

# Kalibracija relativnih Scintrex CG-3M gravimetara HGI-1 i HGI-2

Željko HEĆIMOVIĆ<sup>1</sup> – Zagreb, Danko MARKOVINOVIĆ<sup>2</sup> – Zagreb

*SAŽETAK. Da bi se mjerila Scintrex CG-3M relativnih gravimetara HGI-1 i HGI-2 Hrvatskoga geodetskog instituta uskladila s mjerilom Gravimetrijske kalibracijske baze Republike Hrvatske obavljena je njihova kalibracija. Korištena su mjerenja između dviju apsolutnih točaka kalibracijske baze: Zagreb - Maksimir i Zagreb - Puntijarka. Mjerenja su provedena u više ponavljanja. Nakon što su obavljene redukcije mjerenja, eliminiran je hod. Metodom najmanjih kvadrata određene su kalibracijske konstante i procijenjena njihova kvaliteta. Na osnovi kalibracijskih konstanta određeni su faktori promjene mjerila koji se unose u memoriju gravimetara. Na taj su način mjerenja gravimetrima HGI-1 i HGI-2 u realnom vremenu usklađena s Gravimetrijskom kalibracijskom bazom Republike Hrvatske.*

*Ključne riječi: kalibracija gravimetra, kalibracijska funkcija, kalibracijska konstanta, faktor promjene mjerila.*

## 1. Uvod

Kalibracija gravimetra podrazumijeva definiranje veze između vrijednosti mjerenja i pripadajućih referentnih vrijednosti (teorijski pravih vrijednosti). Referentne vrijednosti moraju biti određene s većom pouzdanošću u odnosu na rezoluciju mjerenja relativnih gravimetara. Prilikom kalibracije relativnog gravimetra referentne vrijednosti su definirane kalibracijskom bazom koja sadrži točke s mjerenim apsolutnim vrijednostima ubrzanja sile teže. Kalibracijom gravimetra se određuju parametri kalibracijske funkcije koja definira sustavni utjecaj gravimetra i mjerenja se usklađuju s mjerilom kalibracijske baze.

Kalibracija relativnih gravimetara može se provoditi osim na kalibracijkoj bazi i u laboratoriju, gdje se u kontroliranim uvjetima opaža reakcija gravimetra s obzirom na fizikalnu akciju. Laboratorijska kalibracija ovisi o konstrukciji mjernog sustava (Heitz 2001). Ona se najčešće provodi dodavanjem mase na mjereni sustav gravimetra ili mijenjanjem inklinacije gravimetra. Kalibracija relativnih gravimetara redovito se provodi na kalibracijskim bazama. Kalibracijske baze imaju ulogu definiranja jedinstvenog mjerila relativnih gravimetara. Jedinstveno mjerilo svih relativnih gravimetara koji se koriste prilikom promjera osiguravaju jedinstveno mjerilo gravimetrijske mreže (Wenzel 1985).

Da bi utjecaj pogrešaka mjerenja na mjerene razlike ubrzanja sile teže prilikom kalibracije bio malen, razlika ubrzanja sile teže između kalibracijskih točaka mora biti minimalno  $100 \cdot 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$ . Da bi se osigurala čim veća razlika ubrzanja sile teže između točaka, kalibracijske baze imaju pružanje u smjeru sjever-jug jer se s promjenom geodetske širine na nivo-elipsoidu ubrzanje sile teže mijenja za najveći iznos. Ubrzanje sile teže signifikantno se mijenja s promjenom visine, znatno više nego s promjenom položaja. Zbog toga se za točke kalibracijske baze koriste i točke s većim visinskim razlikama, a u visokim objektima definiraju se vertikalne kalibracijske baze (Torge 1989).

---

<sup>1</sup> Doc. dr. sc. Željko HEĆIMOVIĆ, Hrvatski geodetski institut, Savska c. 41/XVI, PP 19, 10144 Zagreb, e-mail: [zeljko.hecimovic@hgi.htnet.hr](mailto:zeljko.hecimovic@hgi.htnet.hr).

<sup>2</sup> Mr. sc. Danko MARKOVINOVIĆ, Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, A. Kačića 26, 10000 Zagreb, e-mail: [danko.markovinovic@zg.htnet.hr](mailto:danko.markovinovic@zg.htnet.hr).

Osnovu kalibracijske baze čine točke na kojima su mjerene apsolutne vrijednosti ubrzanja sile teže, a baza se proglašuje točkama koje se određuju mjerenjima relativnim gravimetrima (Kanngieser i dr. 1983). Vrijednosti ubrzanja sile teže na točkama kalibracijske baze određuju se periodično. Mjere se s više gravimetara, u više ponavljanja i u različita godišnja doba. Također je poželjno da se koristi više modela gravimetara.

Relativni gravimetri s vremenom mijenjaju svoja mjerna svojstva te ih treba periodično kalibrirati. Osim redovite kalibracije oni se kalibriraju prije, nakon i po potrebi za vrijeme mjernih kampanja.

## 2. Mjerenja za kalibraciju relativnih gravimetara

Za kalibraciju relativnih Scintrex CG-3M gravimetara HGI-1 i HGI-2 Hrvatskoga geodetskog instituta korištena su mjerenja između točaka Gravimetrijske kalibracijske baze Republike Hrvatske: Zagreb – Maksimir i Zagreb – Puntijarka (Bašić i dr. 2001). Navedene su točke dio Apsolutne gravimetrijske mreže Republike Hrvatske (Čolić i dr. 2000). Visinska razlika između točaka je 843 m, a razlika geodetskih širina 5'. Razlika ubrzanja sile teže između točaka je  $151 \cdot 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$ .

Da bi se dnevni hod mogao pouzdano modelirati, mjerenja su provedena metodom zvijezde. Ponavljana su više dana od kraja svibnja do početka kolovoza 2002. godine. Za vrijeme gravimetrijskih mjerenja mjereno je i tlak zraka za potrebe računanja redukcije. Zbog promjene ubrzanja sile teže za vrijeme mjerenja i zbog promjena karakteristika gravimetra gravimetrijska su mjerenja dinamička. U realnom vremenu provedene su redukcije za faktore mjerila, naginjanje gravimetara, temperaturu gravimetra, Zemljine plimne valove i "a priori" hod, a u naknadnoj obradbi za tlak zraka i gibanje osi rotacije Zemlje.

Scintrex CG-3M gravimetri imaju mogućnost korekcije mjerila mjerenja u realnom vremenu. U tu se svrhu u memoriju gravimetra upisuju faktori mjerila. Faktori mjerila korišteni za vrijeme mjerenja određeni su na osnovi mjerenja na kalibracijskoj bazi u Kanadi u redovitom Scintrexovu postupku kalibracije novih gravimetara.

Nakon provedenih redukcija iz mjerenja je eliminiran hod gravimetra. Matematički izrazi za navedene redukcije i hod mogu se naći u Hećimović (2003).

## 3. Određivanje kalibracijskih konstanta

Za kalibracijsku funkciju može se koristiti više matematičkih modela. Najčešće se koriste funkcije polinomnog oblika. Funkcionalni model koji povezuje vrijednosti ubrzanja sile teže kalibracijskih točaka, mjerene veličine i tražene kalibracijske konstante ima oblik (Torge 1989)

$$\Delta g_{j,i} = K_1(z_j - z_i) + K_2(z_j^2 - z_i^2), \quad (1)$$

gdje je

$\Delta g_{j,i}$  – razlika ubrzanja sile teže na točkama  $i, j$ ,

$K_1$  i  $K_2$  – kalibracijske konstante,

$z_{j,i}$  – očitavanja gravimetra na točkama  $i, j$ .

U izrazu (1) poznate su razlike ubrzanja sile teže  $\Delta g_{j,i}$  za točke  $i$  i  $j$  kalibracijske baze, očitavanja gravimetra  $z_{j,i}$  dobiju se mjerenjima na točkama  $i$  i  $j$ , a kalibracijske konstante  $K_{1,2}$  su

nepoznate. Na raspolaganju su prekobrojna mjerenja te je izjednačenje provedeno po metodi najmanjih kvadrata minimizirajući normu

$$\min_{\vec{v}} \|\vec{v}^T \vec{P}\vec{v}\|, \quad (2)$$

gdje je

$\vec{v}$  – vektor popravaka,

$\vec{P}$  – matrica težina.

S pomoću izraza (1) formiraju se jednadžbe popravaka, koje u matricnom obliku poprimaju oblik

$$\vec{l} + \vec{v} = \vec{A}\vec{x}, \quad (3)$$

gdje je  $\vec{l}$  vektor mjerenja,  $\vec{A}$  konfiguracijska matrica,  $\vec{v}$  vektor popravaka,  $\vec{P}$  matrica težina i  $\vec{x}$  vektor nepoznanica. Izjednačenje je provedeno koristeći klasičan postupak posrednog izjednačenja koji se može naći u Feil (1989).

Varijanca jedinične težine  $s_0^2$  je mjera nekonzistentnosti mjerenja s funkcijskim modelom i dobivena je s pomoću izraza

$$s_0^2 = \frac{\vec{v}^T \vec{P}\vec{v}}{m - n}, \quad (4)$$

gdje je m broj mjerenja i n broj nepoznanica. Procjena kvalitete nepoznanice K dobivena je pomoću standardne devijacije koristeći izraz

$$s_K = s_0 \sqrt{q_{xx}}, \quad (5)$$

gdje je  $q_{xx}$  dijagonalni član inverzne matrice normalnih jednadžbi.

#### 4. Određivanje faktora promjene mjerila Scintrex gravimetara

Osnovno je načelo mjerenja Scintrex CG-3M gravimetra da na mjernu masu, koja je vertikalno obješena za oprugu, djeluje sila uzrokovana poljem ubrzanja sile teže. Sile koje se suprotstavljaju ubrzanju sile teže su sila opruge i mala, električki izazvana sila koja vraća mjerni sustav u nulti položaj (feedback sustav). S pomoću kapacitativnog senzora pomaka mjeri se napon koji je proporcionalan pomaku mjerne mase, tj. promjeni sile koju izaziva polje ubrzanja sile teže. Signal s kapacitativnog senzora pomaka pretvara se u analogno-digitalnom pretvaraču u digitalni oblik.

Scintrex CG-3M gravimetri provode promjenu mjerila očitavanja u realnom vremenu. U tu se svrhu u memoriju gravimetra upisuju faktori mjerila koji odgovaraju linearnom i kvadratnom članu u izrazu (Scintrex 1998)

$$z_0 = GCAL1 \left( \frac{ADV_M}{ADV_{CAL}} \right) + GCAL2 \left( \frac{ADV_M}{ADV_{CAL}} \right)^2 \quad (6)$$

gdje je

$z_0$  - očitavanje,

$ADV_M$  - mjereni napon nakon prolaska kroz analogno-digitalni pretvarač,

$ADV_{CAL}$  - kalibracijski napon nakon prolaska kroz analogno-digitalni pretvarač,

GCAL1 - linearni faktor promjene mjerila očitavanja,

GCAL2 - kvadratni faktor promjene mjerila očitavanja.

Stabilnost faktora promjene mjerila za vrijeme mjerenja ovisi o stabilnosti kapacitativnog senzora pomaka i stabilnosti referentnog napona. Promjena faktora mjerila s vremenom se javlja ponajprije zbog elastičnog opuštanja senzora, pa gravimetre treba periodično kalibrirati.

Kvadratni faktor skaliranja GCAL2 opisuje male nelinearne promjene mjerila. On je u Scintrex laboratoriju, prilikom izradbe gravimetra, reduciran na nulu i prema uputama proizvođača konstantu GCAL2 ne treba mijenjati. Osim toga za određivanje kvadratnog faktora mjerila treba imati mjerenja na više točaka kalibracijske baze s različitim vrijednostima ubrzanja sile teže. Zbog navedenih su razloga za gravimetre HGI-1 i HGI-2 određeni samo linearni faktori promjene mjerila GCAL1, a za njegovo određivanje dovoljno je poznavati samo kalibracijsku konstantu  $K_1$ .

S pomoću određene kalibracijske konstante  $K_1$  određuje se novi faktor promjene mjerila GCAL1' s pomoću izraza

$$GCAL1' = GCAL1 \cdot K_1, \quad (7)$$

gdje je

GCAL1 - linearni faktor promjene mjerila očitavanja korišten tijekom mjerenja,

GCAL1' - novi linearni faktor promjene mjerila očitavanja,

$K_1$  - kalibracijska konstanta.

Nova vrijednost GCAL1' unosi se u memoriju gravimetra da bi mjerenja u realnom vremenu bila usklađena s obzirom na referentne vrijednosti korištene prilikom kalibracije.

## 5. Rezultati kalibracije gravimetara HGI-1 i HGI-2

Primjenom navedenih redukcija, eliminacijom hoda i izjednačenjima dobivene su kalibracijske konstante  $K_1$  za oba gravimetra. Vrijednosti kalibracijskih konstanti  $K_1$  za gravimetre HGI-1 i HGI-2 sa pripadajućim standardnim devijacijama  $s_K$  i standardnim devijacijama mjerenja jedinične težine  $s_0$  su dane u tablici 1.

Tablica 1. *Kalibracijske konstante za gravimetre HGI-1 i HGI-2.*

Mjerenja	$K_1$	$s_K$	$s_0$ [ $10^{-5} \text{ ms}^{-2}$ ]
HGI-1	1,00002773	0,00000661	0,0055
HGI-2	1,00004421	0,00001039	0,0047

Dobivene kalibracijske konstante određuju mjerilo s obzirom na točke Gravimetrijske kalibracijske baze Republike Hrvatske.

S pomoću dobivene kalibracijske konstante određeni su novi faktori promjene mjerila GCAL1' za oba gravimetra (v. tablicu 2).

Tablica 2. Faktori promjene mjerila očitavanja za gravimetre HGI-1 i HGI-2.

	GCAL1	$K_1$	GCAL1'
	$[10^{-5} \text{ ms}^{-2}]$		$[10^{-5} \text{ ms}^{-2}]$
HGI-1	6182,646	1,00002773	6182,8174
HGI-2	6055,074	1,00004421	6055,3417

Novi faktori promjene mjerila GCAL1' unose se u memorije gravimetara. Na taj se način mjerenja gravimetrima HGI-1 i HGI-2 u realnom vremenu usklađuju s mjerilom Gravimetrijske kalibracijske baze Republike Hrvatske.

## 6. Zaključak

Da bi se mjerila relativnih Scintrex CG-3M gravimetara Hrvatskoga geodetskog instituta HGI-1 i HGI-2 uskladila s mjerilom Gravimetrijske kalibracijske baze Republike Hrvatske, provedena je njihova kalibracija s obzirom na mjerenja između apsolutnih točaka baze: Zagreb - Maksimir i Zagreb - Puntijarka. Mjerenja su u realnom vremenu korigirana za faktor mjerila, temperaturu senzora, nagib gravimetra, a priori hod, Zemljine plimne valove te naknadnom obradbom za tlak zraka i gibanje Zemljinih polova. Iz mjerenja je eliminiran dnevni hod.

Za definirani funkcionalni model metodom najmanjih kvadrata određene su kalibracijske konstante za oba gravimetra. S pomoću njih su određeni faktori promjene mjerila očitavanja gravimetara.

Postupkom kalibracije gravimetri HGI-1 i HGI-2 Hrvatskog geodetskog instituta kalibrirani su s obzirom na Gravimetrijsku kalibracijsku bazu Republike Hrvatske. Korištenjem dobivenih faktora promjene mjerila dobivaju se mjerenja s obzirom na mjerilo kalibracijske baze u realnom vremenu.

## 7. Literatura

- Bašić, T., Markovinović, D., Rezo, M., Špoljarić, D., Hećimović, Ž. (2001): Studija stanja i prijedlog nove Osnovne gravimetrijske mreže Republike Hrvatske, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Čolić, K., Pribičević B., Medak, D., Đapo, A., Ivičević, V., Lothhammer, A., Buljan, D. (2000): Elaborat o izvršenim radovima na projektu: Priključenje Republike Hrvatske u svjetsku apsolutnu gravimetrijsku mrežu, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Feil, L. (1989): Teorija pogrešaka i račun izjednačenja. Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Hećimović, Ž. (2003): Određivanje vertikalnog gradijenta ubrzanja sile teže relativnim gravimetrima HGI-1 i HGI-2. Predano za objavljivanje u Geodetskom listu.
- Heitz, S. (2001): Gravimeter und Gradiometer. Mitteilungen aus den Geodätischen Instituten der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität. Nr. 88, Bonn.
- Kanngieser, E., Kummer, K., Torge, W., Wenzel, H. G. (1983): Das Gravimeter-Eichsystem Hannover. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover. Nr. 120, Hannover.
- Scintrex (1998): User's Guide. CG-3/3M Gravity Meter.

Torge, W. (1989): Gravimetry. De Gruyter, Berlin, New York.

Wenzel, H. G. (1985): Schwerenetze. U: H. Pelzer (Ed.)(1985): Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung II, str. 457 - 486, Wittwer, Stuttgart.

## Calibration of HGI-1 and HGI-2 relative gravimeters

*ABSTRACT: To define scale of two Scintrex CG-3M relative gravimeters HGI-1 and HGI-2 of Croatian Geodetic Institute, considering the scale of the Croatian gravimetric calibration line, calibration is done. Calibration is done using measurements on two points of calibration line that are also points of the Croatian absolute gravimetric network: Zagreb - Maksimir and Zagreb - Puntijarka. Measurements are repeated for more days. Measurement reductions are made in real time and in post processing. After gravimeter drift is removed, calibrations constants are determined using last square adjustment. Quality of calibration constants and measurements is judged. Scale factor for each gravimeter is determined using calibration constants. In that way are gravimetric measurements by HGI-1 and HGI-2 made consistent with Croatian gravimetric calibration line in real time.*

*Key words: gravimeter calibration, calibration function, calibration constant, scale factor.*