

# Model radnog popravka kompasa za 2020. godinu

---

Mario Brkić, Matej Varga, Marijan Grgić,  
Nikol Radović i Tomislav Bašić

## Sažetak

*Popravak kompasa je kut koji u točki na karti definira projekcija magnetskog meridijana točke s ordinatom kartografskog projekcijskog sustava, a jednak je razlici magnetske deklinacije i konvergencije meridijana. U praksi topografsko-geodetske pripreme i osiguranja primjenjuje se tzv. radni popravak kompasa, u kojemu se deklinacija sastoji od dnevnog srednjaka i dnevne promjene deklinacije. Inicijalni model radnog popravka kompasa izrađen je radi promocije daljnje suradnje Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i Ministarstva obrane Republike Hrvatske. Model radnog popravka kompasa dAzmr2020 oslanja se na aktualni model geomagnetske informacije GI2020v1, parametre službene kartografske projekcije Republike Hrvatske i empirijski model dnevne promjene deklinacije. Osim postupaka obnove geomagnetske informacije, računanja konvergencije meridijana i modeliranja dnevne promjene, zajedno s procjenama pouzdanosti, u ovom se radu pružaju informacije i o računalnom programu dAzmr2020 za računanje radnog popravka kompasa preko Hrvatske u 2020. godini.*

## Ključne riječi

*Geomagnetska informacija, konvergencija meridijana, magnetska deklinacija, godišnja promjena deklinacije, dnevna promjena deklinacije, radni popravak kompasa.*

---

1 Članak je primljen u Uredništvo 03. travnja 2020. i prihvaćen za objavu 15. lipnja 2020.

## Abstract

*Compass correction is an angle at the point on the map defined by point's magnetic meridian projection with the ordinate of the cartographic projection system, and is equal to the difference of the magnetic declination and the meridian convergence. In the topographic-geodetic preparation and safety practice, the so called working compass correction, in which the declination is composed of declination daily mean, as well as the diurnal variation, is applied. Initial model of the working compass correction was made in order to promote further cooperation between the Faculty of Geodesy of the University of Zagreb and the Ministry of Defence of the Republic of Croatia. The working compass model dAzmr2020 relies on the current GI2020v1 model of geomagnetic information, the parameters of the official cartographic projection of the Republic of Croatia, as well as on the empirical model of diurnal variation of declination. Besides the procedures for geomagnetic information renewal, calculation of the meridian convergence, diurnal variation modelling, and reliability estimates, the paper briefs on the dAzmr2020 computer programme for computing the working compass correction over Croatia in 2020.*

## Keywords

*Geomagnetic information, meridian convergence, magnetic declination, annual declination change, daily declination change, practical compass adjustment.*

## Uvod

Topografsko-geodetska priprema i osiguranje (TGPO) oružanih snaga podrazumijeva organizaciju i provedbe taktike, tehnike i postupaka upravljanja pješačkim, topničkim, manevarskim i drugim postrojbama, osobito u procesima upravljanja i rukovanja vatrom u borbenim djelovanjima (vidi npr. McKenney 2003, U.S. Marine Corps 1999, Blaha i Šilinger 2014, Blaha i dr. 2017). TGPO izvode topografsko-geodetske postrojbe i topnički zapovjednici radi osiguravanja precizne i iznenadne paljbe topništva te on obuhvaća razvijanje topničke trigonometrijske mreže popunjavanjem trigonometrijske mreže RH ili, prema potrebi, razvijanjem

nove lokalne mreže; određivanje pravokutnih koordinata paljbenih položaja i promatračnica topničkih postrojbi, orijentira, repera i ciljeva; orijentiranje i provjeru orijentacije instrumenata, određivanje podataka za usmjerivanje u osnovni pravac te provjeru usmjerenosti topničkih oružja (MORH 1996). Kao dio TGPO-a, u procesu priprema za rukovanje i upravljanje vatrom topničkih postrojbi provodi se računanje tzv. popravka kompasa ( $\Delta Azm$ , u nastavku  $dAzm$ ) za stajalište ili paljbenu položaj oružja. Popravak kompasa definira se kao kut između pravokutnog +N (ili +x, ovisno o kartografskoj projekciji) pravca i magnetskog meridijana, u svrhu usmjeravanja pomoću karte i kompasa, a koristi se i danas, bez obzira na suvremene tehnike orijentacije i navigacije kao što su GNSS (Globalni navigacijski satelitski sustavi) ili ELNS (Enhanced Link Navigation System) (Goldenberg 2006) i sl.

Popravak kompasa može se definirati i kao razlika magnetske deklinacije ( $D$ ) i konvergencije meridijana ( $\gamma$ ), a u praksi se koristi tzv. radni popravak kompasa ( $dAzmr$ ), koji uz  $dAzm$  uključuje i dnevnu promjenu deklinacije ( $dpD$ ). Budući da se radni popravak kompasa mijenja u vremenu i prostoru, konvencionalno određivanje  $dAzmr$  u kontekstu TGPO-a podrazumijeva terenska mjerenja kompasom, računanja i primjenu tablica. Kao alternativno rješenje, na Geodetskom fakultetu (GF) Sveučilišta u Zagrebu (SuZ) izrađen je model radnog popravka kompasa za 2020. godinu  $dAzmr2020$ , o čemu priopćujemo, iako u trenutku pisanja ovog rada nije izvjestan utjecaj situacije u pogledu pandemije virusa COVID-19 na nastavak projekata II. ciklusa obnove geomagnetske informacije (GI) Republike Hrvatske (II.COIRH). U svakom slučaju, važno je podsjetiti da bez poznavanja popravka kompasa, pogreška gađanja na veće udaljenosti može biti nezanemariva. Primjerice, za poznate geodetske latitute i longitute položaja  $45^{\circ} 30' 10''$  i  $19^{\circ} 00' 5''$  radni popravak kompasa izračunan modelom  $dAzmr2020$  za dan 1. listopada 2020. u 00:00, iznosi  $3^{\circ} 12'$ . Ako se zanemari  $dAzmr$ , uvodi se znatna pogreška gađanja cilja, npr. na 10 km od približno 559 m. Drugim riječima, nužno je osigurati pouzdan radni popravak kompasa.

## Model radnog popravka kompasa dAzmr2020

Model dAzmr2020 se u određivanju deklinacije i godišnje promjene deklinacije ( $gpD$ ) oslanja na aktualni model geomagnetske informacije GI2020 - verziju 1 (GI2020v1), već realiziran za Državnu geodetsku upravu (DGU) i Ministarstvo obrane Republike Hrvatske (MORH), a u okviru projekta II.COGIRH predviđenog planom za 2020. god., odnosno znanstvenog projekta „Praćenje geomagnetske informacije“ pri GF SuZ (2019/2020). Nadalje, model iz parametara službene državne kartografske projekcije računa konvergenciju meridijana, dok se iz modela dnevne promjene deklinacije ( $dpD$ ), izrađenoga na temelju podataka opservatorija Lonjsko polje za 2019., predicira  $dpD$  u 2020.

### *Model geomagnetske informacije GI2020v1*

Geomagnetska informacija, tj. deklinacija  $D$  i njezina godišnja promjena  $gpD$ , povezuje kartu i kompas. Deklinacija  $D$  kut je između geografskog i magnetskog meridijana, koji prolaze geografskim, odnosno magnetskim sjeverom (engl. True North, TN; engl. Magnetic North, MN). Deklinacija omogućuje prelazak iz sustava kompasa (koji određuje smjer MN-a) u sustav karte (koja je određena TN-om), budući da je azimut (engl. True Bearing, TB) u odnosu na geografski sjever jednak sumi deklinacije  $D$  i magnetskog azimuta (engl. Magnetic Bearing, MB) u odnosu na magnetski sjever. Deklinacija za epohu 2020,0 preko RH iznosi  $3,7^\circ - 5,4^\circ$ , a godišnja promjena  $7,6' / \text{god.} - 8,7' / \text{god.}$  (prema modelu GI2020v1). Budući da je deklinacija nezanemarivog i (sve više) rastućeg iznosa preko teritorija Hrvatske, njeno poznavanje je kritično za pouzdanu navigaciju i orijentaciju uz pomoć karte i kompasa. Do aktualne deklinacije može se doći izmjerom, uz pomoć GI s topografskih karata (TK), javno dostupnih globalnih geomagnetskih modela, ili aktualnog GI modela za Hrvatsku. Karte, prvenstveno zbog zastarjelosti GI, kao i globalni modeli, zbog njihova (spektralnog) sadržaja, uglavnom nisu prikladni izvori GI za potrebe TGPO. Na primjer, primjena zastarjele deklinacije, primjerice lista TK 471-4 iz 1981., upućuje na moguću pogrešku gađanja, koja bi 1995. za cilj udaljen 18 km iznosila približno 236 m, a za cilj

udaljen 27 km približno 354 m. Naime, GI zastarijeva već nakon nekoliko godina. S druge strane, deklinacija raspoloživih globalnih geomagnetskih modela (npr. IGRF, WMM ili EMM) odstupa i do 0,5° od stvarne deklinacije izmjerene na teritoriju Hrvatske (vidi Brkić et al. 2017 i ondje navedene referencije).

Sukladno NATO standardu STANAG 7172 Use of Geomagnetic Models (Edition 3, March 2017), poželjna je uporaba World Magnetic Model-a, WMM. Na globalnoj skali WMM je prikladniji, no lokalno prednost valja dati GI modelu koji je pouzdaniji (Brkić et al. 2017). STANAG 7172 treba smatrati obvezujućim u situacijama u kojima je WMM pouzdaniji ili prikladniji od ostalih raspoloživih modela, odnosno tamo gdje je nužna interoperabilnost. Drugi NATO standard, AGeoP-24 Use of Geomagnetic Models (Edition A, Version 1, March 2017), postavlja WMM za standardni model u instrumentima i aplikacijama. Iako u nekim situacijama glatko polje WMM-a može biti jednostavnije za uporabu, prvenstvo u navigaciji i orijentaciji pri TGPO-u preporučujemo dati nacionalnim (lokalnim), odnosno pouzdanijim i detaljnijim modelima (AGeoP-24, §1.2, točka 7; §1.4, točka 18b).

Najpouzdanija GI dobiva se izmjerom Zemljina magnetskog polja, koja obuhvaća određivanje iznosa i smjera vektora magnetske indukcije u odnosu na službeni referentni sustav na lokaciji geomagnetske mreže ili lokaciji od posebnog interesa. U izmjerama I. i II. COGIRH točnosti (reduciranih) izmjera deklinacije nalaze se unutar 1', pri čemu je mjera točnosti rasap =  $\max\{|D^{epoha} - \langle D \rangle^{epoha}|\}$  (Brkić et al. 2013). Slične točnosti ostvarene su u bilateralnom znanstvenom projektu Joint Croatian-Hungarian Geomagnetic Repeat Station Survey and Joint Geomagnetic Field Model (JCHGRSSM), koji je proveden za Ministarstvo znanosti, obrazovanja i športa (MZOS). Manje pouzdano određivanje deklinacije izvodi se kompasom. Alternativa su modeli GI koji pružaju pouzdanu i detaljnu GI za cijelu Hrvatsku (i okolicu). Izmjere na neanomalnim lokacijama Osnovne geomagnetske mreže Republike Hrvatske pri prihvatljivim uvjetima (Brkić et al. 2018), te analize kvalitete i redukcije (Brkić et al. 2019) koraci su u izradi GI modela. Ciljane pouzdanosti modela su unutar tzv. standardne točnosti od 6'. Za postizanje i održavanje visoke pouzdanosti nužan je kontinuirani monitoring Zemljina magnetskog polja, tj. testiranje i ažuriranje modela GI periodičnim izmjerama

Osnovne geomagnetske mreže Republike Hrvatske (OGMRH) i/ili lokacija od posebnog interesa (LPI). Saznanja dobivena tim praćenjem poslužit će i izradi strategije obnove GI (Brkić et al. 2019a).

Modeli geomagnetske informacije omogućuju određivanje  $D$  i  $gpD$  za proizvoljnu lokaciju unutar teritorija Hrvatske i traženi dan tekuće godine (Brkić et al. 2013, Brkić 2019). Ažurirani model GI za 2020. godinu, GI2020v1, realiziran je svođenjem najnovijih raspoloživih podataka uz pomoć aktualnih IGRF-13 International Geomagnetic Reference Field i WMM2020 World Magnetic Model-a (URL-3), te definitivnih vremenskih nizova geomagnetskog opservatorija Lonjsko polje (LON) za 2019. godinu. Globalni geomagnetski modeli IGRF-13 i WMM2020 objavljeni su u prosincu 2019. godine, za razdoblje 2020. – 2025. godine, a distribuiraju ih International Association of Geomagnetism and Aeronomy (URL-1) odnosno američka National Geospatial-Intelligence Agency i britanski Defence Geographic Centre. Korištenje globalnog modela oko epohe realizacije u svođenju  $D$  iz starijih epoha, kao i predikciju  $gpD$ , je prihvatljivo rješenje, pogotovo u vremenu iščekivanja druge izmjere u okviru II.CO GIRH (a koja treba omogućiti najbolju  $gpD$ ). Podaci LON dobiveni su ljubaznošću Geofizičkog odsjeka Prirodoslovno-matematičkog fakulteta (PMF) Sveučilišta u Zagrebu, a mogu se preuzeti i putem INTERMAGNET-a (URL-2).

Očekivana maksimalna apsolutna pogreška svođenja deklinacije  $D_S^{epoha}$ , s pomoću globalnog modela, na lokaciji  $S$

$$red. err. = D_S^{epoha} + D_{model}^{epoha redukcije} - D_{model}^{epoha} - D_S^{epoha redukcije} \quad (1)$$

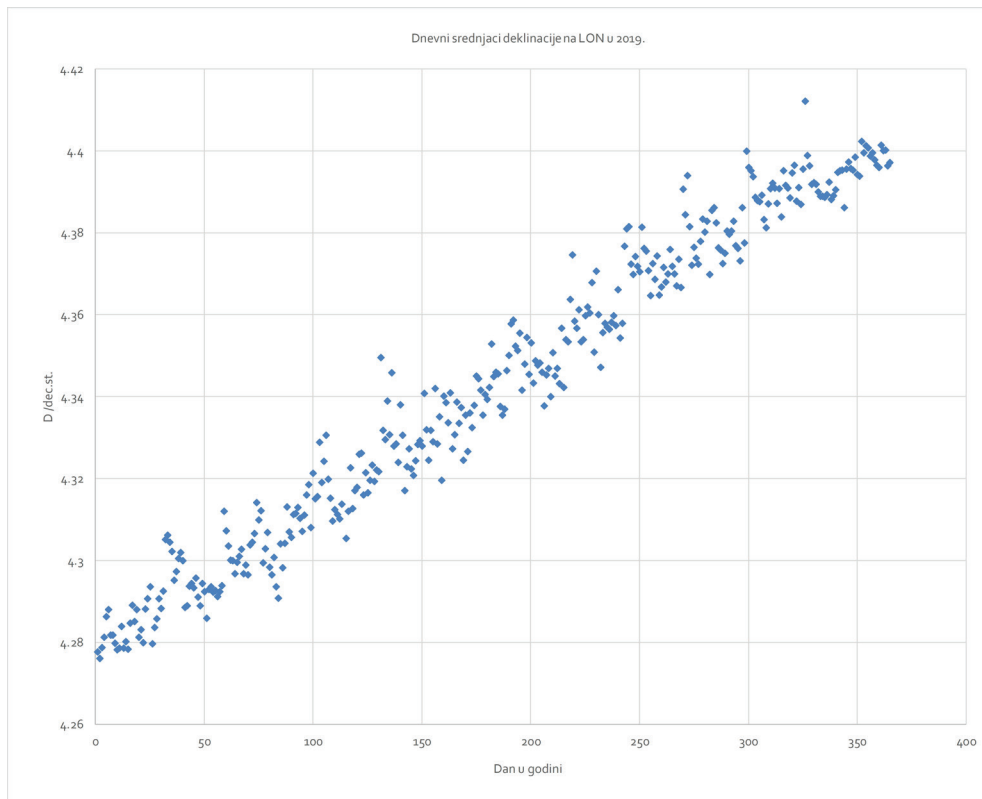
iznosi općenito za sve epohe  $< 5'$ , a za epohe I. ciklusa obnove geomagnetske informacije Republike Hrvatske (I.CO GIRH) i OGMRH-a (Brkić et al. 2013)  $< 3'$ , što je procijenjeno primjenom podataka opservatorija Tihany (THY), dok je za recentne epohe (posljednjih pet godina) očekivana pogreška u OGMRH-u još manja, unutar  $1'$  (procijenjeno primjenom podataka LON-a). Očigledno najpouzdanije deklinacije ostvarit će se svođenjem reducirane izmjere Hrvatske geomagnetske sekularne mreže iz 2018. (Brkić et al. 2019). Nadalje, vremenski rizik korištenja IGRF  $gpD$  u posljednjih 20-ak godina za

bliske opservatorije je unutar 2' / god. (Brkić et al. 2017), što je potvrđeno i s IGRF-13 za THY, dok je razlika recentnih pravih i IGRF-13  $gpD$  na LON < 40'' / god. U najbližim opservatorijima najveća apsolutna razlika  $D$  i  $gpD$  iz WMM2020 i IGRF-13 za 2020,0 manja je od 41'' odnosno 18'' / god. (u LON 23'' odnosno 6'' / god.). Stoga su globalni modeli, osim vizualno, i kvantitativno usporedivi na teritoriju Hrvatske, tj. korištenje njihove godišnje promjene je opravdano. Budući da je prediktivni WMM službeno u primjeni unutar NATO-a (STANAG 7172; MIL-W-89500), WMM2020 je ovdje uporabljen za definiciju aktualne  $gpD^{2020,0-2021,0}$ .

Za izradu GI2020v1 modela odabrane su, unutar područja 11,00° - 24,18° geod. dužine i 38,05° - 48,70° geod. širine, dostupne najrecentnije izvorne deklinacije: opservatorija (OBS) epoha 1986,5- 2018,5 (URL-4), LON za 2019. god. (URL-2), HGSM i Hrvatske geomagnetske mreže za kartiranje polja (HGMKP) epohe 2018,5 (Brkić et al. 2018, Brkić et al. 2019a i Brkić et al. 2019b), HGMKP-a epoha 2008,5, 2009,5 i 2010,5 (Brkić et al. 2013), topografskih karata u mjerilu 1:25000 (TK25) epoha od 1969. do 1997. (Brkić et al. 2019a i Brkić et al. 2019b), za Mađarsku u epohi 2009,5 (Brkić et al. 2013), Italiju u epohi 2015,0 (Dominici et al. 2017) te Austriju, Italiju, Njemačku i Slovačku za razdoblje 2015. - 2020. (URL-4), te IGRF-13 lokacijama na rubovima. Nakon testiranja na bliske (<100 m udaljene) točke i duple (kao što su npr. stare, ili iste točke raznih epoha), preostalo je 868 ulaznih deklinacija koje su svedene na ciljanoj epohi.

Definitivni podaci s opservatorija LON za 2019. godinu najprije su iskorišteni za određivanje dnevnih  $D$  (slika 1), te kasnije za određivanje  $D$  i  $gpD$  u ciljanoj epohi 2020,0 linearnim fitom dnevnih  $D$  pri indeksu geomagnetske aktivnosti  $K < 2$  (slično Brkić 2019). Ostalim OBS i IGRF lokacijama izravno je izračunana IGRF-13  $D$  i  $gpD$  za 2020,0. Deklinacije prijašnjih epoha za sve ostale lokacije  $S$  svedene su na  $D^{2020,0}$  prema (Brkić et al. 2013):

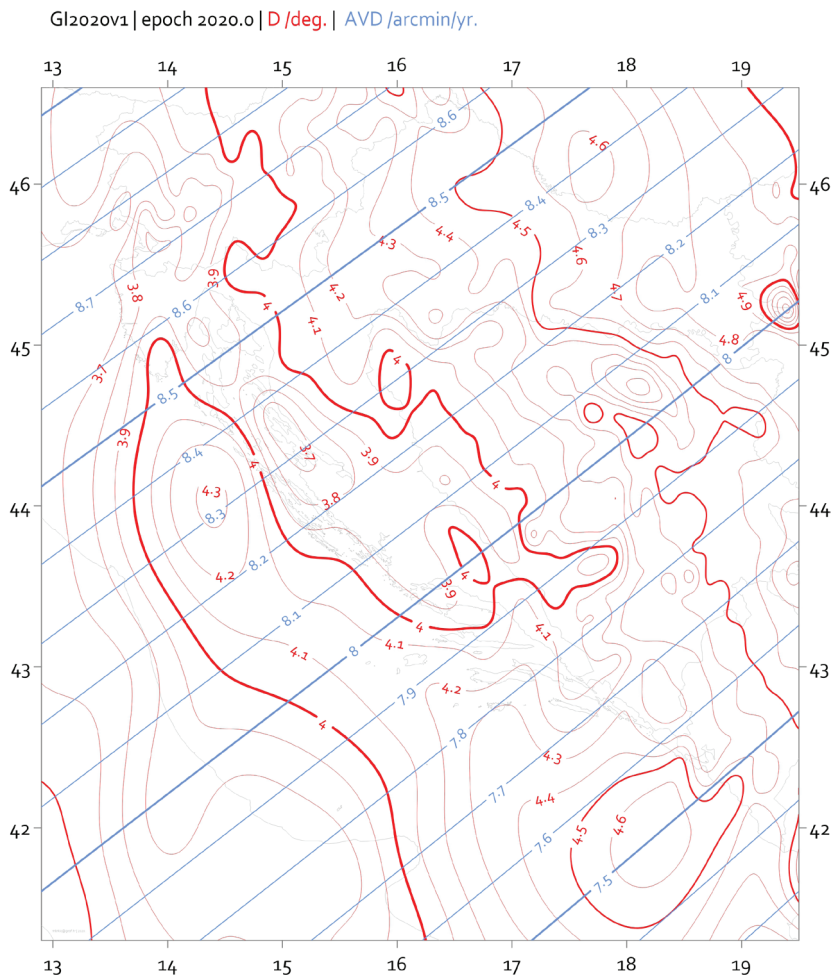
$$D_S^{epoha\ redukcije} = D_S^{epoha} + D_{model}^{epoha\ redukcije} - D_{model}^{epoha} \quad (2)$$



**Slika 1. Dnevni  $D$  srednjaci izvedeni iz LON def. INTERMAGNET podataka za 2019.**

Izogone određene Radial Basis Function (RBF) interpolacijom svedenih podataka  $D^{2020,0}$ , kao i izopore WMM2020  $gpD^{2020,0-2021,0}$  (slika 2) testirane su usporedbama s IGRF-13, te posebno s prethodnim GI2019v1 modelom. Sama RBF metoda interpolacije je egzaktna i glatka, te daje zanemarive rezidualne (razlike RBF i svedenih deklinacija) u točkama OGMRH, reda veličine  $10^{-5}$  stupnja.

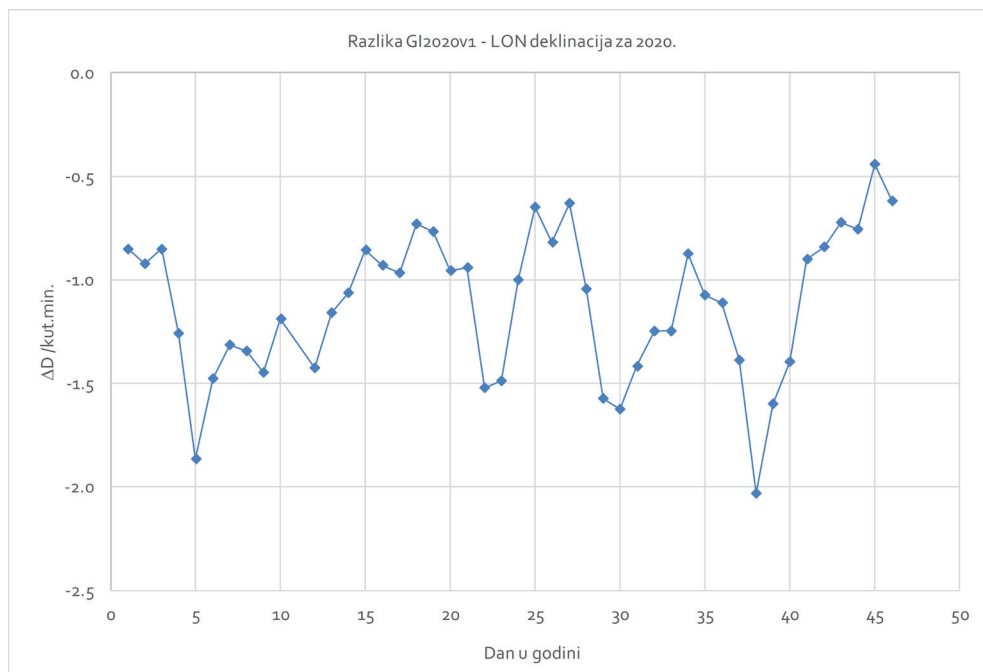




Slika 2.  $D$  ( $^{\circ}$ ) i  $gpD$  ( $/\text{god.}$ ) prema modelu GI2020v1 za epochu 2020,0

GI2020v1 model čine digitalni modeli GI2020v1.D i GI2020v1.gpD, koji sadrže  $D^{2020,0}$  odnosno  $gpD^{2020,0-2021,0}$ , definirani za područje  $12,9^{\circ}$  –  $19,5^{\circ}$  geod. dužine i  $41,3^{\circ}$ –  $46,6^{\circ}$  širine na GRS80 elipsoidu. Digitalni modeli su rasterske ASCII datoteke ulazne u GI2020v1 program koji računa GI za zadane točke i dane 2020. godine. U točkama OGMRH su razlike, programom izračunanih i svedenih deklinacija, prosječnog reda veličine  $10^{-3}$  stupnja, dok su  $gpD$

reziduali  $10^{-4}$  '/god. Ukupna maksimalna pogreška GI2020v1 na lokacijama OGMRH i za epohu 2020,0 procjenjuje se  $< 3.6'$ , tj. unutar standardne pogreške. Na ostalim lokacijama je pouzdanost modela je nepoznata, te je stoga na LPI, kao što su vojni poligoni i sl., poželjna (periodična) izmjera! Testiranje prediktivnosti GI2020v1 modela u odnosu na stvarne  $D$  na LON za sve, mirne i nemirne, u trenutku istraživanja raspoložive dane u siječnju i veljači 2020. god. (URL-2) prikazano je na slici 3. Iako je razlika mala (srednja razlika iznosi  $-1,1'$ ) i unutar je standardne pogreške, praćenje polja može koristiti daljnjem poboljšanju budućih verzija modela. Naravno, za učinkovito praćenje polja i značajno poboljšanje modela na cijelom teritoriju Republike Hrvatske poželjno je raspolagati s više opservatorija, kao što je to već argumentirano u prethodnim tehničkim izvješćima odnosno radovima (vidi npr. Brkić et al. 2019b i ondje navedene referencije).



Slika 3. Razlika GI2020v1 i LON deklinacija za raspoložive dane 2020.

## *Konvergencija meridijana i popravak kompasa*

Sljedeći sastojak modela  $dAzmr2020$ , koji omogućuje određivanje popravka kompasa s pomoću deklinacije, jest konvergencija meridijana  $\gamma$ . Riječ je o kutu koji u točki projekcije meridijana tangenta zatvara na projekciju meridijana i paralela s ordinatom, tj. osi +N (engl. northing) ako se razmatra službena kartografska projekcija Republike Hrvatske HTRS96/TM (Hrvatski terestrički referentni sustav 1996 – Transverse Mercator). Za komforme projekcije (kakva je HTRS96/TM) vrijedi da isti kut zatvaraju i tangenta na projekciju paralele i paralela s osi E (engl. easting) u istoj točki.

Konvergenciju  $\gamma$  moguće je izračunati iz geodetskih koordinata (Frančula 2004). Definiramo li  $l = \lambda - \lambda^0$ , pri čemu je  $\lambda^0$  početni meridijan kartografske projekcije,  $t = \tan \varphi$ , odnosno  $\eta = e' \cos \varphi$ , pri čemu je  $e'$  drugi numerički ekscentricitet elipsoida, a  $\varphi$  geod. širina, konvergencija meridijana je sljedeća

$$\gamma = l \cdot \sin \varphi + \gamma_1 l^3 + \gamma_2 l^5 \quad (3)$$

pri čemu je

$$\gamma_1 = 1/3 \sin \varphi \cos^2 \varphi (1 + 3\eta^3 + 2\eta^4), \quad (4)$$

te

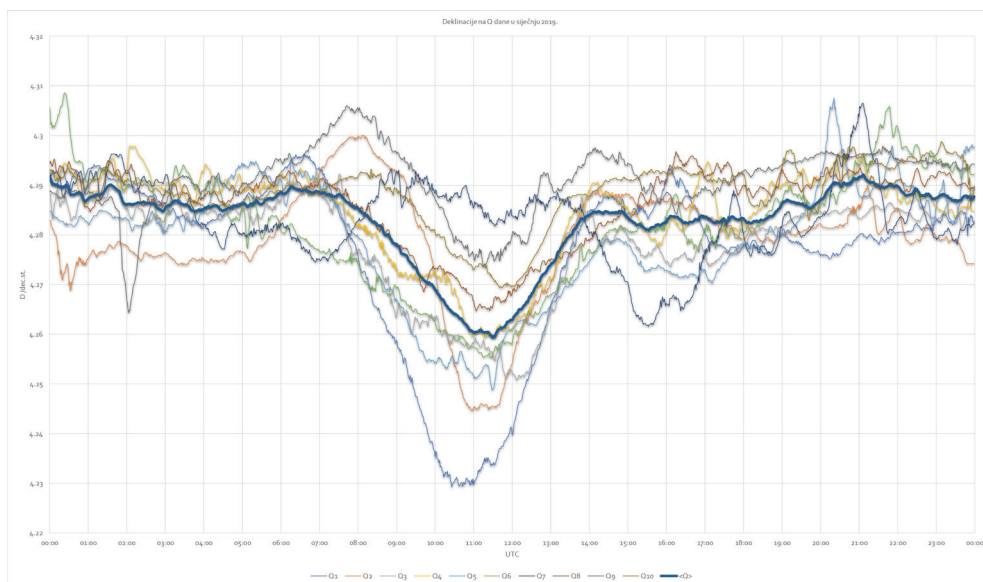
$$\gamma_2 = 1/15 \sin \varphi \cos^4 \varphi (2 - t^{24}) \quad (5)$$

Konvergencija meridijana na području Republike Hrvatske iznosi od  $-2^\circ 21'$  na najzapadnijoj morskoj točki (odnosno  $-1^\circ 55'$  za najzapadniju kopnenu točku) do  $2^\circ 5'$  na najistočnijoj točki. Budući da je popravak kompasa razlika deklinacije i konvergencije meridijana, raspon  $dAz_m$  za 2020,0 iznosi približno  $1,8^\circ - 3,3^\circ$  (od najzapadnijeg do najistočnijeg kopnenog dijela RH), što nije zanemarivo.

## *Model dnevne promjene deklinacije*

U minimumu solarnog ciklusa, i nedostatku dugih vremenskih nizova na LON, kao i dodatnog opservatorija ili variometarskih postaja, te stoga i opsežnijih istraživanja dnevne promjene na teritoriju Hrvatske, pretpostavka

ovog modela dnevne promjene deklinacije je bila da prošlogodišnja dnevna promjena (diurnalna varijacija) može zadovoljavajuće aproksimirati  $dpD$  i u tekućoj, 2020. godini. Dnevna promjena modelirana je iz LON definitivnih podataka za 2019. tako da je svaki mjesec reprezentiran sredinom UTC (Coordinated Universal Time) minuta najmirnijih, Q1 – Q10, dana. Budući da se modeli GI odnose na dnevne srednjake, izvedene jednostavnom redukcijom iz izmjera, ne samo za najmirnijih Q dana, nego ponekad i u trenucima nezanemarive dnevne promjene, u našem slučaju je  $dpD$  definiran razlikom D i dnevnog srednjaka  $\langle Q \rangle$  dana, dobivenog pak osrednjavanjem Q1 – Q10 dana, po minutama, za svaki mjesec. Slika 4 s grafovima Q1 – Q10 i  $\langle Q \rangle$  dana za siječanj 2019. na LON, zorno ilustrira za TGPO važan uvid o promjenjivosti stvarnog polja i za najmirnijih dana: minutnim deklinacijama  $\langle Q \rangle$  dana pripadni maksimalni rasap iznosi  $2,1'$ , pa je za očekivati da se stvaran (ne samo Q) dan može razlikovati od ovako zamišljenog modela za značajni udio u vrijednosti  $dpD$ , kao što ćemo i vidjeti u nastavku.



Slika 4. Dnevni hod deklinacija Q1 – Q10 i  $\langle Q \rangle$  dana na LON za siječanj 2019.

Spektralnom Fast Fourier Transform analizom  $dpD$  određeni su koeficijenti za harmonike s 24-, 12-, 8- i 6- satnim periodom (slično kao npr. Yamazaki et al. 2011). Time je model  $dpD_{2019}$  definiran koeficijentima (Tablica 1) i sljedećim razvojem dnevne promjene deklinacije:

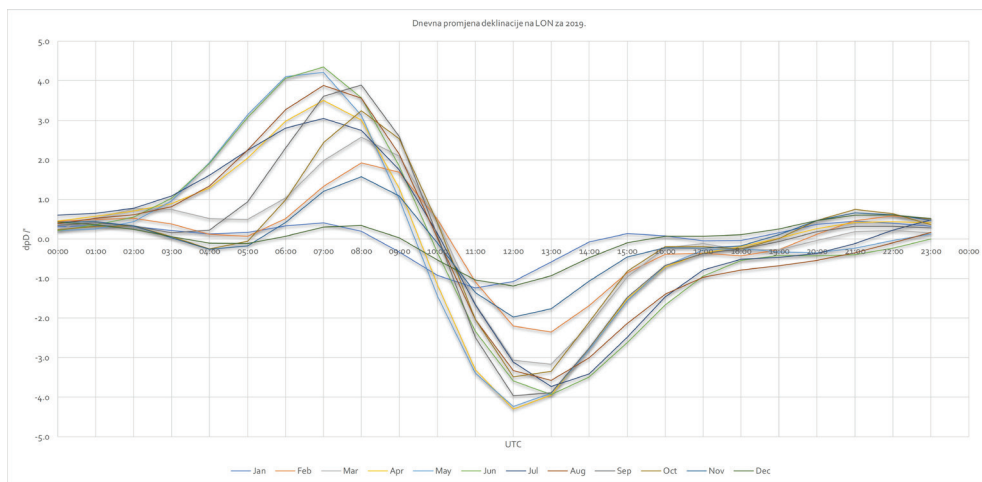
$$dpD = \sum_{i=1}^4 [a_n \cos(2\pi n t/1440) + b_n \sin(2\pi n t/1440)]. \quad (6)$$

Tablica 1. Koeficijenti modela  $dpD_{2019}$  po mjesecima 2019.

2019.	a1	a2	a3	a4	b1	b2	b3	b4
Siječanj	0,50	-0,26	0,19	-0,12	-0,04	0,06	-0,22	0,16
Veljača	0,67	-0,47	0,66	-0,42	0,66	-0,65	0,19	0,02
Ožujak	0,79	-0,90	0,87	-0,51	0,96	-0,61	0,30	0,03
Travanj	1,47	-1,66	0,91	-0,26	1,36	-0,56	-0,23	0,20
Svibanj	1,35	-1,97	0,88	-0,04	1,75	-0,33	-0,43	0,09
Lipanj	1,21	-1,73	0,70	0,04	2,19	-0,74	-0,12	0,08
Srpanj	1,24	-1,20	0,63	-0,06	1,78	-0,74	0,12	-0,11
Kolovoz	1,02	-1,36	0,85	-0,11	1,97	-0,77	-0,06	0,11
Rujan	0,97	-1,42	1,19	-0,39	1,32	-1,05	0,03	0,25
Listopad	0,77	-1,00	1,09	-0,63	0,78	-1,00	0,15	0,20
Studeni	0,61	-0,45	0,59	-0,32	0,31	-0,54	0,01	0,19
Prosinac	0,53	-0,23	0,28	-0,15	-0,08	-0,16	-0,07	0,08

Na temelju koeficijenata modela rekonstruirane su 24 satne vrijednosti  $dpD$  za svaki mjesec 2019. godine (slika 5). Spektralna analiza gladi  $\langle Q \rangle$  dan i time unosi odstupanje u odnosu na  $\langle Q \rangle$  dan manje od 0,2' do 0,5' po pojedinim

mjesecima u godini, što nije zanemarivo. Procjenjujemo stoga da pouzdanost  $dpD_{2019}$  iznosi  $2,6'$ . Ekstremi modelirane dnevne promjene za 2019. god. dani su s min. i maks.  $-1,2'$  te  $0,5'$  u siječnju, odnosno  $-3,9'$  i  $4,3'$  u lipnju, što je očekivani sezonski hod na umjerenim širinama sjeverne hemisfere. Ponavljamo, model  $dpD_{2019}$  zapravo se odnosi na LON, ali u modelu radnog popravka kompasa primijenit ćemo ga za cijeli teritorij Hrvatske. Pritom će se  $dpD$  računati za dan u godini, te sat i minutu u danu, budući da je pri TGPO važno učinkovito odrediti  $dAzmr$  ne samo za proizvoljni položaj već i trenutak. Iz modela  $dpD_{2019}$  slijedi još jedan izvorni doprinos ovome radu – Tablica 2. U njoj se upućuje na nužnost ažuriranja tablice u pogledu „popravka kompasa zbog dnevnih promjena“ (MORH 1996). Korištenjem modela ( $dpD_{2019}$  odnosno  $dAzmr_{2020}$ ) parametri „diurnalna korekcija za vrijeme određivanja popravka kompasa“ i „popravak zbog razlike u konvergenciji“ (MORH 1996) postaju suvišni. S obzirom na to, uvođenjem modela otvara se mogućnost modernizacije nastave i aktivnosti TGPO-a.

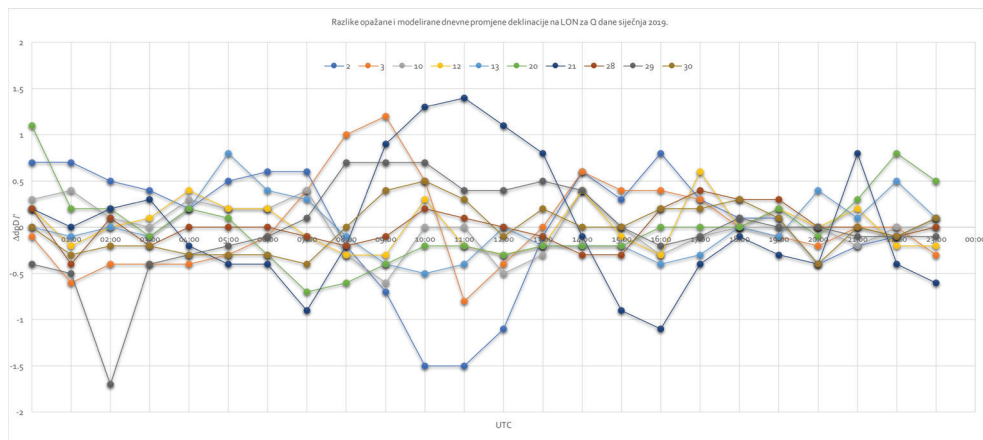


Slika 5. Dnevna promjena deklinacije rekonstruirana za 2019. prema modelu  $dpD_{2019}$ .

Tablica 2. Dnevna promjena prema modelu dpD2019, za LON, po mjesecima 2019.

<i>dpD /'</i>												
UTC	Sij.	Velj.	Ožu.	Tra.	Svi.	Lip.	Srp.	Kol.	Ruj.	Lis.	Stu.	Pro.
00:00	0,3	0,4	0,2	0,5	0,2	0,2	0,6	0,4	0,3	0,2	0,4	0,4
01:00	0,3	0,5	0,5	0,6	0,3	0,4	0,6	0,5	0,4	0,3	0,4	0,4
02:00	0,3	0,5	0,8	0,7	0,4	0,6	0,8	0,6	0,3	0,3	0,3	0,2
03:00	0,2	0,4	0,7	0,9	1	1	1,1	0,8	0,2	0,1	0	0,1
04:00	0,1	0,1	0,5	1,3	1,9	1,9	1,6	1,3	0,2	-0,3	-0,3	-0,1
05:00	0,2	0,1	0,5	2	3,1	3,1	2,2	2,2	0,9	-0,1	-0,2	-0,1
06:00	0,3	0,5	1	3	4,1	4,1	2,8	3,3	2,3	1	0,4	0,1
07:00	0,4	1,3	2	3,5	4,2	4,3	3,1	3,9	3,6	2,4	1,2	0,3
08:00	0,2	1,9	2,6	3	3,1	3,6	2,7	3,6	3,9	3,2	1,6	0,3
09:00	-0,3	1,7	2,1	1,3	1	1,8	1,7	2,1	2,6	2,5	1,1	0
10:00	-0,9	0,5	0,4	-1,2	-1,4	-0,3	0,1	0	0,1	0,4	-0,1	-0,5
11:00	-1,2	-1,1	-1,6	-3,3	-3,4	-2,3	-1,7	-2	-2,5	-2	-1,4	-1
12:00	-1,1	-2,2	-3,1	-4,3	-4,2	-3,6	-3,1	-3,3	-4	-3,5	-2	-1,2
13:00	-0,6	-2,4	-3,2	-4	-3,9	-3,9	-3,7	-3,6	-3,9	-3,3	-1,8	-0,9
14:00	-0,1	-1,7	-2,2	-2,8	-2,8	-3,5	-3,4	-3	-2,8	-2,1	-1,1	-0,5
15:00	0,1	-0,9	-1	-1,5	-1,6	-2,6	-2,5	-2,1	-1,5	-0,8	-0,5	-0,1
16:00	0,1	-0,4	-0,2	-0,7	-0,7	-1,7	-1,5	-1,4	-0,7	-0,2	-0,2	0,1
17:00	-0,1	-0,4	-0,1	-0,4	-0,3	-0,9	-0,8	-1	-0,4	-0,2	-0,2	0,1
18:00	0	-0,4	-0,3	-0,2	-0,2	-0,5	-0,5	-0,8	-0,3	-0,3	-0,2	0,1
19:00	0,2	-0,3	-0,3	0	-0,3	-0,4	-0,5	-0,7	-0,1	0	0,1	0,3
20:00	0,4	0,1	0	0,3	-0,3	-0,4	-0,4	-0,5	0,2	0,5	0,5	0,5
21:00	0,5	0,5	0,2	0,4	-0,2	-0,4	-0,1	-0,3	0,3	0,7	0,7	0,6
22:00	0,4	0,6	0,2	0,4	0	-0,2	0,2	-0,1	0,3	0,6	0,6	0,6
23:00	0,3	0,5	0,2	0,4	0,1	0	0,5	0,2	0,3	0,4	0,5	0,5

Usporedbom stvarnih satnih  $dpD$  za Q1 – Q10 dane siječnja 2019. godine, izvedenih iz LON definitivnih minutnih podataka, dobivene su maksimalne i minimalne razlike od  $1,4'$  odnosno  $-1,7'$ , u odnosu na  $dpD2019$  model (slika 6).



Slika 6. Test modela  $dpD2019$  s opažanim  $dpD$  na LON za Q dane u siječnju 2019.

Pretpostavka modela je bila da prošlogodišnja dnevna promjena može biti prihvatljiva i u 2020. godini. U svrhu njene potvrde provedena je usporedba satnih  $dpD$  izvedenih iz nedefinitivnih (vmin) LON podataka iz siječnja 2020. godine i modela  $dpD2019$ , te su za najmirnije, Q dane dobivene maksimalne i minimalne razlike od  $2,5'$  odnosno  $-2,0'$ , što je blisko procjeni o pouzdanosti  $dpD2019$ . Za dane s najvećim poremećajima (engl. most disturbed days) ekstremi očekivano iznose  $7,2'$  odnosno  $-3,6'$ . Pojave ekstremnih razlika vrlo su rijetke i većina odstupanja stvarne  $dpD$  u odnosu na model iznosi približno  $1'$  za vrijeme mirnih dana (uporabu kompasa za nemirnih dana, već od indeksa  $K > 2$ , ionako moramo izbjegavati, vidi Brkić et al. 2019a). Inicijalni rezultati za  $dpD$  prihvatljivi su, ali su nužna opsežnija testiranja i modeliranja (vidi npr. Yamazaki et al. 2011), odnosno istraživanja.



## Radni popravak kompasa

Dodavanjem  $dpD$  popravku kompasa dobivamo radni popravak kompasa. Za stajalište unutar Hrvatske definirano geodetskim koordinatama na GRS80 elipsoidu te uneseno vrijeme od interesa u UTC-u (u formatu dan - mjesec - sat - minuta u 2020. godini), program  $dAzmr2020$ , uz  $D$  i njenu godišnju promjenu  $gpD$ , računa konvergenciju meridijana  $\gamma$  (u odnosu na HTRS96/TM kartografsku projekciju),  $dpD$  te radni popravak kompasa  $dAzmr$ . Sve te veličine zaokruživanjem na cijele stupnjeve i minute dodatno gube na pouzdanosti  $< 0,5'$ . Pogreška konačnog  $dAzmr$  procjenjuje se  $< 6,7'$  na OGMRH i za epohu 2020,0. Primjena  $dAzmr2020$  programa je pouzdanija i jednostavnija od konvencionalnog određivanja, pa stoga program može, nakon obuhvatnijih testiranja, naći primjenu u okviru nastavnih i operativnih zadataka TGPO. Na slijedećoj slici primjer je računanja deklinacije, godišnje promjene deklinacije, konvergencije meridijana, dnevne promjene deklinacije i radnog popravka kompasa za lokacije aktualne Hrvatske geomagnetske sekularne mreže.

St	Ime	Fi	La			Dan	Mj	God	Sat	Min	D	gpD	Konv	dpD	dAzmr				
BARA	45	50	10	18	46	54	1	1	2020	7	0	4	52	8	1	38	0	3	14
KONA	42	31	57	18	20	7	1	2	2020	8	0	4	18	8	1	14	2	3	5
KRBP	44	40	11	15	37	30	1	3	2020	9	0	4	5	8	0	-37	2	4	44
PALA	42	23	35	16	15	27	1	4	2020	10	0	4	10	8	0	-10	-1	4	19
POKU	45	28	27	15	58	40	1	5	2020	11	0	4	20	8	0	-22	-3	4	39
PONP	45	21	21	13	43	48	1	6	2020	1	0	3	51	9	-1	-58	0	5	50
PUNK	44	39	36	14	28	26	1	7	2020	2	0	4	1	8	-1	-25	1	5	27
RACI	44	51	23	18	57	52	1	8	2020	3	0	4	50	8	1	44	1	3	6
SINP	43	38	59	16	41	1	1	9	2020	4	0	4	8	8	0	8	0	4	1
SVEM	46	32	3	16	21	54	1	12	2020	5	0	4	24	9	0	-6	0	4	30

Slika 7. Primjer rezultata programa  $dAzmr2020$

## Zaključak

Popravak kompasa povezuje magnetski i pravokutni azimut; radni popravak kompasa funkcija je magnetske deklinacije, konvergencije meridijana i dnevne promjene deklinacije tj. lokaliziran je i vrlo promjenjiv u vremenu i prostoru, a sada ga se po prvi put može izračunati i uz pomoć modela. Model radnog popravka kompasa dAzmr2020 omogućuje učinkovito određivanje radnog popravka kompasa u nastavne i operativne svrhe Oružanih snaga Republike Hrvatske, ali potencijalno i šireg spektra korisnika kompasa i karte. Kao nadogradnja projekata obnove geomagnetske informacije i komplementarnih znanstvenih istraživanja, model dAzmr2020 poticaj je na daljnja ulaganja u istraživanja i razvoj. Predstavljeni model sadržava tri cjeline: najnoviji model geomagnetske informacije za 2020. godinu, rutinu za računanje konvergencije meridijana i model dnevne promjene deklinacije za 2019. Radi unapređenja modela radnog popravka kompasa potrebno je modele GI godišnje ažurirati na temelju periodičnih izmjera dijelova OGMRH-a (i ciljanih izmjera LPI-ja), a u računanje konvergencije meridijana uvrstiti i ostale kartografske projekcije (npr. UTM), dok su u modeliranju dnevne promjene poželjna ulaganja u infrastrukturu, istraživanja i razvoj. Model dAzmr2020 može naći primjenu u modernizaciji nastave predmeta TGPO-a na smjeru Topništvo sveučilišnog preddiplomskog studija Vojno inženjerstvo na Hrvatskom vojnom učilištu „Dr. Franjo Tuđman“, kao i općenito u zadaćama topografsko-geodetske pripreme i osiguranja. Budući da se ponavlja pitanje ulaganja u infrastrukturu, istraživanje i razvoj, model radnog popravka kompasa doprinos je i izradi strategije geomagnetske informacije, koja Hrvatskoj nedostaje. Strateško planiranje obnove geomagnetske informacije nužno je i ako bude potrebno nastaviti primjenjivati modele GI za izradu izogona zrakoplovnih vojnih zemljovida JOG (engl. *Joint Operations Graphic*) i LFC (engl. *Low Flying Chart*) ili pak proširiti tu primjenu na ostale aplikacije i proizvode NATO standarda AGeoP-24 (§1.1, točka 3 te §1.3, točka 9).

**Lista oznaka**

$D$	magnetska deklinacija	[°]
$dAz_m$	popravak kompasa	[°]
$dAz_{mr}$	radni popravak kompasa	[°]
$dpD$	dnevna promjena deklinacije	[°/dan]
$gpD$	godišnja promjena deklinacije	[°/god.]

**Grčka slova**

$\varphi$	geodetska širina	[°]
$\lambda$	geodetska dužina	[°]
$\gamma$	konvergencija meridijana	[°]

## Literatura

Blaha, M., Šilinger, K. 2014. Task formation commander's operation order for fire support. *Applied Mathematics, Computational Science and Engineering*. 380–388.

Blaha, M., Šilinger, K., Prikryl, B. 2017. Topographical-Geodetic Data for Tactical and Technical Control of Artillery Fire. U: *2017 European Conference on Electrical Engineering and Computer Science (EECS)*. 28–32.

British Geological Survey. [http://www.geomag.bgs.ac.uk/data\\_service/data/annual\\_means.shtml](http://www.geomag.bgs.ac.uk/data_service/data/annual_means.shtml) (pristupljeno 13. veljače 2020.).

Brkić, M. (2019) Monitoring Geomagnetic Information in the Territory of Croatia. *Geofizika*. 36 (2019), 1-15.

Brkić, M., Grgić, M., Varga, M., Pavasović, M., Radović, N., Tutek, Ž., Bjelotomić Oršulić, O., Markovinović, D., Viher, M. 2019a. Geomagnetska informacija i NIPP Republike Hrvatske. U: *Zborniku radova Dani IPP-a 2019.*, Ljerka, M., Ciceli, T., Gašparović, I., Rodin, T. (ur.), Republika Hrvatska – Državna geodetska uprava, Zagreb. 38–40.

Brkić, M., Pavasović, M., Varga, M., Grgić, M., Budić, J., Vušković, V., Premužić, M. 2019b. Projekt II. ciklusa obnove geomagnetske informacije Republike Hrvatske – 3. faza – tehničko izvješće. *Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu*, Zagreb.

Brkić, M., Vujić, E., Radović, N., Matika, D., Bašić, T. 2017. Geomagnetic Information Risk Revisited: a case study of Croatia. *CODATA-Germany Lecture Notes in Information Sciences Vol. 8, Risk Information Management, Risk Models and Applications, Selected Papers*, Kremers, H., Susini, A. (ur.). 31–38.

Brkić, M., Vujić E., Šugar D., Jungwirth E., Markovinović D., Rezo M., Pavasović M., Bjelotomić O., Šljivarić M., Varga M., Poslončec-Petrić V. 2013. Osnovna geomagnetska mreža Republike Hrvatske 2004. - 2012., s kartama geomagnetskog polja za epohu 2009.5, Brkić, M. (ur.). *Državna geodetska uprava*, Zagreb.

Dominici G., Meloni A., Carroccio M., Maseroli R., Sperti M. 2017. Italian magnetic network and Geomagnetic Field Maps at year 2015.0. *Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia i Istituto Geografico Militare, Firenca, Italija.*

Frančula, N. 2004. Kartografske projekcije, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.

Goldenberg, F. 2006. Geomagnetic navigation beyond the magnetic compass. U: *2006 IEEE/ION Position, Location, And Navigation Symposium, 25.-27.4.2006., San Diego, SAD.* 684-694.

Grgić, M., Brkić, M., Varga, M., Budić J. 2019. Activities on the 2nd Cycle of Geomagnetic Information Renewal in Croatia. U: *EPOS TCS Geomagnetic Observations meeting with Users and Providers, 18.-19.6.2019., Prag, Češka.*

INTERMAGNET - the global network of magnetic observatories monitoring the Earth's magnetic field. <https://www.intermagnet.org/index-eng.php> (pristupljeno 13. veljače 2020.).

International Geomagnetic Reference Field, International association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA). <https://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html> (pristupljeno 3. veljače 2020.).

McKenney, J. E. (2007) *The organizational history of field artillery 1775-2003.* Government Printing Office. Washington, SAD.

MORH. 1996. *Topografsko-geodetska priprema u topništvu.* Ministarstvo obrane Republike Hrvatske, Zagreb.

NATO standard *STANAG 7172 Use of Geomagnetic Models.* 3. izdanje, ožujak 2017.

NATO standard *AGeop-24 Use of Geomagnetic Models.* Izdanje A, inačica 1, ožujak 2017.

U.S. Marine Corps (1999) *Tactics, Techniques, and Procedures for the Field Artillery Manual Cannon Gunnery.* Washington, SAD.

WMM2020. <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/> (pristupljeno 13. veljače 2020.).

Yamazaki, Y., Yumoto, K., Cardinal, M. G., Fraser, B. J., Hattori, P., Kakinami, Y., Liu, J. Y., Lynn, K. J. W., Marshall, R., McNamara, D., Nagatsuma, T., Nikiforov, V. M., Otadoy, R. E., Ruhimat, M., Shevtsov, B. M., Shiokawa, K., Abe, S., Uozumi, T., Yoshikawa, A. 2011. An empirical model of the quiet daily geomagnetic field variation 2011. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 116, A10, 0148–0227.

## O autorima

**Mario Brkić** diplomirao je 1989. i magistrirao 1994. na smjeru geofizika, a doktorirao na polju fizika 2001. na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Odlikovan je Spomenicom Domovinskog rata 1990–1992. Od 1995. do 2002. zaposlen je u MORH-u kao DVO. Odlukom Predsjednika Republike 2001. godine unaprijeđen je u čin natporučnika geodetske struke. Na Geodetskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu vodio je projekte I. COGIRH za MORH i DGU i znanstveni projekt Joint Croatian-Hungarian Geomagnetic Repeat Station Survey and Joint Geomagnetic Field Model za MZOS. U studijske programe geodezije i geoinformatike uveo je predmete iz geomagnetizma. Od 2018. u trajnom je zvanju redovitog profesora u području tehničke znanosti, polja geodezija, grane geomatika na Katedri za matematiku i fiziku Zavoda za geomatiku na Geodetskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Voditelj je projekata II. COGIRH za MORH i DGU te internog znanstvenog projekta Praćenje geomagnetske informacije.

**Matej Varga** diplomirao je geodeziju i geoinformatiku na Geodetskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, a od 2012. radi na Katedri za državnu izmjeru kao suradnik u nastavi i poslijedoktorand. Njegovi su glavni znanstveni interesi izmjera i modeliranje gravitacijskog i geomagnetskog polja, geodetski referentni sustavi, GNSS i transformacije te geometrijska geodezija. Sudjelovao je u domaćim i međunarodnim znanstvenim projektima, kao što su npr. I.COIRH, GEOMED-2 i Geopotencijal i geodinamika Jadrana. Suradnik je i istraživač u projektima II.COIRH i projektu Praćenje geomagnetske informacije.

**Marijan Grgić** poslijedoktorand je i znanstveni suradnik na Geodetskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Njegov znanstveno-istraživački, nastavni i stručni rad pripada znanstvenom polju primijenjene pomorske, satelitske i fizikalne geodezije, a posebno je usmjeren na praćenje promjene srednje razine mora prouzročene klimatskim i drugim promjenama te njezina utjecaja na obalu primjenom satelitske radarske i laserske altimetrije, kao i terestričkih geodetskih opažanja. Suradnik je i istraživač u projektima II. COGIRH i projektu Praćenje geomagnetske informacije.

**Nikol Radović** diplomirala je na Matematičkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, na smjeru Geometrija i topologija, profil profesor matematike. Godine 1997. magistrirala je na Matematičkom odsjeku PMF-a s temom *Reed – Müllerovi kodovi*. Radi kao viša predavačica na Katedri za matematiku i fiziku Zavoda za geomatiku Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Njezino je područje znanstvenog i stručnog interesa primjena matematike u drugim znanostima, kao što su kemija, kristolografija, fizika, geodezija i geomagnetizam. Sudjelovala je u projektima I.COIRH i JCHGRSSM, a suradnica je i u projektima II.COIRH i Praćenje geomagnetske informacije. Suautorica je udžbenika iz matematike i knjiga *Nacrtna geometrija – Perspektiva – Mongeov postupak – Aksonometrija, Geometrija prirode i The Geometry of Nature*.

**Tomislav Bašić** diplomirao je na Geodetskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu 1980. godine, a doktorirao 1989. godine na Fakultetu za građevinu i geodeziju Leibniz Sveučilišta u Hannoveru, Njemačka. U 1990./91. bio je na postdoktorskom usavršavanju u Odjelu za geodetske znanosti i mjerništvo Državnog sveučilišta Ohio, Columbus, SAD. Područje istraživanja i edukacije, kojima se bavi već gotovo 40 godina, jesu fizikalna geodezija, geofizička geodezija, geodetski referentni okviri te državna izmjera, za što je 2020. dobio Državnu nagradu za znanost, koju dodjeljuje Sabor Republike Hrvatske. Pokretač je obnove geomagnetizma u Hrvatskoj. Na studiju Vojno inženjerstvo, smjer Topništvo, Hrvatskog vojnog učilišta „Dr. Franjo Tuđman” nositelj je predmeta Topografsko geodetska priprema i osiguranje od njegova osnutka, gdje i dalje drži predavanja i seminare.