

UDK 528.563.026.2:528.41(497.5)

Izvorni znanstveni članak

# Osnovna gravimetrijska mreža Republike Hrvatske

**Tomislav BAŠIĆ<sup>1</sup>, Danko MARKOVINOVIĆ<sup>2</sup>, Milan REZO<sup>3</sup> – Zagreb**

*SAŽETAK.* U radu se daje pregled dosadašnjih gravimetrijskih mjerenja na području Hrvatske te prikaz uspostave nove Osnovne gravimetrijske mreže (OGM) Republike Hrvatske. Ta se mreža sastoji od ukupno 42 točke, od čega je 6 apsolutnih gravimetrijskih točaka (Gravimetrijska mreža 0. reda) i 36 relativnih gravimetrijskih točaka (Gravimetrijska mreža I. reda). Nulta serija mjerenja u OGM-u obavljena je dvama relativnim gravimetrima Scintrex CG-3M i jednim Scintrex CG-5 u razdoblju od lipnja do kolovoza 2003. godine. U nastavku su prikazani obradba i izjednačenje tih mjerenja te je dana analiza rezultata za konačne vrijednosti ubrzanja sile teže temeljem provedenih izjednačenja. U svrhu dobivanja pouzdane transformacije između Potsdamskog sustava i gravimetrijskog sustava IGSN71 izračunani su transformacijski parametri te je dana njihova ocjena točnosti.

*Ključne riječi:* Osnovna gravimetrijska mreža, gravimetri, apsolutna i relativna gravimetrijska mjerenja, obradba podataka, izjednačenje, transformacija.

## 1. Uvod

Nakon osamostaljenja Republike Hrvatske jedna od glavnih zadaća geodetske struke bila je obnova osnovnih geodetskih radova, kao temelja za sve ostale geodetske radove. Osnovni geodetski radovi u nadležnosti su Državne geodetske uprave i definirani su Zakonom o državnoj izmjeri i katastru nekretnina (Narodne novine 128/1999), gdje među ostalim stoji da se u njih ubrajaju i temeljni gravimetrijski radovi. Vlada Republike Hrvatske donijela je 4. kolovoza 2004. godine Odluku o utvrđivanju službenih geodetskih datuma i ravninskih kartografskih projekcija Republike Hrvatske (Narodne novine 110/2004), kojom je osim novoga položajnog i visinskog datuma prvi put zakonski definiran i gravimetrijski datum naše države (za više detalja vidi Bašić 2004).

<sup>1</sup> prof. dr. sc. Tomislav Bašić, Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet, Zavod za geomatiku, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, e-mail: [tomislav.basic@geof.hr](mailto:tomislav.basic@geof.hr)

<sup>2</sup> mr. sc. Danko Markovinović, Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet, Zavod za geomatiku, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, e-mail: [danko.markovinovic@geof.hr](mailto:danko.markovinovic@geof.hr)

<sup>3</sup> mr. sc. Milan Rezo, Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet, Zavod za geomatiku, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, e-mail: [mrezo@geof.hr](mailto:mrezo@geof.hr)

Zašto je ubrzanje sile teže odnosno Zemljino polje ubrzanja sile teže toliko značajno za geodeziju? Prema klasičnoj (nešto skraćenoj) definiciji geodezija je znanost koja se bavi određivanjem oblika i vanjskog polja ubrzanja sile teže Zemlje i drugih nebeskih tijela kao vremenski promjenljivih veličina, i to na osnovi opažanih parametara na Zemljinoj fizičkoj površini i izvan nje (Torge 1991). Zbog toga se geodezija ubraja kako u inženjerske znanosti tako i u geoznanosti. Budući da se praktična realizacija gravimetrijskog datuma zasniva na osnovnim gravimetrijskim mrežama, u nastavku slijedi prikaz uspostave i realizacije nove Osnovne gravimetrijske mreže Hrvatske. Službena jedinica za ubrzanje sile teže u SI-sustavu jedinica je  $1 \text{ ms}^{-2}$ , dok se u praksi češće koriste manje jedinice kao što su  $1 \mu\text{ms}^{-2} = 1 \times 10^{-6} \text{ ms}^{-2}$  (engl. gravity unit) i  $1 \text{ nms}^{-2} = 1 \times 10^{-9} \text{ ms}^{-2}$ , ali i stare (službeno nedopuštene) jedinice  $1 \text{ mGal} = 1 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$  i  $1 \mu\text{Gal} = 1 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$  (Bašić 2005).

## 2. Kratak povijesni pregled gravimetrijskih mjerenja na području Hrvatske

U XX. stoljeću bila su uspostavljena tri gravimetrijska referentna sustava s osnovnom zadaćom apsolutnog definiranja ubrzanja sile teže: Bečki sustav (1900), Potsdamski sustav (1909) te Internacionalna gravimetrijska standardna mreža 1971 – IGSN71 (1971), (Torge 1989). Gravimetrijska mjerenja na području bivše Jugoslavije bila su vezana na Potsdamski sustav apsolutnih vrijednosti ubrzanja sile teže relativnim mjerenjima između zračnih luka Zemun i Pariz. U realizaciji IGSN71 bile su s tog područja uključene samo tri točke, od kojih se jedna nalazi na području Zagreba (Grašić 1976).

Nakon osamostaljenja Republike Hrvatske uspostavljeno je do sada šest apsolutnih gravimetrijskih točaka. Od 1. do 13. lipnja 1996. godine u sklopu projekta UNIGRACE (Unification of Gravity Systems in Central and Eastern Europe) provedena su mjerenja na četiri točke apsolutnim gravimetrom tvrtke AXIS, model FG5, broj 101 (FG5-101), u vlasništvu Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) iz Frankfurta (Čolić i dr. 1999). Dvije se točke nalaze u Zagrebu (Maksimir, Puntijarka), a po jedna u Puli i Makarskoj. Razlog za dvije točke na području Zagreba je taj što se prilikom mjerenja u Maksimiru osjećao dosta velik efekt ljudske mikroseizmike, koji je rezultirao nešto većom standardnom devijacijom izmjerene apsolutne vrijednosti ubrzanja sile teže ( $37 \text{ nms}^{-2}$ ), pa se je stoga prešlo na Puntijarku. Drugi dio projekta UNIGRACE proveden je kod nas tijekom 1999. i 2000. godine, a obuhvatio je apsolutna mjerenja na točkama Dubrovnik i Osijek (Medak i dr. 2001). Osim apsolutnoga gravimetra FG5-101, po jedno mjerenje na svakoj od tih točaka obavljeno je uređajem FG5-206 u vlasništvu Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre (EOST), sa sveučilišta u Strasbourgu, Francuska. Veća standardna devijacija jednog mjerenja u Dubrovniku ( $75 \text{ nms}^{-2}$ ) pripisuje se utjecaju jakoga juga tijekom mjerenja (vidi tablicu 3). Mnogo više sistematiziranih podataka o tome može se naći u (HGI 2002).

Što se tiče relativnih gravimetrijskih mjerenja, 1952-1953. godine uspostavljena je gravimetrijska mreža I. reda bivše Jugoslavije, s ukupno 15 točaka (u Hrvatskoj u Zagrebu, Puli, Dubrovniku, Borovu, Zadru i Sinju). Gravimetrijska mreža II. reda postavljena je na teritoriju Hrvatske u razdoblju od 1958. do 1960. godine, prateći i zatvarajući poligone duž nivelmana visoke točnosti (NVT). U razdoblju od 1964. do 1967. godine uspostavila je tadašnja Savezna geodetska uprava Osnovnu gravime-

trijisku mrežu (slika 1), koju je činilo ukupno 55 zatvorenih poligona s 350 glavnih točaka (na međusobnoj udaljenosti oko 30 km) i 1150 pomoćnih točaka (na međusobnoj udaljenosti oko 10 km). Tijekom 1969. godine gravimetrijska je mreža bila povezana s talijanskom preko točaka u Dubrovniku i Rimu. Nakon raspada bivše države Republika Hrvatska nema za sada pristup tim podacima (sukcesijsko pitanje), s iznimkom položajnih opisa za 84 glavne točke koje se nalaze na njezinu teritoriju. Pretpostavka je da se veliki dio podataka nalazi u Vojno-geografskom institutu u Beogradu. Za više informacija o gravimetrijskim mjerenjima na teritoriju bivše države vidi u (Grašić 1968, Grašić 1970, Grašić 1974, Bilibajkić i dr. 1979, Markovinović 2001). Izrađene su i karte Bougerovih anomalija i anomalija slobodnog zraka, a raspolaže se i velikim brojem točkastih vrijednosti ubrzanja sile teže, koje su upotrijebljene za najnovija računanja plohe geoida za cjelokupno područje Hrvatske i šire (Bašić i dr. 1999, Bašić 2001).



Slika 1. Osnovna gravimetrijska mreža bivše Jugoslavije.

### 3. Osnovna gravimetrijska mreža Republike Hrvatske

U skladu s modernim konceptom, Osnovna gravimetrijska mreža Republike Hrvatske sastoji se od Gravimetrijske mreže 0. reda, koju čine apsolutne gravimetrijske točke, te Gravimetrijske mreže I. reda, koju čine relativne gravimetrijske točke najvišeg reda (Markovinović 2001, Bašić i Markovinović 2002).

### 3.1 Gravimetrijska mreža 0. reda

Gravimetrijska mreža 0. reda Republike Hrvatske sastoji se od 6 točaka (Bašić i dr. 2001a, 2001b). To su: Zagreb-Puntijarka, Zagreb-Maksimir, Pula, Osijek, Makarska i Dubrovnik. Točka Zagreb-Puntijarka nalazi se u podrumskoj prostoriji objekta na Sljemenu (pokraj meteorološke postaje). Zagreb-Maksimir je točka koja se nalazi u astronomskom paviljonu Geodetskog fakulteta u maksimirskoj šumi. Točke Pula i Makarska postavljene su u atomska skloništa hotela Histria odnosno Biokovka, dok se točka u Osijeku također nalazi u atomskom skloništu naselja Jug 2. U Dubrovniku je za stajalište apsolutne gravimetrijske točke odabrano sklonište Dubrovačkoga kriznog centra. Sve prostorije u kojima se nalaze apsolutne točke dobro su termički izolirane, što rezultira malim temperaturnim varijacijama tijekom dana. U svim su prostorijama betonski podovi, površina svake je najmanje 2 x 3 m, što je dovoljno za postavljanje cjelokupnog instrumentarija. Pristup je točkama lagan i svaka prostorija ima priključak na električnu energiju. Točke su izvan gustog cestovnog prometa, osim točke u Maksimiru, koja se nalazi relativno blizu frekvene Maksimirske ulice u Zagrebu, što je i rezultiralo većim utjecajem mikro-seizmike tijekom mjerenja.

Obilaskom točaka gravimetrijske mreže 0. reda ustanovilo se, na žalost, da je apsolutna gravimetrijska točka u Makarskoj u međuvremenu uništena (preuređenjem atomskog skloništa hotela Biokovka). Ta je točka svojim položajem i određenom apsolutnom vrijednosti ubrzanja sile teže pokrivala veliki dio naše države u smislu povezivanja relativnih gravimetrijskih mjerenja. Šteta je još veća s obzirom na to da je uništena točka trebala biti i završna točka predviđene gravimetrijske kalibracijske baze (Markovinović 2001).

U tablici 1. daje se nova numeracija točaka Gravimetrijske mreže 0. reda uključujući i shemu koja objašnjava sam način te numeracije. Uvažavajući tu numeraciju i činjenicu da je apsolutna točka u Makarskoj uništena, to je umjesto nje uključena ekscentrična postaja AGT05E u tamošnjem Malakološkome muzeju (raspored točaka gravimetrijske mreže 0. reda može se vidjeti na slici 5).

Tablica 1. Nova numeracija točaka u gravimetrijskoj mreži 0. reda.

Oznaka	Apsolutna točka
AGT01	Osijek
AGT02	Maksimir
AGT03	Sljeme-Puntijarka
AGT04	Pula
AGT05E	Makarska
AGT06	Dubrovnik

A G T 0 1

→ BROJ TOČKE

→ OZNAKA REDA GRAVIMETRIJSKE MREŽE

→ OZNAKA ZA GRAVIMETRIJSKU TOČKU

→ OZNAKA ZA APSOLUTNU GRAVIMETRIJSKU TOČKU

Uspostava apsolutnih gravimetrijskih točaka zahtjevan je i skup proces. Stoga je u svrhu očuvanja od daljnega mogućeg uništenja, a budući da to na žalost nije učinjeno odmah pri njihovoj uspostavi, trebalo što prije predvidjeti za svaku točku apso-

lutne gravimetrije uspostavu do 3 ekscentra. Takve se ekscentrične točke u pravilu postavljaju na udaljenosti od 500 m do 5 km od apsolutne točke (Wilmes i dr. 1995). Tako uspostavljene ekscentrične točke međusobno se povezuju relativnim gravimetrijskim mjerenjima. Razlika vrijednosti ubrzanja sile teže na takvim točkama treba biti manja od  $100 \mu\text{ms}^{-2}$  (Schüler 2000).

Zato su u okviru projekta “Stabilizacija točaka mikrogravimetrijskih mreža na pet apsolutnih gravimetrijskih točaka – I. faza” svakoj apsolutnoj gravimetrijskoj točki Republike Hrvatske pridružena po tri ekscentra (Bašić i dr. 2004d). Točke su postavljene tako da im je pristup lagan, da su osigurane geološka i hidrološka stabilnost te da se još potrebna gravimetrijska, GPS i nivelmanska mjerenja mogu lako provesti. Za AGT01 Osijek ekscentri su: E1 Građevinski školski centar, E2 Umaška ulica (spomenik “Mato Šabić”), E3 kraj crkve u Ul. J. Gojkovića; za AGT02 Maksimir: E1 Geodetski fakultet; za AGT03 Sljeme: E1 Maksimir (Opservatorij), E2 hotel “Janica”, E3 proplanak kraj križanja za “Grafičar”; za AGT04 Pula: E1 Verudela-Histria, E2 Piramida, E3 brdo iznad Vinkurana; za AGT05E Makarska: E1 vrh Gradac, E2 rt Osejava, E3 poluotok Sv. Petar i za AGT06 Dubrovnik: E1 Gradac, E2 put za bolnicu i E3 Babin kuk (više u Bašić i dr. 2004d).

### 3.2 Gravimetrijska mreža I. reda

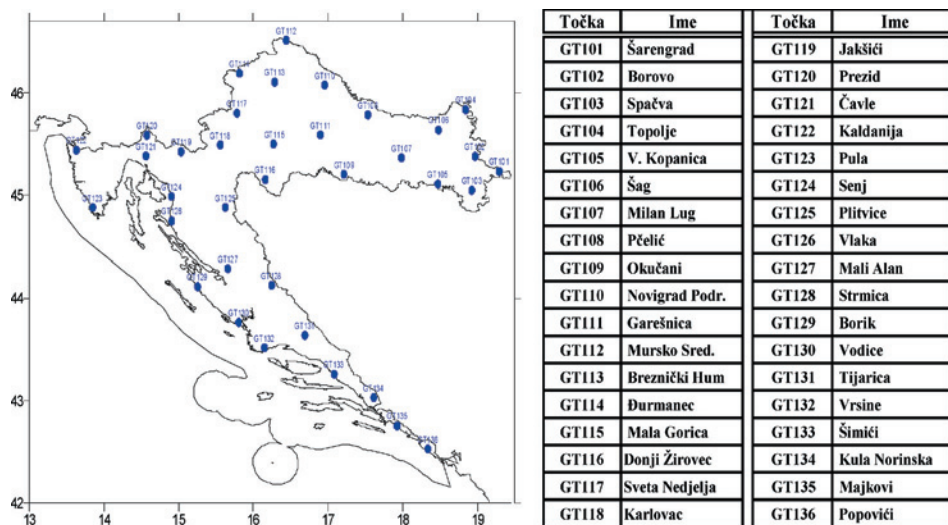
Gravimetrijska mreža I. reda sastoji se od 36 točaka raspoređenih na kopnenom dijelu Republike Hrvatske, gdje je gustoća postavljenih točaka takva da je udaljenost između njih od 50 do 110 km. Od toga je pri definiranju idejnog projekta mreže 25 sačuvanih lokacija preuzeto iz Osnovne gravimetrijske mreže bivše Jugoslavije (Bašić i dr. 2001a, 2001b), a 11 je novopostavljenih gravimetrijskih točaka (Markovinović 2001, Bašić i Markovinović 2002). Točke preuzete iz bivše Osnovne gravimetrijske mreže stabilizirane su betonskim stupom dimenzija  $50 \times 50 \times 100$  cm (slika 2 lijevo) ili uklesanim kvadratom dimenzija  $50 \times 50$  cm te slovima GT i križem u živoj stijeni (kraško područje), dok glavni dio nove stabilizacije čini betonski valjak  $50 \times 100$  cm (slika 2 desno).



Slika 2. Stara stabilizacija gravimetrijske točke betonskim stupom (lijevo) te nova stabilizacija betonskim valjkom (desno).

Obilaskom točaka te mreže ustanovljeno je da su tijekom 2000. godine (Bašić i dr. 2001a, 2001b) pronađene točke 13 Matulji i 76 Karlobag u međuvremenu na žalost uništene (građevinski radovi), a da su neke točke djelomice (odlomljeni rubovi), a neke i znatno (nedostaje cijela gornja ploha) oštećene. To se posebno odnosi na gravimetrijske točke 52 Pčelić i 77 Vlaka, koje je potrebno što prije sanirati. Sve su točke fotografirane, evidentirane su eventualne u međuvremenu nastale promjene, te je sve uneseno u nove položajne opise tih točaka (Bašić i dr. 2004a, 2004b).

Pri numeraciji točaka Gravimetrijske mreže I. reda primijenjen je sličan princip kao i kod apsolutnih gravimetrijskih točaka. Najprije dolazi oznaka za gravimetrijsku točku (GT), zatim oznaka reda (1) te broj točke (za sada od 01 do 36); vidi sliku 3 s pripadnim tabličnim prikazom nove numeracije i naziva točaka.

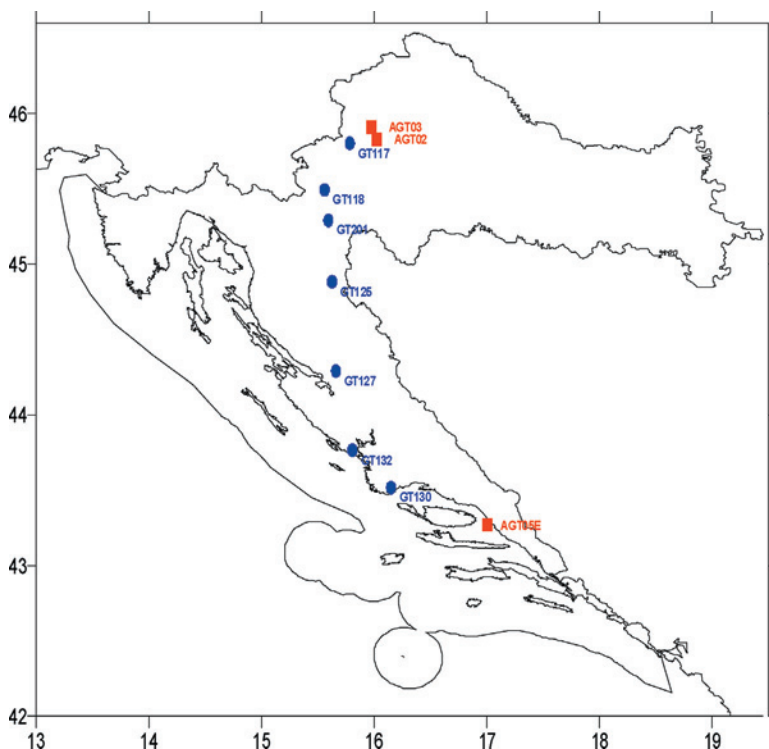


Slika 3. Gravimetrijska mreža I. reda s novom numeracijom.

### 3.3 Horizontalna gravimetrijska kalibracijska baza

Preduvjet za sve ozbiljnije i sustavne gravimetrijske radove uspostava je i definiranje gravimetrijske kalibracijske baze. Metoda kalibracije, koja je najvažnija za korisnika, mjerenje je na točkama s poznatim vrijednostima ili poznatim razlikama ubrzanja sile teže. Na točkama kalibracijske baze potrebno je odrediti vrijednosti ubrzanja sile teže različitim tipovima relativnih gravimetara. Nakon toga se, mjerenjem na kalibracijskoj bazi ili dijelu kalibracijske baze, instrumenti kalibriraju odnosno oslobađaju od sustavnih pogrešaka i svode na jedinstvenu skalu za ubrzanje sile teže ("jedinstveni miligal", Bašić 2005, Torge 1989). Potrebno je napomenuti da se pri kalibraciji instrumenata modelira kalibracijska funkcija koja služi za pretvaranje brojčanih jedinica u jedinicu ubrzanja sile teže. Parametri modela kalibracijske funkcije izvode se usporedbom s poznatim razlikama ubrzanja sile teže (Markovinović 2001). U tu je svrhu definirana i uspostavljena horizontalna gravimetrijska kalibracijska baza Republike Hrvatske. Njezin je izgled takav da

uključuje promjenu ubrzanja sile teže s geodetskom širinom (protezanje u smjeru sjever–jug), dijelom i s visinom (Mali Alan), ali i apsolutne gravimetrijske točke na njezinim krajevima (slika 4).



Slika 4. Horizontalna gravimetrijska kalibracijska baza.

Točka označena privremeno kao GT 201 bivša je gravimetrijska glavna točka 66, koja se nalazi u mjestu Zagorju na cesti Karlovac–Plitvička Jezera, i kao takva nije uvrštena u Gravimetrijsku mrežu I. reda (stoga ju je potrebno nanovo izmjeriti). Kako je apsolutna gravimetrijska točka u Makarskoj uništena, za kraj baze uzima se ekscentrična gravimetrijska točka u Malakološkom muzeju (AGT05E), a po potrebi se može predvidjeti ponovna uspostava apsolutne točke na tom području i/ili produljenje kalibracijske linije do Dubrovnika (AGT06).

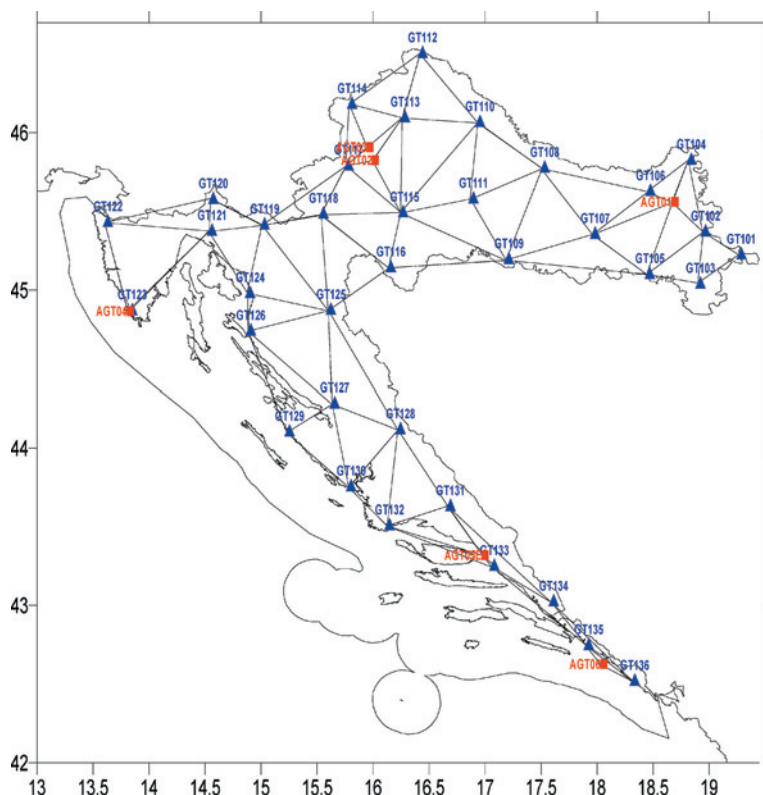
#### 4. Izmjera, obradba i izjednačenje nulte serije mjerenje u OGM

Relativnim se gravimetrima određuje razlika ubrzanja sile teže između točaka. Mjerenja su obavljena dvama relativnim gravimetrima Scintrex CG-3M: HGI1 i HGI2 (Hećimović i Markovinović 2002, Hećimović i Markovinović 2003), koji su u posjedu Hrvatskoga geodetskog instituta, te relativnim gravimetrom Scintrex CG-5 kojim raspolaže Zavod za geomatiku Geodetskog fakulteta. To su automatizirani

rani gravimetri radnog dometa  $8000 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$ , što je dovoljno za obuhvaćanje ubrzanja sile teže cijele Zemlje, bez potrebe za resetiranjem. Mjerenje gravimetrima Scintrex CG-3M i CG-5 obavlja se automatski, te se na taj način eliminira pogreška procjene operatora, a sama se mjerenja pohranjuju u memoriju gravimetra. Gravimetri imaju rezoluciju od  $1 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$  ( $1 \mu\text{Gal}$ ), sa standardnom devijacijom manjom od  $5 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$  (Scintrex Limited 1995).

#### 4.1 Gravimetrijska izmjera

Metode gravimetrijske izmjere koje su korištene su bile: metoda zvijezde, step-metoda i metoda profila. Nulta serija mjerenja na Osnovnoj gravimetrijskoj mreži (OGM) Republike Hrvatske počela je 12. lipnja, a završila 13. kolovoza 2003. godine. Mjerenja su bila podijeljena na pet dijelova: I. dio: od 12. do 18. lipnja; II. dio: od 23. do 30. lipnja; III. dio: od 2. do 6. srpnja; IV. dio: od 14. do 26. srpnja i V. dio: od 30. srpnja do 13. kolovoza 2003. godine. Tim je mjerenjima zatvoreno ukupno 50 gravimetrijskih figura, a sve su strane u njima izmjerene po dva puta (slika 5). Gdje god je to bilo moguće postavljala su se dva instrumenta istodobno na gravimetrijsku točku (neovisno određivanje ubrzanja sile teže s pomoću dva gravimetra uz iste mjerne uvjete). To je bilo izvedivo na ukupno 20 gravimetrijskih točaka.



Slika 5. OGM s prikazom izmjerenih razlika ubrzanja sile teže.



Sam mjerni proces sastojao se od pet epoha sa 60-sekundnim mjerenjima. U našem slučaju, duljina epohe bila je 77 sekundi jer osim vremena za opažanje instrument treba i dodatno vrijeme za računanje definitivnoga gravimetrijskog očitavanja kao i pripadne standardne devijacije. Na terenu se osim visine instrumenta mjerio tlak zraka u hPa i temperatura zraka u °C uz pomoć ručnog instrumenta Field Syscom, tvrtke Empex. Tijekom mjerenja, kada su to zahtijevale vremenske prilike, instrumenti su se obvezatno štitili suncobranom od izravnog zagrijavanja suncem.

Prije izvedbe mjerenja obvezatno su se ucrtale gravimetrijske točke na preglednu auto-kartu M 1:500 000, što je omogućavalo lakšu organizaciju i plan mjerenja. Za putovanje su se koristile autoceste i poluautoceste, županijske ceste, a ponekad i lokalne ceste. Gdje god je to bilo moguće nastojalo se vremenski što ujednačenije prijeći put od točke do točke. Za transport instrumentarija i dodatne opreme korišten je u pravilu osobni automobil. Jedino se za odlazak na točku Mali Alan na Velebitu koristio terenski automobil Lada Niva jer cesta koja vodi od tunela Sveti Rok do prijevaja Mali Alan nije bila asfaltirana i gotovo je bilo nemoguće do te točke doći drugačije. Za vrijeme cijele mjerne kampanje prijeđen je put od gotovo 30 000 km.

## 4.2 Obradba mjerenja

Relativni gravimetri Scintrex CG-3M i CG-5 imaju mogućnost dobivanja nekih redukcija u realnom vremenu, i to: redukcije za promjenu mjerila očitavanja gravimetra s obzirom na kalibracijsku konstantu, redukcije za nagib gravimetra, redukcije za temperaturu mjernog senzora te redukcije za Zemljine plimne valove (vidi Scintrex Limited 1995, Torge 1989). Osim njih, potrebno je gravimetrijska očitavanja popraviti za utjecaj visine instrumenta (senzora), promjene tlaka zraka, promjene položaja Zemljina pola, te za hod gravimetra.

*Redukcija zbog visine instrumenta* izvodi se radi reduciranja mjerenja s visine instrumenta (senzora) na visinu točke na terenu, i to uz pomoć (Torge 1989):

$$r_i^c(t) = r_i(t) + \partial g_p h_i, \quad (1)$$

gdje je  $r_i(t)$  očitavanje gravimetra u trenutku  $t$ ,  $\partial g_p$  vertikalni gradijent ubrzanja sile teže za točku na kojoj se mjeri,  $h_i$  visina instrumenta.

*Redukcija zbog utjecaja promjene tlaka zraka* obavlja se s pomoću izraza (Schüler 2000):

$$dg_p = 0,30(P_i - P_{in})(10^{-8} \text{ ms}^{-2}); \quad P_{in} = 1013,25 \left(1 - \frac{0,0065H}{288,15}\right)^{5,2559}, \quad (2)$$

gdje je  $P_i$  mjerena vrijednost tlaka zraka na stajalištu, a  $P_{in}$  (desna formula) tlak zraka normalne atmosfere (obadva tlaka u hPa, visina stajališta u metrima).

*Redukcija ubrzanja sile teže zbog promjene položaja Zemljina pola* određuje se s pomoću izraza (Torge 2001):

$$dg_{pol}(t) = -1,16\omega^2 R \sin 2\varphi(x(t) \cos \lambda - y(t) \sin \lambda) \text{ (ms}^{-2}\text{)}, \quad (3)$$

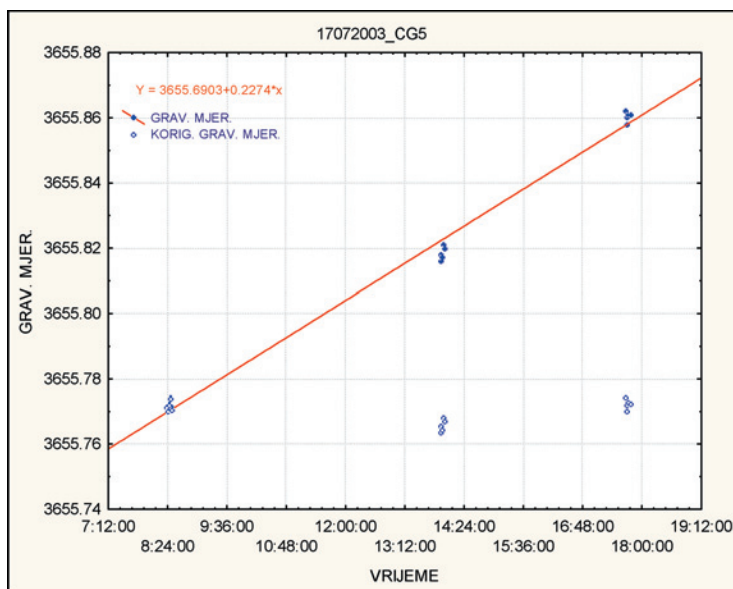
gdje je  $\omega$  kutna brzina rotacije Zemlje,  $R$  polumjer Zemlje,  $(\varphi, \lambda)$  geodetske elipsoidne koordinate stajališta, te  $(x(t), y(t))$  položaj pola u trenutku  $t$ . Ti su posljednji podaci preuzeti su uz pomoć elektronskog biltena International Earth Rotation Service – IERS (URL1).

*Hod gravimetra* vremensko je variranje gravimetrijskog očitavanja u nultom položaju instrumenta. Modeliranje hoda gravimetra obavlja se izrazom (Torge 2001):

$$D(t) = d_1(t - t_0) + d_2(t - t_0)^2 + \dots, \quad (4)$$

gdje su  $d_1$  i  $d_2$  parametri hoda,  $t_0$  početak mjerenja i  $t$  trenutak mjerenja.

U svrhu eliminiranja hoda gravimetra i pripreme mjerenja za izjednačenje za svaki je instrument (HGI1, HGI2 i CG-5) određen dnevni linearni hod na osnovi metode mjerenja, odnosno ponovljenih mjerenja na početnoj točki. Primjer određivanja linearnog hoda gravimetra CG-5 za datum 17. srpnja 2003. godine dan je na slici 6.



Slika 6. Grafički prikaz linearnog hoda gravimetra CG-5 za dan 17. srpnja 2003.

### 4.3 Izjednačenje gravimetrijske mreže

Testnim mjerenjima u Osnovnoj gravimetrijskoj mreži obuhvaćene su 42 gravimetrijske točke. Najvjerojatnije vrijednosti ubrzanja sile teže na gravimetrijskim točkama u mreži I. reda dobivene su izjednačenjem po metodi najmanjih kvadrata. Veza između mjerenih i traženih veličina može se izraziti jednadžbom popravaka (Torge 1989):

$$z(t) + v = g + N_0 + D(t), \quad (5)$$

gdje je  $z(t)$  gravimetrijsko očitavanje,  $t$  vrijeme mjerenja,  $v$  popravka gravimetrijskog mjerenja,  $g$  vrijednost ubrzanja sile teže,  $N_0$  nivo instrumenta i  $D(t)$  hod gravimetra u trenutku  $t$ . U slučaju relativnih gravimetrijskih mjerenja, odnosno razlike očitavanja ubrzanja sile teže između dviju točaka, koristimo se izrazom (ibid.):

$$\Delta z_{i,j} + v_{i,j} = g_i - g_j. \quad (6)$$

Ovdje je  $t_{i,j}$  trenutak mjerenja na točki  $i$  odnosno  $j$ ,  $g_{i,j}$  ubrzanje sile teže na točki  $i$  odnosno  $j$ ,  $\Delta z_{i,j} = (z_j - z_i)$  razlika očitavanja između točaka  $j$  i  $i$  s pripadajućom popravkom  $v_{i,j}$ .

Kako se pri relativnim gravimetrijskim mjerenjima koriste razlike ubrzanja sile teže između dviju točaka, iznos za  $N_0$  poništava se. Izjednačenje gravimetrijske mreže provedeno je s pomoću izraza za posredna mjerenja:

$$\mathbf{l} + \mathbf{v} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}, \quad (7)$$

gdje je  $\mathbf{l}$  vektor prikraćenih mjerenja i  $\mathbf{A}$  konfiguracijska matrica. Referentna pogreška (srednja pogreška jedinične težine) dana je izrazom:

$$s_0 = \sqrt{\frac{v^t P v}{m - n - d}}, \quad (8)$$

pri čemu je  $\mathbf{P}$  matrica težina,  $m$  broj mjerenja,  $n$  broj nepoznanica i  $d$  defekt mreže.

Podaci o apsolutnim vrijednostima ubrzanja sile teže preuzeti su iz elaborata (HGI 2002). U tablici 2. nalaze se konačne apsolutne vrijednosti ubrzanja sile teže koje su korištene u izjednačenju Osnovne gravimetrijske mreže Republike Hrvatske.

Tablica 2. Vrijednosti ubrzanja sile teže u korištenim apsolutnim gravimetrijskim točkama s pripadnim standardnim devijacijama (u  $10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ ).

	$g$	$\sigma_g$
AGT01 Osijek	980658653,8	2,8; 1,3*
AGT03 ZG Puntijarka	980510439,7	1,002
AGT04 Pula	980607390,0	1,954
AGT06 Dubrovnik	980369643,9	2,4; 7,5**

\* standardne devijacije na osnovi mjerenja u kolovozu i studenome 2000. godine

\*\* standardne devijacije na osnovi mjerenja u 1999. i 2000. godini

Osim apsolutnih vrijednosti ubrzanja sile teže, ulazne vrijednosti bile su razlike ubrzanja sile teže određene između dviju točaka i to u dva smjera: naprijed i nazad. Razlike ubrzanja dobivene su iz aritmetičkih sredina 60-sekundnih očitavanja u pet epoha na jednoj točki. Na osnovi očitavanja određene su i njihove pripadajuće standardne devijacije, dok su standardne devijacije razlika ubrzanja sile teže određene primjenom zakona o prirastu pogrešaka. U ulaznoj se datoteci nalaze i približne vrijednosti ubrzanja sile teže potrebne za izjednačenje.

Najprije je na početku urađeno izjednačenje gravimetrijske mreže kao slobodne, i to na temelju mjerenja razlika ubrzanja sile teže za svaki instrument zasebno kao i zajednička izjednačenja. Za težine su korištene standardne devijacije izračunanih razlika ubrzanja sile teže. Kako bi se dobile korektno apsolutne vrijednosti ubrzanja sile teže i eliminirao defekt mreže, koristili smo samo apsolutnu vrijednost u točki AGT03. Statistika dobivenih standardnih devijacija nalazi se u tablici 3. Kao što se vidi, znatno bolja rješenja u smislu ocjene točnosti pri izjednačenju svakog instrumenta zasebno daje gravimetar CG-5, dok je najlošiji uređaj HGI1 CG-3M, koji je bio na reparaciji u Kanadi. Kod tog je gravimetra bilo najviše izbačenih mjerenja. Zajedničko izjednačenje mjerenja svih triju gravimetara rezultiralo je najpouzdanijim rezultatima i bolje je, zahvaljujući mjerenjima gravimetrom CG-5, od zajedničkog izjednačenja obadva uređaja Scintrex CG-3M uređaja (opet je gravimetar HGI1 imao najveći broj izbačenih mjerenja).

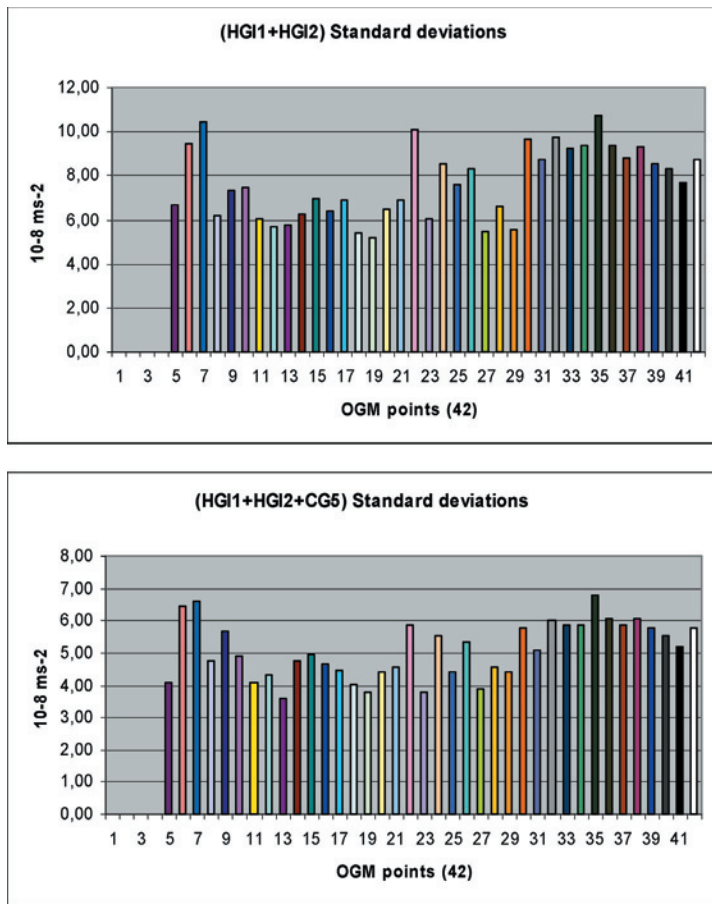
Tablica 3. Statistika ostvarenih standardnih devijacija različitih izjednačenja za slobodnu mrežu (samo AGT03 definira datum); u ( $10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ ).

St. dev.	HGI1	HGI2	CG5	(HGI1+HGI2)	(HGI1+HGI2+CG5)
Broj mjerenja	169	178	179	336	501
Ref. St.dev.	5,20	5,64	4,28	6,35	6,56
Sredina	19,40	13,27	6,86	12,10	7,71
St.dev.	5,32	3,85	1,85	3,34	1,98
Minimum	9,08	6,13	3,31	5,76	4,11
Maksimum	29,05	20,69	10,29	18,31	11,79

Nakon toga napravljena su definitivna izjednačenja s pomoću četiriju apsolutnih vrijednosti ubrzanja sile teže (točke AGT01, AGT03, AGT04 i AGT06). U tablici 4 dani su statistički pokazatelji dobivenih standardnih devijacija, kako pojedinih tako i zajedničkih izjednačenja. Na slici 7 prikazane su dobivene standardne devijacije zajedničkih izjednačenja u sve 42 točke Osnovne gravimetrijske mreže.

Tablica 4. Statistika ostvarenih standardnih devijacija različitih izjednačenja za fiksiranu mrežu (četiri točke AG definiraju datum); u ( $10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ ).

St.dev.	HGI1	HGI2	CG5	(HGI1+HGI2)	(HGI1+HGI2+CG5)
Broj mjerenja	167	176	178	329	495
Ref. St.dev.	5,58	5,68	5,72	6,64	6,90
Sredina	13,04	8,13	5,93	5,68	5,09
St.dev.	3,94	1,93	1,15	1,61	0,87
Minimum	7,80	4,99	3,78	5,21	3,60
Maksimum	25,33	11,60	8,45	10,70	6,78



Slika 7. Ocjena točnosti izjednačenja  
(HGI1+HGI2) i (HGI1+HGI2+CG5) ( $10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ ).

Kao što se vidi, opet kod pojedinačnih izjednačenja najbolje rezultate daje gravimetar CG-5, a kao najbolje rješenje u ovom času može se smatrati ono koje sadrži mjerenja razlika ubrzanja sile teže svim trima instrumentima (HGI1+HGI2+CG5). Na temelju 495 mjerenja (od mogućih 540 najviše je izbačenih mjerenja instrumentom HGI1) dobivena je referentna pogreška od  $6,90 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ , srednja vrijednost standardnih devijacija iznosi  $5,09 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ , minimalna je standardna devijacija  $3,60 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$  i maksimalna  $6,78 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ . U tablici 5 dane su definitivne vrijednosti ubrzanja sile teže u datumu IGSN71 za sve točke Osnovne gravimetrijske mreže Republike Hrvatske kao i pripadne standardne devijacije. Dobivena ocjena točnosti jasno pokazuje da su se tijekom nulte serije mjerenja relativni gravimetri ponašali stabilno, bez naglih skokova, a da su mjerenja provedena sustavno i pomnjivo, što je rezultiralo iznimno dobrim rezultatima, pogotovo ako se uzme u obzir da su to prva takva mjerenja u samostalnoj Hrvatskoj.

Tablica 5. Definitivne vrijednosti ubrzanja sile teže u točkama Osnovne gravimetrijske mreže Republike Hrvatske i njihove standardne devijacije (datum: IGSN71).

Redni broj	Broj točke	$g$ ( $10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ )	$\sigma_g$ ( $10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ )	Redni broj	Broj točke	$g$ ( $10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ )	$\sigma_g$ ( $10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ )
1	AGT02	980662197,68	4,05	20	GT118	980638658,49	5,53
2	AGT05E	980405858,65	6,43	21	GT119	980515770,73	4,41
3	GT101	980642697,60	6,58	22	GT120	980487479,20	5,34
4	GT102	980643337,19	4,75	23	GT121	980493324,29	3,87
5	GT103	980614513,86	5,67	24	GT122	980641504,35	4,56
6	GT104	980680880,78	4,91	25	GT123	980608514,34	4,40
7	GT105	980607271,83	4,07	26	GT124	980563258,60	5,77
8	GT106	980651267,41	4,30	27	GT125	980463871,01	5,07
9	GT107	980626161,68	3,60	28	GT126	980507857,07	6,01
10	GT108	980657764,61	4,77	29	GT127	980284232,84	5,86
11	GT109	980592754,73	4,95	30	GT128	980382303,02	5,85
12	GT110	980681950,73	4,64	31	GT129	980536643,25	6,78
13	GT111	980657206,31	4,47	32	GT130	980495214,93	6,07
14	GT112	980717625,49	4,03	33	GT131	980293476,44	5,87
15	GT113	980689236,41	3,77	34	GT132	980464919,38	6,08
16	GT114	980682624,60	4,42	35	GT133	980343083,63	5,78
17	GT115	980642143,26	4,57	36	GT134	980397883,85	5,53
18	GT116	980562128,52	5,85	37	GT135	980320171,80	5,18
19	GT117	980658383,31	3,80	38	GT136	980355811,00	5,79

## 5. Transformacija između Potsdamskog i referentnog sustava IGSN71

Kako u starim položajnim opisima osim podataka o položaju točke postoje i podatci o ubrzanju sile teže, dodatno je obavljena usporedba starih i novih vrijednosti u 25 točaka OGM-a, koja jasno pokazuje da su “stare” vrijednosti ubrzanja sile teže za 15-ak mGala veće od “novih” vrijednosti (vidi tablicu 6). To zapravo znači da su vrijednosti ubrzanja sile teže koje se nalaze u starim položajnim opisima dane u Potsdamskom datumu.

Transformacija između dvaju gravimetrijskih datuma može se jednostavno modelirati kao linearna relacija:  $g_{IGSN71} = g_{Potsdam} + a + b(g_{Potsdam} - g_0)$ . Pritom je  $g_0$  proizvoljna konstantna vrijednost ubrzanja sile teže (obično najniža ili srednja vrijednost u području transformacije), dok su  $a$  (pomak sustava) i  $b$  (promjena mjerila) nepoznati parametri koje treba odrediti izjednačenjem prekobrojnih mjerenja u identičnim točkama obadva sustava (Torge 1989).

Tablica 6. *Usporedba "starih" i "novih" vrijednosti ubrzanja sile teže u 25 raspoloživih identičnih točaka ( $10^{-5} \text{ ms}^{-2}$ ).*

Točka	$g_{\text{IGSN71}}$	$g_{\text{Potsdam}}$	$\Delta g$	Točka	$g_{\text{IGSN71}}$	$g_{\text{Potsdam}}$	$\Delta g$
GT101	980642,69760	980657,79	-15,09240	GT119	980515,77073	980531,08	-15,30927
GT102	980643,33719	980658,46	-15,12281	GT121	980493,32429	980508,58	-15,25571
GT103	980614,51386	980629,54	-15,02614	GT124	980563,25860	980578,44	-15,18140
GT106	980651,26741	980666,25	-14,98259	GT125	980463,87101	980479,25	-15,37899
GT107	980626,16168	980641,27	-15,10832	GT126	980507,85707	980523,18	-15,32293
GT108	980657,76461	980672,69	-14,92539	GT127	980284,23284	980299,80	-15,56716
GT109	980592,75473	980607,68	-14,92527	GT130	980495,21493	980510,42	-15,20507
GT110	980681,95073	980696,87	-14,91927	GT132	980464,91938	980480,17	-15,25062
GT112	980717,62549	980732,41	-14,78451	GT133	980343,08363	980358,26	-15,17637
GT113	980689,23641	980704,27	-15,03359	GT134	980397,88385	980413,09	-15,20615
GT116	980562,12852	980577,24	-15,11148	GT135	980320,17180	980335,33	-15,15820
GT117	980658,38331	980673,27	-14,88669	GT136	980355,81100	980370,96	-15,14900
GT118	980638,65849	980653,72	-15,06151				

S pomoću vrijednosti razlika iz tablice 6 dobivena je sljedeća empirijska transformacijska relacija za područje Republike Hrvatske (u  $10^{-5} \text{ ms}^{-2}$ ):

$$g_{\text{IGSN71}} = g_{\text{Potsdam}} - 14,9548 - 0,0133(g_{\text{Potsdam}} - 980558,401), \quad (9)$$

pri čem je  $g_0 = 980558,401 \text{ } 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$  srednja vrijednost ubrzanja sile teže u Potsdamskom sustavu,  $a = -14,9548 \pm 0,06084$  i  $b = -0,0133 \pm 0,00409$  dobiveni parametri transformacije s pripadnom ocjenom točnosti.

Na temelju nesuglasica dobivenih u svih 25 korištenih točaka između definitivnih izjednačenih i s pomoću izraza (9) izračunanih vrijednosti ubrzanja sile teže u sustavu IGSN71 može se dati ocjena točnosti transformacije (tablica 7).

Tablica 7. *Ocjena točnosti transformacije na temelju nesuglasica u 25 točaka korištenih za računanje parametara transformacije ( $10^{-5} \text{ ms}^{-2}$ ).*

$N = 25$	$g_{\text{izjednačeno}}$	$g_{\text{formula 9}}$	$g_{\text{izjednačeno}} - g_{\text{formula 9}}$
Sredina	980543,275	980543,446	-0,171
St.dev.	126,753	124,939	1,817
Minimum	980284,233	980288,285	-4,052
Maksimum	980717,626	980715,141	2,485

Kao što se vidi, upotrebom formule (9) može se očekivati nesigurnost transformacije gravimetrijskih podataka iz Potsdamskog sustava u IGSN71 sa standardnom devijacijom od 1,82 mGala. Javlja se srednja razlika od  $-0,17$  mGala, kao i minimalna odnosno maksimalna razlika od  $-4,05$  mGala odnosno  $2,48$  mGala. Najveća se neslaganja javljaju u točkama koje su na većoj nadmorskoj visini (npr. GT127 Mali Alan, gdje je ona upravo  $-4,05$  mGala).

## 6. Zaključak

Revizijom Osnovne gravimetrijske mreže Republike Hrvatske ustanovljeno je da je apsolutna gravimetrijska točka u Makarskoj na žalost uništena, pa je svakako potrebno povesti računa o njezinoj ponovnoj uspostavi, tim više što je ona predviđena i kao kraj horizontalne gravimetrijske kalibracijske baze. Ako se apsolutna točka u Makarskoj ne uspostavi, potrebno je predvidjeti produženje kalibracijske baze do Dubrovnika. Točke gravimetrijske mreže I. reda koje su oštećene nužno je sanirati. Kako ne postoje pouzdane visine točaka Osnovne gravimetrijske mreže, potrebno je provesti njihovo precizno određivanje niveliranjem s najbližih repera nivelmana visoke točnosti (eventualno i nižih redova). S obzirom na to da za većinu točaka te mreže ne postoje pouzdani i precizni podatci o položaju, važno je predvidjeti njihovo definiranje uporabom tehnologije GPS-a u skorij budućnosti. Za sve točke izrađeni su novi položajni opisi sa svim bitnim grafičkim i opisnim podacima, koji čine temelj posebno definirane baze podataka točaka Osnovne gravimetrijske mreže Republike Hrvatske.

Terenska izmjera, obradba i izjednačenje podataka Osnovne gravimetrijske mreže jasno pokazuju da je nulta serija opažanja provedena na način da su zadovoljeni strogi kriteriji izvedbe mjerenja, obradbe i izjednačenja takvih geodetskih mreža. Ostvarena točnost vrlo je visoka i više je nego zadovoljavajuća (srednja referentna standardna devijacija iznosi  $6,9 \times 10^{-8}$  ms<sup>-2</sup>), pogotovo ako se zna da su to prva ozbiljnija gravimetrijska mjerenja u slobodnoj Hrvatskoj. Stoga je važno predvidjeti ponovnu izmjera te mreže, po mogućnosti svake 4 godine, jer bi tada osigurali pouzdanije podatke, te bismo mogli više reći o vremenskim promjenama ubrzanja sile teže kod nas. Treba svakako predvidjeti i proširenje te mreže na otoke (barem najveće).

Potrebno je na kraju istaknuti da je u međuvremenu realiziran znanstveno-stručni projekt za Državnu geodetsku upravu Republike Hrvatske i Grad Zagreb pod nazivom "Projektiranje i uspostava gravimetrijske mreže II. reda na području Grada Zagreba i izmjera mikrogravimetrijskih mreža za apsolutne gravimetrijske točke", završetkom kojega je napravljen idejni projekt gravimetrijske mreže II. reda za cijelu državu, realiziran dio te mreže na području Zagreba, ali i trajno osigurane apsolutne gravimetrijske točke.

*Zahvala. Autori se najtoplije zahvaljuju Državnoj geodetskoj upravi Republike Hrvatske, posebno Sektoru za državnu izmjeru, na financiranju znanstveno-stručnog projekta u okviru kojega je nastao i ovaj rad.*



## Literatura

- Bašić, T. (2001): Detaljni model geoida Republike Hrvatske HRG2000. Izvješća Državne geodetske uprave o znanstveno-stručnim projektima iz 2000. godine, urednik I. Landek, 11–22, Zagreb.
- Bašić, T. (2004): Izrada dokumentacije neophodne za usvajanje službenog položajnog i gravimetrijskog datuma Republike Hrvatske. Izvješća Državne geodetske uprave o znanstveno-stručnim projektima iz 2003. godine, urednik I. Landek, 1–13, Zagreb.
- Bašić, T. (2005): Fizikalna geodezija. Skripta, 1–139, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
- Bašić, T., Brkić, M., Sünkel, H. (1999): A New, More Accurate Geoid for Croatia. EGS XXIII General Assembly, Nice, 20–24 April 1998, In: Physics and Chemistry of the Earth (A), Vol. 24, No. 1, Solid Earth and Geodesy, Special Issue: Recent Advances in Precise Geoid Determination Methodology, I. N. Tziavos and M. Vermeer (Eds.), 67–72, Elsevier Science Ltd.
- Bašić, T., Markovinović, D., Rezo, M., Hećimović, Ž. (2001a): Studija stanja i prijedlog nove Osnovne gravimetrijske mreže Republike Hrvatske, Projekt za Državnu geodetsku upravu (DGU), 1–121, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
- Bašić, T., Rezo, M., Markovinović, D. (2001b): Studija stanja i prijedlog nove Osnovne gravimetrijske mreže Republike Hrvatske. Izvješća Državne geodetske uprave o znanstveno-stručnim projektima iz 2000. godine, urednik I. Landek, 33–42, Zagreb.
- Bašić, T., Markovinović, D. (2002): Gravimetrijska mreža i kalibracijska baza Republike Hrvatske. Zbornik Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu povodom 40. obljetnice samostalnog djelovanja (1962. –2002.), urednik T. Bašić, 81–93, Zagreb.
- Bašić, T., Markovinović, D., Rezo, M. (2004a): Tehničko izvješće o obavljenim radovima na projektu “Osnovna gravimetrijska mreža Republike Hrvatske”. Projekt za DGU, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
- Bašić, T., Markovinović, D., Rezo, M. (2004b): Osnovna gravimetrijska mreža Republike Hrvatske. Izvješća Državne geodetske uprave o znanstveno-stručnim projektima iz 2002. godine, urednik I. Landek, 51–65, Zagreb.
- Bašić, T., Markovinović, D., Rezo, M. (2004c): Basic Gravimetric Network of the Republic of Croatia. IAG International Symposium Gravity, Geoid and Space Missions GGSM2004, Session 7: Terrestrial gravity instrumentation, networks and geodynamics, Porto, Portugal, 30. 8.–3. 9. 2004., poster presentation, Faculty of Science, University of Porto, CD-Proceedings, paper 1–6, Porto.
- Bašić, T., Markovinović, D., Rezo, M. (2004d): Stabilizacija točaka mikrogravimetrijskih mreža na pet apsolutnih gravimetrijskih točaka – I. faza. Projekt za DGU, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
- Bilibajkić, P., Mladenović, M., Mujagić, S., Rimac, I. (1979): Tumač za gravimetrijsku kartu SFR Jugoslavije – Bouguerove anomalije 1:500 000. Geofizika, Zavod za geološka i geofizička istraživanja, Beograd.
- Čolić, K., Pribičević, B., Švehla, D. (1999): Apsolutna gravimetrijska mreža u Republici Hrvatskoj. Simpozij državne geodetske osnove i zemljišni informacijski sustavi, Zbornik radova, urednici Z. Kapović i M. Roić, 109–116, Zagreb.
- Grašić, M. (1968): Gravimetrijski radovi VGI. Radovi u vojnogeografskom institutu. IV kongres geodetskih inženjera i geometara Jugoslavije. Savezna geodetska uprava, Sarajevo.

- Grašić, M. (1970): Osnovni gravimetrijski radovi u 1969. godini. Geodetski list, 7–9, Zagreb.
- Grašić, M. (1974): Stanje i program daljih gravimetrijskih radova. Zbornik radova. Vojnogeoografski institut, Beograd.
- Grašić, M. (1976): Međunarodna standardna gravimetrijska mreža 1971 i naša osnovna gravimetrijska merenja. Zbornik radova. Simpozijum o osnovnim geodetskim radovima u Jugoslaviji. Savez geodetskih inženjera i geometara Jugoslavije, Herceg-Novi.
- HGI (2002): Izvešće o podacima apsolutne gravimetrijske mreže Republike Hrvatske (drugo izdanje). Hrvatski geodetski institut, Zagreb.
- Hećimović, Ž., Markovinović, D. (2002): Stabilnost mjernog sustava Scintrex HGI-2 gravimetra. Zbornik Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu povodom 40. obljetnice samostalnog djelovanja (1962. –2002.), urednik T. Bašić, 95–104, Zagreb.
- Hećimović, Ž., Markovinović, D. (2003): Kalibracija relativnih Scintrex CG-3M gravimetara HGI-1 i HGI-2. Geodetski list, 3, 161–166, Zagreb.
- Hećimović, Ž., Rožić, N., Bašić, T., Markovinović, D. (2003): Status of the Croatian First Order Gravity Network. Proceedings of the Symposium of the IAG Section I (Positioning), Commission X (Global Regional Geodetic Networks), Subcommission for Europe (EUREF), Publication No. 13, Toledo, Spain, June 4–7, 2003, Editors: J. A. Torres and H. Hornik, Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Band 33, 306–310, Frankfurt am Main.
- Markovinović, D. (2001): Gravimetrijska mreža I. reda i gravimetrijska kalibracijska baza Republike Hrvatske. Magistarski rad, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
- Markovinović, D., Rezo, M., Bašić, T. (2004): Zero series of measurements in Basic Gravimetric Network of Croatia. 1st General EUGG Assembly, poster presentation, 25–30 April, Nice, France.
- Medak, D., Pribičević, B., Đapo, A. (2001): Priklučenje Republike Hrvatske u svjetsku apsolutnu gravimetrijsku mrežu – Projekt UNIGRACE. Izvešća Državne geodetske uprave o znanstveno-stručnim projektima iz 2000. godine, urednik I. Landek, 23–32, Zagreb.
- Narodne novine (128/1999): Zakon o državnoj izmjeri i katastru nekretnina. Službeni list Republike Hrvatske, br. 128, 4441–4451, Zagreb.
- Narodne novine (110/2004): Odluka o utvrđivanju službenih geodetskih datuma i ravninskih kartografskih projekcija Republike Hrvatske. Službeni list Republike Hrvatske, br. 110, Zagreb.
- Schüler, T. (2000): Conducting and Processing Relative Gravity Surveys. Institute of Geodesy and Navigation. University FAF Munich, Germany.
- Scintrex Limited (1995): CG-3/3M Autograv Automated Gravity Meter. Operation manual, Scintrex Limited, Canada.
- Seigel, H.O. (1995): High precision gravity guide. Scintrex Limited, Canada.
- Torge, W. (1989): Gravimetry. Walter de Gruyter, Berlin–New York.
- Torge, W. (2001): Geodesy. Walter de Gruyter, Berlin–New York.
- Wilmes, H., Richter, B., Franke, A., Reinhart, E. (1995): The German Absolute Gravity Base Net.
- URL1: International Earth Rotation Service (IERS), <http://hpiers.obspm.fr/eoppc/bul/bul/>.

## Basic Gravimetric Network of the Republic of Croatia

*ABSTRACT.* In this paper a review of the past gravimetric measurements over the territory of Croatia and the description of the establishment of the Basic Gravimetric Network (BGN) of the Republic of Croatia are given. This network consists from totally 42 points; 6 absolute gravimetric points (0. Order Gravity Network) and 36 relative gravimetric points (I. Order Gravity Network). Zero series of measurements in BGN have been done using two relative gravimeters Scintrex CG-3M and one Scintrex CG-5 in the period between June and August 2003. In the continuation, the processing and the adjustment of those measurements, as well as the analysis of the results for the final gravity values are reported, based on the conducted adjustments. In order to get a reliable transformation between Potsdam and IGSN71 gravimetric datum, the transformation parameters have been calculated and their error estimates given.

*Key words:* Basic Gravimetric Network, gravimeters, absolute and relative gravity measurements, data processing, adjustment, transformation.