. Vanjski oblik satelita optimiran je s obzirom na uvjete aerodinamičnosti. Oba su satelita identična i razlikuju se samo u frekvenciji S-banda za komunikaciju sa Zemljom i frekvencijama korištenima za vezu između satelita. Sateliti GRACE-1 i GRACE-2 zajedno tvore jedan mjerni senzor.
- *Sustav znanstvenih instrumenata* 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.
- *Sustav za lansiranje* uključuje ROCKOT raketu-nosač, opremu, osoblje, testnu opremu za pripremu i lansiranje satelita.
- *Operacijski sustav misije* sastoji se od opreme i resursa German Space Operations Center, antena za praćenje u Weilheimu i Neustrelitzu te mreže NASA-inih polarnih zemaljskih stanica u Wallopsu (Virginia), Poker Flatu (Alaska), McMurdou (Antartika) i Spitzbergen Islandu (Norveška). NASA-ine zemaljske stanice imaju opremu koja je potrebna za podržavanje lansiranja i ranih procedura korekcije putanje. Ta se oprema rabi za praćenje rada satelita, provođenje inicijalne obradbe telemetrijskih podataka i slanje podataka na daljnju obradbu i izradbu znanstvenih proizvoda. Također, prate se satelitske performanse i njihovo stanje za vrijeme trajanja misije. Operacije misije provode se u German Space Operations Center u Oberpfaffenhofenu u Njemačkoj.
- *Sustav znanstvenih podataka* uključuje znanstvenu obradbu, provjeru, distribuciju i arhiviranje proizvoda. Taj sustav podijeljen je između više partnera, što koordinira JPL. Sustav znanstvenih informacija također prima, obrađuje i arhivira sprovedne podatke (npr. meteorološke) potrebne za obradbu i verifikaciju.

Oba GRACE satelita imaju više znanstvenih instrumenata i podsustava (Tapley i Reigber 2002).

K-band daljinomjer osnovni je GRACE-ov znanstveni instrument. Sastoji se od ultrastabilnog oscilatora (Ultra-Stable Oscillator), antene i jedinice za obradbu. K-band mjerna antena služi za odašiljanje i prijam signala u dvostrukom frekventnom području od 24 i 32 GHz. Primjena dviju frekvencija omogućuje ionsfersku korekciju. Ultra-Stable Oscillator (USO) osigurava frekvencijski standard za daljinomjer i služi kao standard za frekvenciju u GRACE satelitima. Omogućuje vrlo precizna mjerenja udaljenosti između GRACE satelita na udaljenosti od 220 ± 50 km. Zahtijevana termička stabilnost K-band daljinomjera i akce-

lerometara u putanji je 0,1 °C. Da bi se osigurala zahtijevana velika pouzdanost mjerenja udaljenosti, sateliti smiju mijenjati svoje dimenzije (u prvom redu zbog velikih termičkih razlika koje se javljaju u putanji) samo za male iznose. Zbog toga su GRACE sateliti građeni od carbon-fiber plastike, koja je postojana pri znatnim promjenama temperature.

Black-Jack GPS prijamnik izradio je JPL. GPS prijamnik mjeri promjene udaljenosti između GRACE i GPS satelita te provodi GPS radiookultacijska mjerenja. GPS podaci koriste se kao referentni za precizno određivanje položaja satelita. GPS mjerenja i mjerenja akcelerometara mogu se koristiti za modeliranje gravitacijskog polja (CHAMP veličine za modeliranje gravitacijskog polja), ali se na osnovi tih mjerenja dobiva uglačaniji signal u kojem se matematičkom obradom ne mogu artikulirati slabi gravitacijski signali. Zbog toga se topografija može znatno bolje raspoznati u GRACE modelima nego što je to slučaj s CHAMP modelima. To se može jasno razaznati na sjevernom dijelu Jadranske obale, gdje se planinski masivi strmo izdižu iz mora i dolazi do značajne promjene gravitacijskog polja (Hećimović i Bašić 2004). Također i usporedba European Vertical Reference Network (EUVN) s CHAMP i GRACE modelima pokazuje znatno manja odstupanja GRACE modela nego što su odstupanja CHAMP modela (Hećimović i dr. 2004). GRACE modeli imaju bolji dugovalni i srednjevalni dio spektra polja ubrzanja sile teže te kratkovalni utjecaj topografije postaje glavno područje modeliranja polja ubrzanja sile teže (Hećimović i Bašić 2004c).

Super Star akcelerometri služe za mjerenje negravitacijskih poremećaja koji djeluju na satelite. Akcelerometri su proizvedeni u ONERA/CNES, Franch National Research Laboratory. Sateliti će ubrzavati i usporavati ne samo zbog razlika u gravitacijskom polju već i zbog drugih negravitacijskih sila koje djeluju na njih (trenje atmosfere, tlak elektromagnetskog zračenja, albedo utjecaj,...). Da bi se negravitacijske sile precizno odredile, test masa akcelerometra mora biti smještena u središtu masa satelita. *Center of Mass Trim Assembly (CMT)* precizno mjeri razmak između središta masa satelita (Center of Mass, COM) i akceleratorске test mase. S pomoću njega se korigira središta masa za vrijeme leta. Da bi se utvrdilo dali testna masa u središtu masa satelita, provodi se niz kalibracijskih manevara. Rezultat kalibracijskih manevara satelita nakon aktiviranja satelita pokazao je da je početno težište udaljeno 0,23 mm od središta akcelerometra, a planirano je da u toj fazi odstupanja budu do 0,3 mm. Mehanizam za korekciju položaja uspješno je aktiviran i promijenjen je položaj težišta. Ispitivanjem težišta, nakon početne kalibracije i prije početka mjerenja, utvrđeno je da je razlika položaja 0,05 mm, a zahtjev je misije 0,1 mm.

Zvjezdana kamera služi za određivanje relativnog položaja GRACE satelita u odnosu na položaj zvijezda. Njom se kontrolira putanja. Po dvije zvjezdane kamere postavljene su u blizini akcelerometra na svakom satelitu. Izrađene su u Danish Technical University u Kopenhagenu. Za finu korekciju položaja satelita *troosni stabilizator visine* upotrebljava zvjezdanukameru i pogonski sustav mlaznica na hladni dušik.

Laserski retro reflektori (LRR) postavljeni su na donjoj strani svakoga GRACE satelita. Oni omogućuju terestričko lasersko praćenje satelita u svrhu provjere određivanja putanje. Reflektori su proizvedeni u GFZ-u i identični su reflektorima iz

CHAMP misije. Laserski reflektor osigurava dovoljno jak reflektirajući signal za dnevna i noćna laserska mjerenja.

Grubi Zemlja-Sunce senzor (Coarse Earth and Sun Sensor, CES) osigurava orijentaciju satelitskog referentnog okvira s obzirom na Zemlju i Sunce. On će osigurati pouzdanu i robusnu orijentaciju s obzirom na Zemlju i Sunce.

Sustav za snabdijevanje električnom energijom odgovoran je za proizvodnju, spremanje i snabdijevanje sustava električnom energijom. Električna energija proizvodi se s pomoću solarnih ćelija koje pokrivaju vanjske plohe satelita. One se sastoje od četiri ploče na svakom satelitu. Električna energija pohranjuje se u baterije od 10 nickel-hydrogen ćelija koje osiguravaju napon od 28 volti i 16 ampersati za svaki satelit.

Podsustav termičke kontrole odgovoran je za održavanje stalne temperature komponenti satelita. Sastoji se od toplinskih senzora i 64 neovisna grijača. Sustav održava sve kritične elektronske dijelove i dijelove sustava na konstantnoj temperaturi.

Telemetrija i podsustav telekomandi omogućuje komunikaciju satelita sa Zemljom. Upotrebljava se radiosustav u mikrovalnom S-bandu. Svaki satelit upotrebljava različite frekvencije za slanje i primanje podataka. *Elektronski radiofrekvencijski sustav* prima podatke iz središnjeg procesora i priprema ih za S-band slanje zemaljskom sustavu. Oko 100 Mb podataka bit će svaki dan poslani na Zemlju sa svakoga GRACE satelita. Na vrhu i dnu satelita postoje pomoćne antene koje će osigurati komunikaciju u slučaju kvara glavne antene.

Stavljanje znanstvenih instrumenata u pogon odvijalo se postupno tijekom:

- ultrastabilni oscilator: 17. 3. 2002. u 22:20:53 za GRACE-1, a u 23:49:23 za GRACE-2,
- GPS prijammik: 18. 3. 2002. u 7:30:36 za GRACE-1, a u 10:33:00 za GRACE-2,
- akcelerometar: 21. 3. 2002. u 16:39:41 za GRACE-1, a u 22:24:33 za GRACE-2,
- K-band daljinomjer: 25. 3. 2002. u 13:40:01 za GRACE-1, a u 8:8:59 za GRACE-2,
- zvjezdane kamere su stavljene u pogon nekoliko sati nakon uključivanja GPS prijammika.

Inertial Measuring Unit (žiroskop) na GRACE-1 satelitu otkazao je 1 sat i 40 minuta nakon lansiranja. Zbog tog problema uspjeh GRACE misije nije bio upitan jer se ta mjerenja mogu zamijeniti podacima s drugih senzora za kontrolu visine i putanje.

Dana 22. 3. 2002. otkazao je ultra stabilni oscilator USO-001 na GRACE-1 akcelerometru. Problem je riješen uključivanjem pomoćnog oscilatora USO-003.

Sateliti su troosno stabilizirani, tj. njihova je orijentacija u prostoru fiksna i nemaju slobodu rotacije. Visina i kontrola smjera putanje GRACE satelita provodi se s pomoću više senzora. Primarni senzor za kontrolu visine je zvjezdana kamera, a koriste se još tri dodatna senzora:

- senzor Zemlja-Sunce koji osigurava grubu kontrolu putanje za vrijeme misije,
- žiroskop, koji osigurava razlike visina putanje,
- magnetometar, koji osigurava grube visine s obzirom na visine satelita određene na osnovi obradbe GPS mjerenja u satelitima i na osnovi modela Zemljina magnetskog polja.

5. Mjerenja

Prikupljena mjerenja u GRACE misiji mogu se podijeliti na mjerenja za potrebe modeliranja gravitacijskog polja i podatke o atmosferi. Mjerenjima će se prikupljati podatci:

- Zemljino gravitacijsko polje:
 - mjerenje udaljenosti između satelita s pomoću K-band daljinomjera,
 - mjerenje položaja satelita s pomoću GPS prijavnika u oba satelita,
 - mjerenje negravitacijskih sila akcelerometrom u oba satelita,
- Za atmosferu:
 - mjerenje deformacije GPS signala na putanji GRACE–GPS sateliti. GPS radiookultacijska mjerenja provode se samo s jednim GRACE satelitom.

Kvaliteta mjerenih veličina za modeliranje gravitacijskog polja (Baguio i dr. 2002):

- mjerenje udaljenosti između GRACE satelita
 - < 4 μm relativno,
 - < 10 μm apsolutno,
- precizna određivanja položaja putanje satelita
 - < 0,2 mm relativno,
 - 5 cm apsolutno.

Niskoleteći GRACE satelit zbog dugog prolaska GPS signala kroz atmosferu pogodan je za GPS radiookultacijska mjerenja. Njima se određuju: gustoća, tlak, temperatura atmosfere i količina vodena para u njoj. Dodatno će se moći odrediti Total Electron Content (TEC). Vertikalni profili atmosfere moraju biti određeni dovoljno brzo da bi zadovoljili zahtjeve kratkoročne meteorološke predikcije vremena.

Testna laserska mjerenja provedena su s mreže terestričkih laserskih stanica. Mjerenje je 3 do 4 preleta GRACE satelita dnevno s oko 15 globalno raspoređenih laserskih stanica. Rezultati daju pouzdanost bolju od 5 mm za mjerenja udaljenosti u dva smjera. Provedena laserska kampanja ocijenjena je vrlo uspješnom s obzirom na to da su GRACE sateliti niskoleteći. Laserska mjerenja koriste se za: precizno određivanje putanje satelita, kalibraciju GPS prijavnika i eksperiment mjerenja duljine na osnovi kojeg će se ispitati ispravnost primjene postojeće troposferske redukcije.

6. GRACE proizvodi podataka i servisi

Prva obradba podataka provodi se u središnjem procesoru GRACE satelita. On osigurava potrebne uvjete za rad mjernih instrumenata (provodi nadzor snabdijevanja električnom energijom, kontrolira temperaturne uvjete, provodi kontrolu visine i putanje i dr.) te dodatno provjerava ispravnost funkcioniranja satelitskih sustava uključujući lokalizaciju i ispravak pogrešaka. GRACE proizvodi podataka podijeljeni su s obzirom na obradbu na tri nivoa:

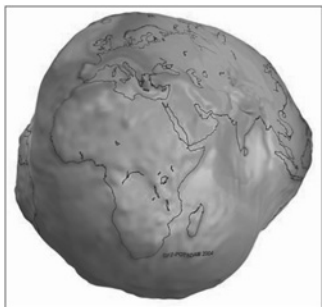
- *Nivo-0* sirovi su telemetrijski podatci koji se dobiju u zemaljskoj stranici DLR Raw Data Center (RDC). Oko 99,5% sirovih podataka zadovoljava uvjete da se mogu poslati na daljnju obradbu.

- *Nivo-1* sadrži mjerenja: K-band daljinomjera, akcelerometara, zvjezdana kamera i GPS prijamnika s oba satelita. Na tom nivou obradbe uvode se kalibracijski faktori senzora, pridružuju se argumenti vremena, dodaju se atributi kontrole kvalitete podataka. Taj nivo uključuje i preliminarne putanje GRACE satelita. Obradba se provodi u JPL-u. Nakon obradbe podatci 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.

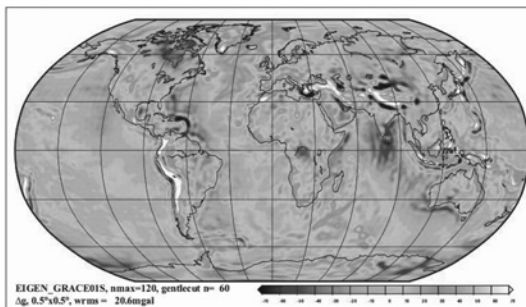
7. Dosadašnji rezultati GRACE misije

Prvi preliminarni GRACE model gravitacijskog polja dobiven je primjenom 14 dana mjerenja. Preliminarni GRACE model gravitacijskog polja obuhvaća valne duljine od približno 1000 km (Bridges 2002a). Primjenom sljedećih 35 dana mjerenja smanjena je rezolucija na približno 500 km (Bridges 2002b). Već je tim modelima GRACE misija nagovijestila da će definirati nove standarde modeliranja Zemljina gravitacijskog polja.

Prvi nepreliminarni GRACE model EIGEN-GRACE01S dobiven je primjenom 39 dana GRACE mjerenja od kolovoza do studenoga 2002. godine. Korištena su mjerenja K-band daljinomjera, akcelerometara i mjerenja visine. Model je razvijen do stupnja i reda 120 (odabrani koeficijenti do 140). GRACE model geoida EIGEN-GRACE01S prikazan je na slici 4, a na slici 5 prikazane su njegove anomalije ubrzanja sile teže.



Slika 4. GRACE globalni model geoida EIGEN-GRACE01S (Reigber i dr. 2003)



Slika 5. Anomalije ubrzanja sile teže modela EIGEN-GRACE01S (Reigber i dr. 2003)

Za dobivanje modela GGM01S korištena su GRACE mjerenja udaljenosti K-band daljinomjera, visine i podatci akcelerometara od travnja do studenoga 2002. Primjenom istih GRACE podataka i dodatnih terestričkih i altimetrijskih podataka dobiven je model GGM01C koji je razvijen do stupnja i reda 200.

Rezultati GRACE misije mogu se naći u više znanstvenih i stručnih publikacija i članaka. GRACE je redovita tema većeg broja simpozija i skupova, a održavaju se i

posebni znanstveni skupovi posvećeni samo GRACE misiji. Više o njoj i najnovijim rezultatima može se naći i na većem broju internetskih stranica. Važnije su GRACE internetske stranice: The University of Texas at Austin, Center for Space Research (<http://www.csr.utexas.edu/grace/>), GFZ Potsdam (http://op.gfz-potsdam.de/grace/index_GRACE.html), Jet Propulsion Laboratory (<http://www.jpl.nasa.gov/missions/current/grace.html>), ESSP, NASA (<http://essp.gsfc.nasa.gov/grace/>).

8. Zaključak

GRACE misija dio je programa NASA Earth System Science Pathfinder Program (ESSP) i NASA Earth Science Enterprise (ESE). Misiju realiziraju NASA (USA) i Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) (Njemačka). To je, nakon CHAMP misije, druga satelitska misija koja znatno utječe na razvoj i standarde modeliranja Zemljina gravitacijskog polja. Primarni znanstveni cilj misije dobivanje je globalnog modela Zemljina gravitacijskog polja velike rezolucije uključujući i njegove vremenske promjene te istraživanje statike i dinamike geosustava. GRACE će prikupljati podatke o promjenama Zemljina gravitacijskog polja koje uzrokuju ukupno gibanje svih masa u geosustavu (hidrološka cirkulacija vode, gibanje tektonskih ploča, gibanje magme i dr.). Svaki se od procesa odvija u drugoj prostorno-vremenskoj skali. Sofisticiranim modeliranjem prostorno-vremenskih signala i kombinacijom podataka iz drugih izvora razlučuju se pojedini procesi. Već je prvi GRACE model znatno pomaknuo granice kvalitete globalnih geopotencijalnih modela, a puni GRACE doprinosi problematici modeliranja Zemljina gravitacijskog polja tek se očekuje. Temeljni problem geodezije, određivanje Zemljina oblika, primjenom GRACE podataka postat će dinamički problem. To će omogućiti razvoj geodezije na novim načelima i novi pristup rješavanju geodetskih stručnih i znanstvenih problema. Potencijal GRACE misije jasno je artikuliran ne samo u znanstvenim krugovima već i u široj zajednici, a velika očekivanja potvrđena su dosadašnjim rezultatima. GRACE će imati velikog utjecaja na razvoj geodezije, geofizike, geologije, hidrologije, oceanografije i srodnih područja.

Literatura

- Adam, D. (2002): Gravity measurement: Amazing GRACE. *Nature*, 416, 10–11.
- Baguio, M., Bandeen, B., Griner, C., King, M., Srinivasan, M. (Eds.) (2002): GRACE, Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) mission. NASA, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, NP-2002-2-427-GSFC.
- Bašić, T. (1989): Untersuchungen zur regionalen Geoidbestimmung mit "dm" Genauigkeit. *Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover*, Nr. 157, Dissertation, Hannover.
- Bašić, T., Hećimović, Ž. (2004): Latest Geoid Determinations for the Republic of Croatia. IAG International Symposium – Gravity, Geoid and Space Missions – GGSM2004, Porto, Portugal, from August 30th to September 3rd, 2004.
- Bently, M. (2002): Earth's equatorial "obesity". *BBC News Online*, San Francisco (11. 12. 2002.).

- Bridges, A. (2002a): Satellites offer unprecedented map of Earth's gravitational field. Anchorage Daily News, <http://adn.com> (6. 9. 2002.).
- Bridges, A. (2002b): Earth's Gravitational Field Mapped. Associated Press. Las Vegas Sun, <http://www.lasvegassun.com> (6. 9. 2002.).
- Brkić, M., Hećimović, Ž., Bašić, T. (2003): Geomagnetska deklinacija na prostoru Hrvatske na temelju globalnih geomagnetskih modela. Geodetski list, God. 57 (80), broj 1, str. 1–15, Zagreb.
- Gonzalez, E. (2002): UT professor first non-NASA employee to direct mission. The Daily Texan, Mar. 06, 2002.
- Hećimović, Ž., Bašić, T. (2003): Globalni geopotencijalni modeli na teritoriju Hrvatske. Geodetski list, God. 57 (80), broj 2, str. 73–89, Zagreb.
- Hećimović, Ž., Bašić, T. (2004): Comparison of CHAMP and GRACE geoid models with Croatian HRG2000 geoid. 1st General Assembly European Geosciences Union (EGU), Nice, France, from 25 – 30 April 2004.
- Hećimović, Ž., Barišić, B., Grgić, I. (2004): European Vertical Reference Network (EUVN) considering CHAMP and GRACE-gravity models. Symposium of the IAG Subcommission for Europe. European Reference Frame – EUREF 2004, Bratislava, Slovakia, 2 – 5 June 2004.
- Hećimović, Ž., Bašić, T. (2004a): Satelitska misija CHALLENGING Minisatellite Payload (CHAMP). Geodetski list. God 59(82), broj 2, str. 129-147. Zagreb, lipanj 2005.
- Hećimović, Ž., Bašić, T. (2004b): Satelitska misija Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer (GOCE). Prihvaćeno za objavljivanje u Geodetskom listu.
- Hećimović, Ž., Bašić, T. (2004c): Modeling of topographic effect on gravity field parameters in Croatia. IAG International Symposium – Gravity, Geoid and Space Missions – GGSM2004, Porto, Portugal, from August 30th to September 3rd, 2004.
- IGS (1996): International Geoid Service Bulletin No. 6. The Earth Gravity Model EGM96: Testing Procedures at IGES. Special Issue, Istituto Nazionale di Geofisica, Milano.
- JPL (2002a): Scientists Say "Grace" as Water-Sensing Satellite Lift Off. JPL News (17. 3. 2002.).
- JPL (2002b): Satellites Reveal Mystery of Large Change in Earth's Gravity Field (5. 8. 2002.).
- Leary, W. E. (2002): New Satellites to Map Gravity More Precisely. The New York Times, (19. 3. 2002.).
- Malik, T. (2002): Researchers to Use Satellite Due to Measure Earth's Gravity Field, <http://space.com> (28. 2. 2002.).
- Morring, F. (2002): Orbiting Gravity Mappers Might Spot Oil Fields. <http://www.AviationNew.com> (3. 1. 2002.).
- MSNBC (2002): Russians tout next-generation launch vehicles. Technology Space News (19. 3. 2002.).
- NASA (2002a): The Earth System Science Pathfinder Series. NASA Facts, Goddard Space Flight Center, FS-2002-1-029-GSFC.
- NASA (2002b): GRACE Launch. Press kit. March 2002.
- NASA (2002c): Ice, Cloud, and land Elevation Satellite (ICESat). NASA Facts. Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland.

- NASA (2002d): Ice, Cloud, and land Elevation Satellite (ICESat). Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, FS-2002-9-047-GSFC.
- Reigber, Ch., Schwintzer, P., Neumayer (2003): First GFZ GRACE gravity field model EIGEN-GRACE01S released on July 25, 2003. URL: <http://op.gfz-potsdam.de/grace/> (17. 9. 2003.).
- Sanso, F., Rummel, R. (1997): Geodetic Boundary Value Problems in View of the One Centimeter Geoid. Springer Verlag. Berlin, Heidelberg.
- Stanley, D. (2002): UT space center to help run NASA mission. <http://statesman.com> (3. 1. 2002.).
- Tapley, B., Reigber, Ch. (2002): GRACE Newsletter, No.1, GFZ, CSR, DLR, NASA.
- Velicogna, I., Wahr, J. (2002): A method for separating Antarctica postglacial rebound and ice mass balance using future ICESat Geosciences Laser Altimeter System, Gravity Recovery and Climate Experiment, and GPS satellite data. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 107.
- Zwally, H. J., Schutz, B., Abdalati, W., Abshire, J., Bentley, C., Brenner, A., Bufton, J., Dezio, J., Hancock, D., Hading, D., Herring, T., Minister, B., Quinn, K., Palm, S., Spinhirne, J., Thomas, R. (2002): ICESat's laser measurements of polar ice, atmosphere, ocean, and land. *Journal of Geodynamics* 34, 405–445. Pergamon press.
- URL 1: GRACE-haiku, http://2001-07_haiku.htm (28. 02. 2002.).
- URL 2: Space Science Feature. Amazing GRACE, <http://Science@NASA> (7. 3. 2002.).
- URL 3: Das Schwerefeld der Erde erkunden, <http://3satonline.html> (15.3.2002.).
- URL 4: Long term Sea Level Change. Center for Space Research, The University of Texas at Austin, <http://www.csr.utexas.edu/> (30. 7. 2003.).
- URL 5: Twin Spacecraft Launched on Mission to Measure Earth's Gravity, <http://space.com> (17. 3. 2002.).
- URL 6: Rocket launches GRACE satellites. Spacetoday. <http://spacetoday.net> (17. 3. 2002.).
- URL 7: Gravity mapping satellites launched into space. SpaceDaily. <http://www.spacedaily.com/> (17. 3. 2002.).

Satellite mission Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)

ABSTRACT. GRACE is satellite mission with the primary goal of sensing the Earth's gravity field, and collecting atmospheric parameters using GPS-radio occultation measurement as the secondary goal. GRACE-mission is using two satellites in the same orbit as sensors for scanning gravity field. The main GRACE gravity field modeling data are continuous high precision distances measurements between GRACE-satellites. Earth gravity field is changing, in annual scale, for small amounts and it is dominantly static field. GRACE-mission will sense weak gravity signals of moving masses in hydrological cycles, moving of the plate tectonic, moving of

the magma and other masses. GRACE-satellites need one month to collect data for the whole Earth, and GRACE-gravity models are made on monthly basis. GRACE-gravity models are developed to high resolutions. Using sophisticated mathematical modeling, topography signal is clearly recovered from GRACE gravity field measurements. One of the first GRACE-gravity field models is GGM01S. It is developed up to degree and order 120 (selected coefficients up to 140). Problem of determining figure of the Earth using GRACE-data will become dynamical problem. GRACE-mission has big influence on development of geodesy, geology, hydrology and oceanography.

Key words: GRACE, satellite mission, geosystem, mass movements, water circulation, static and dynamic Earth's gravity field.