

Značaj određivanja apsolutne vrednosti ubrzanja sile teže u geodeziji

SOFIJA M. NAOD, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet,
Institut za geodeziju i geoinformatiku, Beograd

Pregledni rad
UDC: 528.27
DOI: 10.5937/tehnika2101017N

Ubrzanje sile Zemljine teže koristi se pri rešavanju osnovnih zadataka geodezije kao što su određivanje geoida i definisanje visinskih i gravimetrijskih referentnih mreža različitih razmera, od globalnih do nacionalnih. Poznavanje teže od velikog je interesa za mnoge grane geonauka (geodeziju, geofiziku, geologiju, geodinamiku i druge). Takođe, ubrzanje sile Zemljine teže predstavlja fizičku veličinu od značaja, kako za metrologiju, tako i za geodetsku metrologiju. Standardizacija relativnih gravimetrijskih merenja oslanja se na određivanje apsolutne vrednosti teže, dok je kalibracija relativnih gravimetara nemoguća bez apsolutnih gravimetara. Pored istorijskog razvoja apsolutnih gravimetara, u ovom radu prikazana je teorijska osnova najčešće korišćene metode za određivanje apsolutne vrednosti teže, kao i princip rada apsolutnog gravimetra FG5. Ukratko je prikazan značaj internacionalnog poređenja apsolutnih gravimetara i dat je pregled korišćenih gravimetrijskih referentnih sistema sa posebnim akcentom na uspostavljanje Međunarodnog referentnog gravimetrijskog sistema. Predstavljeni su dosadašnji radovi koji se tiču apsolutnog određivanja teže u Srbiji. Na kraju, ukazano je na značaj određivanja apsolutne vrednosti teže sa geodetskog i sa metrološkog stanovišta. Istaknut je kako nacionalni, tako i internacionalni značaj određivanja teže pri definisanju gravimetrijskih referentnih sistema, kao i značaj apsolutne teže pri praćenju globalnih fenomena.

Ključne reči: Ubrzanje sile teže, apsolutni gravimetri, gravimetrijske referentne mreže

1. UVOD

Ubrzanje sile Zemljine teže je fizička veličina od značaja za mnoge grane geonauka (geodeziju, geofiziku, geologiju, geodinamiku i druge). Geodezija koristi ubrzanje sile teže u cilju rešavanja osnovnih zadataka - određivanja oblika Zemlje, proučavanja njenih deformacija i definisanja referentnih mreža. Poznavanje ubrzanja sile teže od velikog je interesa, kako za metrologiju, tako i za geodetsku metrologiju, čije aktivnosti, između ostalog, uključuju kalibraciju relativnih gravimetara.

Ubrzanje sile teže je veličina koja se menja sa promenom položaja na površini Zemlje i koja se menja u toku vremena na datoj lokaciji. Vrednosti teže veće su na polovima nego na ekvatoru. S porastom visine, intenzitet teže opada, a različite vrednosti teže moguće su i na tačkama sa istim geografskim širinama i visinama. Razlozi svih tih pojava su asferični oblik Zem-

lje, njena rotacija i varijacije gustine unutar zemlje [1, 2, 3].

S obzirom da su merenja ubrzanja sile teže osetljiva na promene visine, poznavanje vrednosti teže omogućava definisanje i kontrolu vertikalnog datuma. Prilikom merenja apsolutnih vrednosti teže nisu potrebne dodatne referentne tačke na površini Zemlje, kao ni merenja ka nebeskim telima ili satelitima [4].

S druge strane, da bi se standardizovala relativna gravimetrijska merenja, ona moraju biti vezana za najmanje jedno apsolutno merenje kako bi se obezbedio datum, tj. referentna tačka u odnosu na koju se odnose pomenuta relativna gravimetrijska merenja.

Dakle, poznavanje ubrzanja sile Zemljine teže potrebno je pri određivanju geoida i definisanju visinskih i gravimetrijskih referentnih mreža različitih razmera, od globalnih do nacionalnih [3, 4].

U Međunarodnom sistemu jedinica (SI sistem), jedinica u kojoj se izražava ubrzanje sile Zemljine teže je ms^{-2} [5]. U geodeziji se, međutim, često koristi i jedinica koja ne pripada SI sistemu već zastarelom centimetar-gram-sekund sistemu (CGS sistemu). Tako se za ubrzanje sile Zemljine teže koristi i jedinica *Gal* [6], pri čemu je

Adresa autora: Sofija Naod, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Institut za geodeziju i geoinformatiku, Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73

e-mail: sofijanaod@yahoo.com

Rad primljen: 27.10.2020.

Rad prihvaćen: 19.01.2021.

$$1Gal = 10^{-2}ms^{-2}$$

Jedinice koje se uglavnom koriste prilikom izražavanja rezultata merenja ubrzanja sile Zemljine teže i merne nesigurnosti instrumenata kojima se meri su:

$$1mGal = 10^{-5}ms^{-2} \text{ u } 1\mu Gal = 10^{-8}ms^{-2}.$$

2. APSOLUTNI GRAVIMETRI

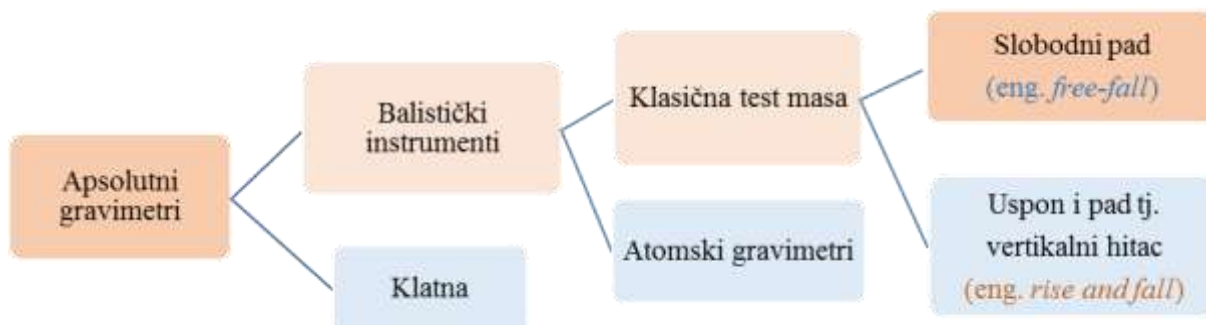
Senzori koji se koriste za merenje ubrzanja sile Zemljine teže nazivaju se gravimetri. Oni mogu biti apsolutni ili relativni.

Apsolutni gravimetri, kao što i sama reč kaže, služe za merenje apsolutne vrednosti teže na tačkama na kojima se obavlja merenje, dok se relativnim gravimetrima određuju razlike u teži između dva uzastopna merenja, tj. vrednosti ubrzanja sile Zemljine

teže u odnosu na tačke sa poznatom apsolutnom vrednošću [7]. U zavisnosti od instrumenata koji se koriste pri merenju apsolutne vrednosti teže, razlikujemo dve metode merenja, metod klatna i balistički metod.

Obe metode zasnivaju se na merenju dve osnovne fizičke veličine, dužine i vremena [6]. Na slici br. 1 prikazana je podela apsolutnih gravimetara. Prilikom merenja teže klatnom meri se period oscilovanja klatna i njegova dužina, dok balistički apsolutni gravimetri koriste princip slobodnog pada, odnosno vertikalni hitac tela [8].

Na osnovu Njutnovog zakona gravitacije, sila gravitacionog privlačenja proporcionalna je masi tela koje pada.



Slika 1 - Podela apsolutnih gravimetara

Rezultujuće ubrzanje (sila podeljena sa njegovom masom) nezavisno je od veličine i oblika mase. Masa koja se koristi u balističkim instrumentima naziva se ispitna ili test masa. Senzori apsolutne teže pri slobodnom padu mogu koristiti mase (kuglice ili kockice) od stakla ili metala. Poslednjih decenija razvijaju se i kvantni gravimetri koji koriste atome koji slobodno padaju u gravitacionom polju Zemlje. Konceptualno, balistički metod merenja apsolutne teže je vrlo jednostavan, ali tehnološki veoma zahtevan, bilo da je u pitanju klasična test masa ili atomi.

2.1. Istorijski razvoj apsolutnih gravimetara

Nakon što su krajem 18. veka Jean-Charles de Borda i Jean-Dominique Cassini izvršili merenja teže pomoću klatna, postignut je nivo tačnosti koji je počeo zadovoljavati geodetske potrebe (oko 10 mGal). Ubrzo nakon toga, Henry Kater je konstruisao reverzibilno klatno čija se merna nesigurnost vremenom povećala do 1 mGal. Do kraja 19. veka rezultati gravimetrijskih merenja korišćeni su za redukciju geodetskih i astronomskih merenja, interpolaciju vertikalnih otklona, kao i za određivanje oblika Zemlje i njenog gravitacionog polja [9].

Određivanje ubrzanja sile teže do 20. veka svodilo se na korišćenje klatna, pri čemu je meren period

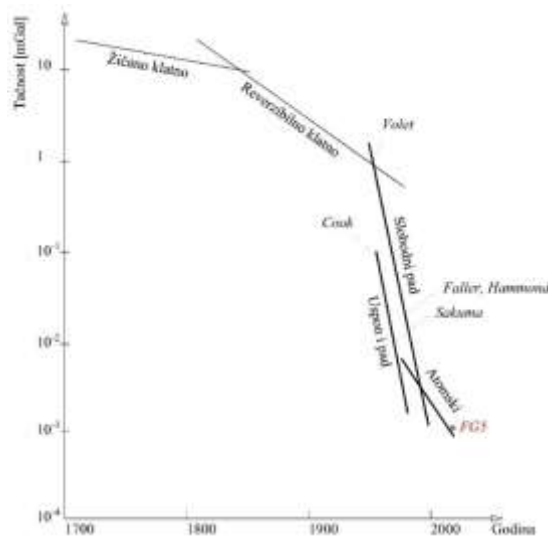
oscilovanja klatna i njegova dužina. Iako danas uglavnom imaju istorijski značaj, teorijska osnova na kojoj se zasniva princip rada klatna neizostavni je deo mnogih udžbenika i radova [10, 6, 11, 12].

Upotreba balističkih apsolutnih gravimetara počinje pedesetih godina prošlog veka kada je napredak u tehnologiji omogućio merenje kratkih vremenskih intervala i precizno merenje dužine. Charles Volet je 1946. godine istakao da je moguće izvršiti merenje padajuće građirane skale (kalibrisane šipke) fotografišući njen položaj pri slobodnom padu. Prvi balistički instrumenti bili su visoki nekoliko metara i koristili su sistem za fotografsko snimanje i kvarcni časovnik.

Njihova merna nesigurnost bila je oko 1mGal [11, 7]. James Faller je prilikom izrade doktorske disertacije u periodu od 1957. do 1963. godine razvio instrument koji pri radu koristi laserski interferometar, atomski časovnik i slobodno padajuću test masu čime je započeo razvoj instrumenata koji su i danas u upotrebi. Istovremeno merenje položaja i vremena padajuće test mase primenom Majkelsonovog interferometra donelo je povećanje tačnosti reda veličine od oko 10 μ Gal [6]. U isto vreme, Akihiko Sakuma razvijao je interferometrijski instrument kod kog se

mere parovi položaj-vreme prilikom uspona i pada test mase. Sve dok Jim Hammond i James Faller nisu patentirali prvi portabilni apsolutni gravimetar 1969. godine, gravimetri su bili stacionarni [13, 2]. Prvi komercijalni prenosni apsolutni gravimetar proizveo je Joint Institute for Laboratory Astrophysics (JILA) 1986. godine [14]. Istovremeno sa gravimetrima JILAg serije, koji su poboljšali tačnost na $3\mu\text{Gal}$ do $5\mu\text{Gal}$, zajednička saradnja državnih i akademskih institucija i privatnog sektora dovela je do razvoja instrumenta FG5. Tačnost apsolutnog gravimetra FG5 je $1-2\mu\text{Gal}$ i u potpunosti je operativan od 1993. godine [15]. Napredak na polju apsolutne gravimetrije je nastavljen i već više od dve decenije koristi se princip merenja ubrzanja teže koji umesto klasične test

mase upotrebljava atome. Poslednjih godina konstruisani su i prenosni kvantni gravimetri koji su jednostavni za korišćenje, rade u realnim uslovima (na terenu) i mogu neprekidno da mere ubrzanje sile teže sa tačnošću manjom od $1\mu\text{Gal}$ [16]. Međutim, i pored činjenice da se instrumentima koji koriste vertikalni hitac, tj. uspon i pad test mase eliminišu neke od grešaka prisutne pri merenju teže slobodopadajuće mase, kao i činjenice da je tačnost atomskih gravimetara dostigla red veličine tačnosti instrumenta FG5, u većini primena, FG5 apsolutni gravimetar je i dalje svetski standard za apsolutno određivanje ubrzanja sile Zemljine teže. Hronološki razvoj apsolutnih gravimetara i povećanje tačnosti gravimetara dato je na slici br. 2.



Slika. 2 - Hronologija razvoja i povećanje tačnosti apsolutnih gravimetara (po ugledu na [6])

2.2. Metod slobodnog pada – teorijska osnova

Rad apsolutnih gravimetara zasniva se na slobodnom padu, odnosno usponu i padu objekta u gravitacionom polju, bilo da je u pitanju makroskopski objekat ili oblak hladnih atoma.

Određivanje vrednosti teže svodi se na merenje parametara kretanja i ocene ubrzanja g iz jednačine kretanja, pri čemu dužina puta i vremenski intervali potrebni za prelazak određenog puta predstavljaju parametre koji se mere [17].

Jednačina kretanja tela mase m koje slobodno pada u gravitacionom polju glasi

$$m\ddot{z} = mg(z) \quad (1)$$

gde \ddot{z} označava drugi izvod vektora položaja po vremenu t , koji u slučaju slobodnog pada ima smer lokalne vertikale, tj.

$$\ddot{z} = \frac{d^2z}{dt^2} \quad (2)$$

Ukoliko se usvoji pretpostavka o homogenom gravitacionom polju, integraljenjem izraza (1), dobijaju se brzina i položaj tela koje pada:

$$\dot{z} = \dot{z}_0 + gt \quad (3)$$

$$z = z_0 + \dot{z}_0 t + \frac{g}{2} t^2 \quad (4)$$

Konstante integracije z_0 i \dot{z}_0 su položaj i brzina tela koje pada u trenutku $t = 0$. Za određivanje ubrzanja sile teže iz jednačine (4), tj. iz jednačine slobodnog pada, potrebno je najmanje tri merenja pozicije i vremena. Nakon eliminisanja z_0 i \dot{z}_0 , ubrzanje sile teže dobija se iz razlika položaja i razlika vremena po jednačini [6]:

$$g = \frac{(z_3 - z_1)(t_2 - t_1) - (z_2 - z_1)(t_3 - t_1)}{(t_3 - t_1)(t_2 - t_1)(t_3 - t_2)} \quad (5)$$

Moderni apsolutni gravimetri beleže mnogo više parova položaj-vreme i tako se određivanje ubrzanja

sile teže svodi na rešavanje jednačine slobodnog pada po metodi najmanjih kvadrata.

Slična formula dobija se i za instrumente koji koriste vertikalni hitac kao poseban oblik slobodnog pada, s tim što su za određivanje g potrebna dva merenja položaja i vremena.

Prikazana jednačina za određivanje g pri slobodnom padu test mase validna je za homogeno gravitaciono polje.

Međutim, kako se u realnom gravitacionom polju teža menja sa promenom visine, usvojimo li pretpostavku o linearnoj promeni teže sa visinom, jednačina (1) postaje:

$$\ddot{z} = g(z) = g_0 + g_z z = g_0 + \frac{\partial g}{\partial z} z \quad (6)$$

gde je $g_0 = g$ u položaju $z = 0$, a g_z vertikalni gradijent teže.

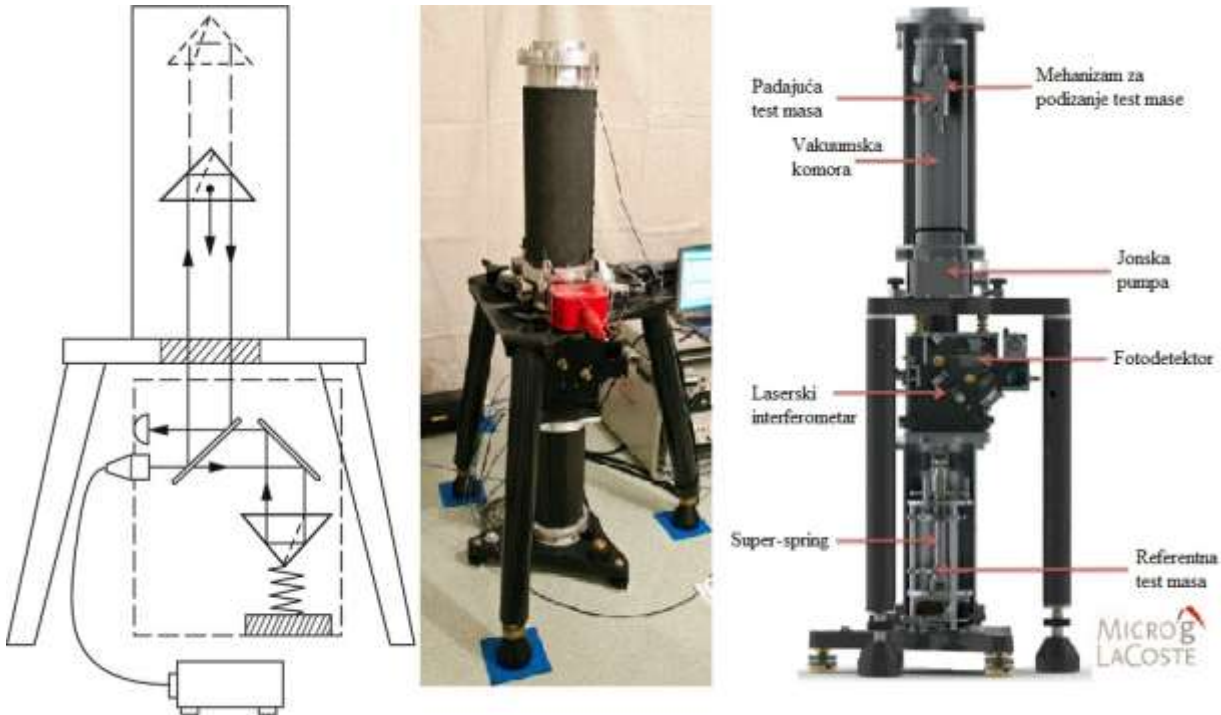
Rešavanjem jednačine (6) dobija se komplikovaniji izraz za određivanje položaja padajuće mase:

$$z = z_0 + \dot{z}_0 t + \frac{g_0}{2} t^2 + g_z \left(\frac{z_0}{2} t^2 + \frac{\dot{z}_0}{6} t^3 + \frac{g_0}{24} t^4 \right) \quad (7)$$

Vrednost ubrzanja sile teže na početku putanje (g_0) određuje se iz jednačine (7) izravanjem po metodi najmanjih kvadrata, pri čemu se vertikalni gradijent teže meri ili se usvaja normalni vertikalni gradijent [17, 18].

2.3. Princip rada apsolutnih gravimetara

Princip rada apsolutnih gravimetara u kojima je primenjen slobodan pad test mase biće objašnjen na primeru najčešće korišćenog instrumenta za određivanje apsolutne vredosti teže, apsolutnog gravimetra FG5, čiji je šematski prikaz dat na slici br. 3.



Slika 3 - Šematski prikaz i izgled apsolutnog gravimetra FG5

Glavne komponente balističkog gravimetra FG5 su:

- Vakuumska komora
- Mah-Zenderov interferometar
- Helijum-neonski laser
- Superspring sklop
- Kontroler sistema

Unutar komore nalazi se test masa i mehanizam za podizanje test mase. Komora se održava u vakuumu upotrebom jonske pumpe. Test masa se ispušta sa visine i pod dejstvom gravitacionog polja slobodno pada 20 cm u trajanju od 0.2 s, nakon čega se kolicima podiže na početnu visinu i postupak se ponavlja [12,

15]. Ispod komore nalazi se modifikovani Mah-Zenderov interferometar. Interferometrom se određuje pozicija test mase tokom slobodnog pada. Ulaskom koherentnog laserskog snopa u interferometar dolazi do podele snopa na dva optička zraka, nakon čega se vrši preklapanje (superimpozicija) zraka koji se reflektovao od test mase i zraka koji se reflektovao od referentne mase. Interferometar generiše pruge svaki put kada test masa pređe polovinu talasne dužine laserskog svetla.

Merenjem vremena pojave određenih pruga na fotodetektoru dobija se ubrzanje padajućeg objekta. Ovaj metod merenja teže je apsolutni, jer je određivanje isključivo metrološko i oslanja se na standarde

dužine i vremena. Standard za merenje dužine ostvaruje se upotrebom He-Ne lasera kao izvora svetlosti talasne dužine 633 nm (crvena svetlost), dok se standard vremena ostvaruje upotrebom atomskog (rubidijumskog) časovnika [18]. Superspring komponenta nalazi se ispod interferometra i služi za izolaciju referentne mase od okolnih vibracija. Radi izolacije ove komponente, komora je postavljena na sopstveni stativ.

Kontroler sistema (računar) kontroliše sistem, prikuplja, analizira i skladišti podatke. Softver ima leko podesiv korisnički interfejs za računanje korekcija kojima se merena teža popravljaju za plimu i oseku okeana i čvrste Zemlje, kretanje polova, kao i za uticaj atmosfere.

Tokom jednog pada test mase beleži se oko 200 merenja (parova položaj-vreme), a jednu sesiju merenja čini nekoliko hiljada padova test mase. Ukupna merna nesigurnost instrumenta FG5 je 1-2 μ Gal.

2.4. Kalibracija apsolutnih gravimetara

Svaki merni instrument potrebno je kalibrirati, tj. uporediti ga sa standardom (etalonom) za to merenje i podesiti ga prema određenoj meri. S obzirom da apsolutni gravimetri podrazumevaju određivanje teže na osnovu standarda za merenje dužine i standarda atomske frekvencije, neophodna je, ali ne i dovoljna, kalibracija lasera i atomskog časovnika. Da bi se osigurala metrološka sledivost i procenjena merna nesigurnost instrumenata, potrebno je redovno vršiti međusobno poređenje apsolutnih gravimetara.

Poređenja apsolutnih gravimetara organizuju se s ciljem da se uporedi što veći broj apsolutnih gravimetara različitih proizvođača (instituta), iz različitih država, sa različitim metodama rada. Rezultat poređenja je referentna vrednost sa svojom nesigurnošću koja je dobijena iz rezultata merenja svih instrumenata, kao i odsupanje svakog rezultata od referentne vrednosti.

Trenutno u svetu ima preko 200 prenosnih apsolutnih gravimetara, od čega je većina proizvedena u Američkoj kompaniji *Micro-g LaCoste Inc.* Brojni gravimetri su eksperimentalni modeli u fazi izrade u nacionalnim metrološkim institutima, univerzitetima i u komercijalnim kompanijama [19]. Problem zastupljenosti gravimetara jedne kompanije leži u nemogućnosti upoređivanja različitih metoda rada i raznih tehnologija proizvodnje. Apsolutne vrednosti ubrzanja sile teže dobijene različitim instrumentima i metodama daju uvid u postojanje sistematskih uticaja. Na taj način, internacionalno poređenje što većeg broja različitih apsolutnih gravimetara omogućava otkrivanje do sada nepoznatih sistematskih izvora grešaka u apsolutnoj gravimetriji, kao i neotkrivenih sistematskih uticaja pojedinačnih tipova gravimetara.

3. GRAVIMETRIJSKE REFERENTNE MREŽE

Koncept gravimetrijskih referentnih mreža isti je kao i koncept ostalih referentnih mreža, s razlikom da tako definisan referentni sistem obezbeđuje okvir za gravimetrijska merenja. Dakle, gravimetrijski referentni sistem sastoji se od skupa referentnih tačaka koje jedinstveno realizuju sistem i standardizuju gravimetrijska merenja. Ubrzanje sile Zemljine teže na referentnim tačkama određuje se apsolutnim i relativnim metodama. S obzirom na područje koje pokrivaju, gravimetrijske mreže dele se na globalne, regionalne i lokalne, pri čemu se prilikom njihovog definisanja primenjuju internacionalni ili nacionalni propisi [6, 20].

Postavlja se pitanje zašto je uopšte potreban datum, tj. referentna tačka ili skup tačaka u odnosu na koje se vrše merenja, kada je ubrzanje teže apsolutna fizička veličina. Potreba za gravimetrijskim datumom povezana je sa instrumentima koji se koriste za merenje ubrzanja teže i sa uspostavljanjem referentnih tačaka. U prošlosti su se koristili relativni gravimetri koji su imali veću preciznost u poređenju sa klatnima koja su bila prisutna do sredine 20. veka. Sva gravimetrijska merenja odnosila su se na jednu tačku koja je imala određenu apsolutnu vrednost teže, a teža na ostalim tačkama određivana je relativnim metodama. Tako je prvi gravimetrijski datum bio Bečki gravimetrijski sistem usvojen 1900. godine na osnovu apsolutnog merenja u Beču i ranijeg merenja u Minhenu. Ubrzo nakon usvajanja Bečkog sistema Friedrich Robert Helmert ukazao je na postojanje greške u određivanju vrednosti teže u Beču.

On je inicirao novo apsolutno određivanje teže u geodetskom institutu u Potsdamu što je dovelo do usvajanja Potsdamskog gravimetrijskog referentnog sistema 1909. godine [20]. Potreba za uspostavljanjem regionalnih gravimetrijskih referentnih tačaka povezanih sa apsolutnom vrednošću ubrzanja sile teže u Potsdamu pojavila se tokom tridesetih godina 20. veka. Američka vojska započela je 1948. godine program čiji je cilj bio testiranje pouzdanosti svetske mreže međunarodnih gravimetrijskih stanica prvog reda i istovremeno uspostavljanje gravimetrijske mreže drugog reda na aerodromima širom sveta [7].

Ta mreža je evoluirala u IGSN71¹ mrežu, koja je usvojena 1971. godine i koja je sadržala 10 tačaka određenih sa apsolutnim gravimetrima, 1200 tačaka određenih sa klatnima i 24.000 relativnih merenja [21]. Godinama su se sva relativna merenja teže oslanjala na IGSN71 mrežu, dok 2015. godine na generalnoj skup-

¹IGSN71 - *International Gravity Standardization Network 71* – Međunarodna gravimetrijska standardizovana mreža 1971

štini IUGG² nije usvojena Rezolucija 2 („Uspostavljanje globalnog referentnog sistema apsolutne teže“) čime je pokrenuto uspostavljanje IGRS³. Ideja ovakvog pristupa je uspostavljanje globalne mreže stanica na kojima se vrše redovna merenja apsolutnih vrednosti teže, njihovo povezivanje sa ITRS⁴, kao i povezanost sa stanicama za međunarodno poređenje apsolutnih gravimetara na kojima su vrednosti teže permanentno dostupne.

Na poslednjoj generalnoj skupštini IUGG, održanoj 2019. godine, usvojena je Rezolucija 4 („Uspostavljanje infrastrukture za IGRS“) u kojoj se

konstatuje da je za realizaciju IGRS potrebna podrška nacionalnih i internacionalnih institucija. Takođe se apeluje na državne institucije zadužene za geodetske poslove da uspostave apsolutne referentne gravimetrijske stanice na nacionalnom nivou, da vrše redovna osmatranja teže na tim stanicama, da učestvuju u međunarodnom poređenju apsolutnih gravimetara, kao i da rezultate učine dostupnim. S obzirom da je prelazak na IGRS još uvek u toku, većina zemalja, među kojima je i Srbija, još uvek koristi IGSN71 mrežu. Pregled gravimetrijskih referentnih sistema dat je u tabeli br. 1.

Tabela 1. Pregled gravimetrijskih referentnih sistema

Godina usvajanja	Apsolutna merenja Instrument - broj merenih tačaka koje definišu datum	Relativna merenja	Merna nesigurnost
Bečki gravimetrijski sistem (Vienna Gravity System) usvojen na 13. konferenciji IAG ⁵ u Parizu			
1900.	Klatno - jedna tačka u Beču	oko 1400	5-25 mGal
Potsdamski gravimetrijski sistem (Potsdam Gravity System) usvojen na 16. konferenciji IAG u Londonu			
1909.	Klatno - jedna tačka u Potsdamu	oko 1400	1 mGal
Međunarodna gravimetrijska standardizovana mreža (IGSN71) usvojena na 15. skupštini IUGG ⁶ u Moskvi			
1971.	Portabilni AG ⁷ – 8 tačaka Stacionarni AG – 2 tačke Klatno -1200 tačaka	oko 24000	0.1 mGal
Međunarodni gravimetrijski referentni sistem (IGRS) usvojen na 26. skupštini IUGG u Pragu			
2015.	AG - preko 1200 tačaka	-	2-3 μGal

4. ODREĐIVANJE APSOLUTNE VREDNOSTI UBRZANJA SILE ZEMLJINE TEŽE U SRBIJI

Prvo, i za sada jedino, određivanje apsolutne vrednosti ubrzanja sile Zemljine teže u Srbiji organizovano je oktobra 2007. godine. Kampanja s ciljem odre-

đivanja apsolutne vrednosti teže realizovana je od strane Švedske uprave za kartografiju, katastar i upis zemljišta (Lantmäteriet), a u okviru projekta „Izgradnja kapaciteta u Srbiji: Katastar nepokretnosti i upis prava – faza II“ koji je finansirala Švedska agencija za međunarodni razvoj i saradnju (SIDA) [22, 23].

²IUGG - International Union of Geodesy and Geophysics – Međunarodna unija za geodeziju i geofiziku

³IGRS - International Gravity Reference System – Međunarodni referentni gravimetrijski sistem

⁴ITRS - International Terrestrial Reference System – Međunarodni terestrički referentni sistem

⁵IAG – International Association of Geodesy – Međunarodna asocijacija za geodeziju

⁶IUGG - International Union of Geodesy and Geophysics – Međunarodna unija za geodeziju i geofiziku

⁷AG – apsolutni gravimetar firme koji uključuje popravke za plimu i oseku Zemlje, plimu i oseku okeana, kretanje polova i uticaj atmosfere [23]. Za potrebe računanja popravaka određene su koordinate tačaka unutar manastira. Na svakoj stanici merenje je izvođeno u dve sesije. Da bi se smanjio uticaj grešaka modeliranja plime i oseke okeana, sesije su trajale 24h.

Ubrzanje sile Zemljine teže mereno je u manastirima Grgeteg na Fruškoj gori, Gradac u Raškoj i Sićevo u blizini Niša. Manastiri su izabrani za lokacije iz razloga dobre stabilnosti i temperaturnih karakteristika objekata, kao i minimalne buke i dobre stabilnosti okoline. Vrednosti teže određene su korišćenjem apsolutnog gravimetra FG5 (#233) proizvođača Micro-g LaCoste Inc., dok je gradijent ubrzanja sile Zemljine teže opažan sa relativnim gravimetrom Scintrex CG-5. Za obradu podataka korišćen je softver iste firme koji uključuje popravke za plimu i oseku Zemlje, plimu i oseku okeana, kretanje polova i uticaj atmosfere [23]. Za potrebe računanja popravaka određene su koordinate tačaka unutar manastira. Na svakoj stanici merenje je izvođeno u dve sesije. Da bi se smanjio uticaj grešaka modeliranja plime i oseke okeana, sesije su trajale 24h.

U cilju smanjenja uticaja Koriolisove sile, instrument je postavljen prvo u pravcu severa (24 h), a onda i u pravcu juga (24 h). Tokom sesije od 24h mereno je oko 2.400 puta, tj. zabeleženo je oko 2.400 slobodnih padova merne mase.

Nakon prve sesije, instrument je rotiran za 180° i realizovano je novih 2.400 merenja. Na svaka 3-4 sata (tokom dana) proveravana je horizontalnost i vertikalnost instrumenta, rad jonske pumpe, lasera, super-spring komponente, interferometra, kao i stanje temperature [22].

Tabela 2. Određivanje apsolutne vrednosti teže u Srbiji

				Vrednost teže [μGal]		
Grgeteg				na visini instrumenta		na visini poda
Lat.	45.1380556°	h	311.77 m	S	980 595 316.69	980 595 621.4 \pm 4
Long.	19.9019444°	H	268.04 m	J	980 595 316.44	
				Sr	980595316.6 \pm 2	
Gradac						
Lat.	43.3663889°	h	628.57 m	S	980 303 847.10	980 304 155.6 \pm 4
Long.	20.5391667°	H	582.89 m	J	980 303 846.03	
				Sr	980 303 846.6 \pm 2	
Sićevo						
Lat.	43.3294444°	h	352.68 m	S	980 394 145.12	980 394 396.1 \pm 4
Long.	22.0727778°	H	307.94 m	J	980 394 146.19	
				Sr	980 394 145.7 \pm 2	
h – elipsoidna visina, H – ortometrijska visina, S – severna orijentacija instrumenta, J – južna orijentacija, Sr – srednja vrednost						

5. ZAKLJUČAK

Značaj određivanja ubrzanja sile Zemljine teže za veliki broj radova u oblasti geodezije i geodetske metrologije je neosporiv. Poznavanje teže pruža korisne i nezamenljive informacije pri određivanju geoida i definisanju visinskih i gravimetrijskih referentnih mreža. Standardizacija relativnih gravimetrijskih merenja oslanja se na određivanje apsolutne vrednosti teže, dok je kalibracija relativnih gravimetara nemoguća bez apsolutnih gravimetara.

S obzirom da predstavlja lokalnu fizičku konstantu, ubrzanje sile Zemljine teže koristi se pri određivanju metroloških standarda koji uključuju merenje sile, pritiska i obrtnog momenta pa je iz tog razloga veliki značaj određivanja teže i u metrološkim ustanovama svake zemlje.

Pored toga što je određivanje teže od velikog nacionalnog značaja, apsolutno određeno ubrzanje sile Zemljine teže na gravimetrijskim referentnim stanicama doprinosi realizaciji IGRS. S druge strane, za praćenje globalnih fenomena, kao što su geodinamički procesi i klimatske promene, potreban je što veći broj

apsolutnih vrednosti teže, kao i njihova ravnomerna globalna zastupljenost.

Da bi se odredila korekcija vrednosti ubrzanja pri slobodnom padu test mase u nehomogenom gravitacionom polju i da bi se izvršila redukcija merenja apsolutnog ubrzanja sile Zemljine teže sa visine na kojoj se vršilo merenje na visinu poda prostorije, meren je vertikalni gradijent sile Zemljine teže na svim lokacijama.

U tabeli br. 2 prikazani su rezultati merenja po sesijama, srednje vrednosti iz obe sesije i konačna vrednost teže na visini poda za svaku od lokacija.

apsolutnih vrednosti teže, kao i njihova ravnomerna globalna zastupljenost.

Iz gore navedenih razloga, neophodno je meriti apsolutno ubrzanje sile Zemljine teže kako bi se definisali vertikalni i gravimetrijski referentni sistemi (regionalni i globalni) i kako bi se kontinualno pratile dugoročne promene ubrzanja sile Zemljine teže.

LITERATURA

- [1] I. Marson i J. Faller, *G-the acceleration of gravity: its measurement and its importance*, *J. Phys. E: Sci. Instrum*, t. 19, 1986.
- [2] I. Marson, *A Short Walk along the Gravimeters Path*, *International Journal of Geophysics*, 2012.
- [3] C. Morelli, *Absolute gravity as geodetic reference control*, *Journal of Geodynamics*, t. 7, br. 3-4, p. 285–298, 1987.
- [4] L. Timmen, *Absolute and Relative Gravimetry, u Sciences of Geodesy - I*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2010.

- [5] Bureau International des Poids et Mesures, "The International System of Units (SI)," 2019. [Online]. Available: <https://www.bipm.org/utis/common/pdf/si-brochure/SI-Brochure-9-EN.pdf>. [Accessed 20 09 2020].
- [6] W. Torge, *Gravimetry*, Berlin-New York: Walter de Gruyter, 1989.
- [7] M. Nabighian, M. Ander, V. Grauch, R. Hansen, T. LaFehr, Y. Li, W. Pearson, J. Peirce, J. Phillips and M. and Ruder, The Historical Development of the Gravity Method in Exploration, *Geophysics*, vol. 70, no. 6, 2005.
- [8] M. Kuhar i M. Mulić, *Fizikalna geodezija*, Sarajevo: Univerzitet u Sarajevu, 2009.
- [9] J. Krynski, Gravimetry for geodesy and geodynamics - brief historical review, *Reports on Geodesy*, t. 92, br. 1, 2012.
- [10] M. Starčević, *Gravimetrijske metode istraživanja*, Beograd: Nauka, 1991.
- [11] A. Cook, The Absolute Determination of the Acceleration Due to Gravity, *Metrologia*, t. 1, br. 3, pp. 84-114, 1965.
- [12] T. M. Niebauer, Gravimetric Methods – Absolute Gravimeter: Instruments Concepts and Implementation, *Treatise on Geophysics*, t. 3, pp. 43-64, 2007.
- [13] J. Faller, Thirty years of progress in absolute gravimetry a scientific capability implemented by technological advances, *Metrologia*, t. 39, br. 5, 2002.
- [14] D. Crossley, The Measurement Of Surface Gravity, *Reports on Progress in Physics*, t. 76, 2013.
- [15] T. Niebauer, G. Sasagawa, J. Faller, R. Hilt i F. Klopping, A new generation of absolute gravimeters, *Metrologia*, pp. 159-180, 1995.
- [16] V. Ménoret, P. Vermeulen, N. Le Moigne, S. Bonvalot, P. Bouyer, L. A. and B. Desruelle, Gravity measurements below 10⁻⁹ g with a transportable absolute quantum gravimeter, *Scientific Reports*, Vols. 8, Article number 12300, 2018.
- [17] L. Vitushkin, Absolute Gravity Measurement, *Encyclopedia of Geodesy*, 2014.
- [18] „FG5 Absolute Gravimeter User's Manual,“ 2007.
- [19] L. F. Vitushkin, Absolute Ballistic Gravimeters, *Gyroscopy and Navigation*, t. 6, br. 4, p. 254–259, 2015.
- [20] W. Torge, The changing role of gravity reference networks, u Forsberg R., Feissel M., Dietrich R. (eds) *Geodesy on the Move. International Association of Geodesy Symposia*, vol 119, Berlin, Heidelberg, 1998.
- [21] C. Morelli, C. Gantar, McConnell, S. B. R. K. i U. Uotila, „The international gravity standardization net 1971 (IGSN 71),“ Osservatorio Geofisico Sperimentale, Trieste, Italy, 1972.
- [22] O. Odalović, M. Starčević, S. Grekulović, M. Buražer i I. Aleksić, The establishment of a new gravity reference frame for Serbia, *Survey Review*, t. 44, br. 327, 2012.
- [23] J. Agren, A. Engfeldt, R. Svensson, G. Lohasz i M. Lilje, *Report - Absolute Gravity Campaign in Serbia, Capacity Building for Serbia, Real Estate and Registration Project*, 2007.

SUMMARY

THE SIGNIFICANCE OF DETERMINATION OF THE ABSOLUTE VALUE OF GRAVITY IN GEODESY

The gravity is used to solve geodesy's primary tasks, such as determining geoid and defining the height and gravimetric reference networks of different scales, from national to global. Knowledge of gravity is of great importance for both metrology and geodetic metrology. In addition to the historical overview of absolute gravimeters, this paper presents the theoretical basis of the most commonly used method for determining the absolute value of gravity. The principle of operation of the absolute gravimeter FG5 and the importance of international comparison of absolute gravimeters are briefly presented. An overview of the gravimetric reference systems is given, emphasizing the establishment of the International Reference Gravimetric System. The previous works concerning the absolute determination of acceleration due to Earth's gravity field in Serbia are presented. Finally, the importance of determining the absolute value of gravity from the geodetic and metrological perspective is pointed out. Both national and international significance of determining absolute gravity in defining gravimetric reference systems and the importance of absolute gravity in monitoring global phenomena are emphasized.

Key words: Gravity, absolute gravimeters, gravity reference networks