

UDK 550.38(497.5):537.67:528.02
Pregledni znanstveni članak

Hrvatsko geomagnetsko normalno referentno polje 2004,5

Mario BRKIĆ¹, Danijel ŠUGAR² – Zagreb

SAŽETAK. Predstavljani su rezultati prve izmjere deklinacije, inklinacije i totalnog intenziteta, izvedene u ljeto 2004. godine na Hrvatskoj geomagnetskoj sekularnoj mreži. Opisani su mjerni postupci, korišteni instrumentarij te redukcija mjerenja na epohu 2004,5. Hrvatsko geomagnetsko normalno referentno polje za 2004,5 definirano je koeficijentima polinoma drugog reda po latitudi i longitudi. Model normalnog polja pokazao je znatne razlike u odnosu na globalni model DGRF. S pomoću Mokrovićevih podataka iz 1928. godine procijenjena je sekularna varijacija na teritoriju Hrvatske.

Ključne riječi: geomagnetska sekularna mreža, geomagnetska izmjera, geomagnetsko normalno referentno polje.

1. Uvod

Sve do nedavno posljednje javno dostupne informacije o geomagnetskom polju gotovo cijelokupnog teritorija Hrvatske pružio je Mokrović proračunom geomagnetskih elemenata za epohu 1927,5 (Mokrović 1928). Pokretanje suvremene geomagnetske izmjere vezano je uz uspostavu Hrvatske Geomagnetske Sekularne Mreže (HGSM) 2004. godine (Brkić i dr. 2006), koju izvodi Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu za potrebe Državne geodetske uprave Republike Hrvatske.

2. Geomagnetska izmjera 2004. godine

Izmjera geomagnetske deklinacije D , inklinacije I i totalnog intenziteta F započela je u lipnju 2004. godine na sekularnoj točki POKUpsko usporedbom mađarskog i hrvatskog DIM-a – magnetometra za opažanje deklinacije i inklinacije. Hrvatski

¹ Prof. dr. sc. Mario Brkić, Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet, Kačićeva 26, 10000 Zagreb.

² Mr. sc. Danijel Šugar, dipl. ing., Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet, Kačićeva 26, 10000 Zagreb.

DIM rabljen za apsolutna opažanja D i I je Bartingtonov D/I MAG01H fluxgate sa sondom MAG Probe A i nemagnetičnim optičkim teodolitom Zeiss 010B, te nemagnetičnim stativom. Rezolucija fluxgate magnetometra je 0,1 nT, dok je podatak teodolita 1 lučna sekunda, očitavanje koje je omogućeno optičkim mikrometrom s koincidencijom dijametralno suprotnih crtica limba. Opažanje F izvedeno je uz pomoć Protonsko Precesijskog Magnetometra (PPM) GEMSys GSM-19G Overhauser, rezolucije 0,01 nT. Ni kod jednog od tih instrumenata nisu primijećeni problemi u njihovu radu.

Uspostavi sekularne i pomoćne točke prethodila je vizualna i gradiometrijska provjera okoliša točaka zbog mogućih izvora kontaminacije. Uobičajeno su postavljane tri geomagnetske orijentacijske točke na udaljenostima ne manjima od nekoliko stotina metara od sekularne točke. Pomoćna se točka postavljala na 7 metara od sekularne točke. Koordinate sekularnih i geomagnetskih orijentacijskih točaka određene su metodom GPS relativnoga statičkog pozicioniranja korištenjem prijamnika Trimble 4000 SSI. Dobivena je točnost bolja od dva cm, što je omogućilo pouzdano računanje elipsoidnih azimuta. Dobivene položajne koordinate sekularnih točaka širine φ i dužine λ na Besselovu elipsoidu prikazane su u tablici 1.

Svaki niz opažanja D i I proveden je s pomoću nul-metode, pri čemu se vodilo pritom računa o osobnoj magnetskoj higijeni opažaća. Azimuti su prema orijentacijskim točkama provjeravani prije i nakon svakog niza opažanja D i I . Istodobno se je na pomoćnoj točki izvodilo kontinuirano opažanje totalnog intenziteta F . Pojedina očitavanja kao i odgovarajuće srednje vrijednosti D , I i F računane su i pohranjene na računalu, ali i u obliku zapisnika na papiru. Na svakoj sekularnoj točki obavljena su najmanje tri niza opažanja D i I , i to rano ujutro i/ili navečer tijekom jednog ili dva dana. Sva su opažanja, dakako, obavljena na (približno) jednakoj visini. Tijekom izmjere svakodnevno je prije i nakon samih opažanja motrena vrijednost indeksa K_p . Mjerna kampanja okončana je u rujnu 2004. godine, a završna usporedba instrumenata izvedena je na geomagnetskom opservatoriju Belsk (Poljska) u travnju 2005.

3. Redukcija na epohu 2004,5

U svrhu eliminacije tranzientnih vremenskih varijacija, opažano geomagnetsko polje reducirano je na epohu 2004,5 s pomoću definitivnih podataka bliskih INTERMAGNET-ovih opservatorija Fuerstenfeldbruck (FUR), Tihany (THY) i L'Aquila (AQU).

Geomagnetski element na sekularnoj točki reduciran na epohu (npr. godišnji srednjak) slijedi iz pretpostavke jednakosti dnevne varijacije na sekularnoj točki i na opservatoriju,

$$E_{SV}^{epoha} = E_{OPS}^{epoha} + (E_{SV}^t - E_{OPS}^t), \quad (1)$$

gdje je:

E_{OPS}^{epoha} element na opservatoriju OPS i epohi (opservatorijski godišnji srednjak),

E_{SV}^t element opažan na sekularnoj točki SV u trenutku t , a

E_{OPS}^t element opažan na opservatoriju u istom trenutku.

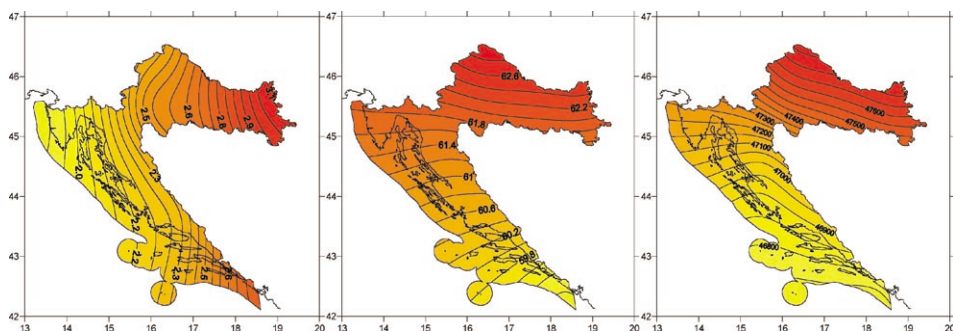
Taj jednostavni model redukcije zadovoljava u slučajevima kada su referentni opservatorij i reducirana sekularna točka dovoljno blizu, kada su razlike u električnoj vodljivosti između tih lokacija (te time inducirani dijelovi polja) male, kada su geomagnetska i diurnalna aktivnost male, te kada je vremenska razlika $t - epoha$ također mala (vidi npr. Rasson i Delipetrov 2006).

Svi nizovi opažanja za svaku pojedinu sekularnu točku reducirani su na prije navedene opservatorije te su izračunane srednje vrijednosti. Konačne vrijednosti geomagnetskih elemenata, zajedno s rasapom, odnose se na sva tri referentna opservatorija i epohu 2004,5, vidi tablicu 1 odnosno sliku 1. Kao i u (Brkić i Šugar 2007), kao mjera pouzdanosti uporabljen je rasap (eng. *scatter*), definiran kao veći od modula razlika maksimuma odnosno minimuma od sredine, sukladno važećem formatu podataka Magnetic Network in Europe (MagNetE) (*ibid.*).

Procijenjena ukupna pogreška cijele mreže iskazana prosječnim rasapom iznosi 0,5' za D , 0,2' za I te 2,7' za F . Mali rasapi geomagnetskih elemenata usporedivi su s tipičnim pogreškama suvremenih geomagnetskih izmjera (Newitt i dr. 1996), te upućuju na prihvatljivu kvalitetu izmjere i redukcije.

Tablica 1. Izmjera D - I - F reducirana na FUR , THY i AQU i epohu 2004,5.

Sekularna točka	φ [st.]	λ [st.]	h [m]	D [st.]	Rasap D [st.]	I [st.]	Rasap I [st.]	F [nT]	Rasap F [nT]
POKU	45,4733	15,9833	105	2,485	0,012	62,013	0,003	47434,8	5,0
MEDJ	46,4839	16,3317	199	2,403	0,001	62,931	0,003	47755,2	2,3
BARA	45,8364	18,7869	86	3,046	0,007	62,521	0,001	47738,8	1,8
RACI	44,8564	18,9694	81	2,959	0,013	61,536	0,005	47454,2	5,2
KONA	42,5322	18,3403	47	2,716	0,009	59,259	0,003	46770,0	1,7
SINP	43,6494	16,6886	296	2,302	0,014	60,479	0,002	46922,9	2,8
KRBP	44,6697	15,6300	648	2,270	0,004	61,240	0,001	47039,7	2,0
PONP	45,3561	13,7347	5	1,924	0,006	61,773	0,002	47221,5	0,7



Slika 1. Reducirana deklinacija, inklinacija i totalni intenzitet za epohu 2004,5.

Budući da se normalno polje odnosi na razinu mora, totalni intenzitet F na visini h dodatno je korigiran dodavanjem

$$\Delta F = \frac{3Fh}{R}, \quad (2)$$

pri čem se pretpostavlja dipolarni doprinos modela sferne Zemlje polumjera $R = 6371,2$ km (vidi npr. Meloni i dr. 1994).

4. Hrvatsko geomagnetsko normalno referentno polje za 2004,5

Analitički geomagnetski model za područje neznatne zakrivljenosti može se reprezentirati polinomom po geodetskoj širini i dužini. Pri tom se doprinosi kore iz reduciranih opažanja eliminiraju rezanjem polinoma u drugom redu. Iako rezultirajuće normalno polje uključuje i doprinose donje kore, ono je vrlo slično glavnom polju Zemljine jezgre pa se stoga koristi u istraživanju duboke Zemljine unutrašnjosti te kao referentno polje u istraživanju lokalnih magnetskih anomalija (vidi npr. Kovács i Kőrmendi 1999 ili Meloni i dr. 1994 ili Brkić i dr. 2007). Normalno referentno polje teritorija Hrvatske određeno je geomagnetskim elementima E , tako da je

$$E = a_0 + a_1(\varphi - \varphi_0) + a_2(\lambda - \lambda_0) + a_3(\varphi - \varphi_0)^2 + a_4(\varphi - \varphi_0)(\lambda - \lambda_0) + a_5(\lambda - \lambda_0)^2, \quad (3)$$

gdje su φ i λ širina i dužina, φ_0 i λ_0 su koordinate neke središnje referentne točke (u našem slučaju to je sekularna točka POKU). Ovdje su koeficijenti a_0, \dots, a_5 nepoznanice koje treba odrediti iz N reduciranih mjerenja E_i s pomoću metode najmanjih kvadrata tako da je ispunjen uvjet:

$$\sum_{i=1}^N [E_i(\varphi_i, \lambda_i) - E(\varphi_i, \lambda_i, a)]^2 = \min. \quad (4)$$

Poradi minimizacije mogućih rubnih efekata pri proračunu normalnog polja, reduciranim mjerenjima dodani su godišnji srednjaci opservatorija THY, FUR i AQU za epohu 2004,5.

Za provjeru moguće kontaminacije, u točkama na anomalnim područjima, uporabljen je Chauvenetov kriterij, koji daje procjenu standardne nesigurnosti

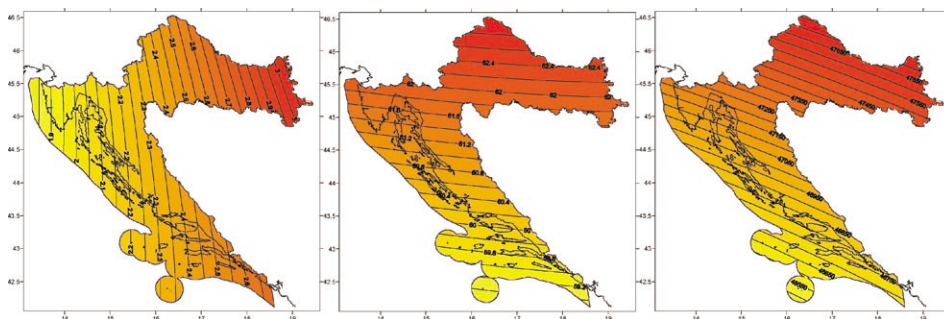
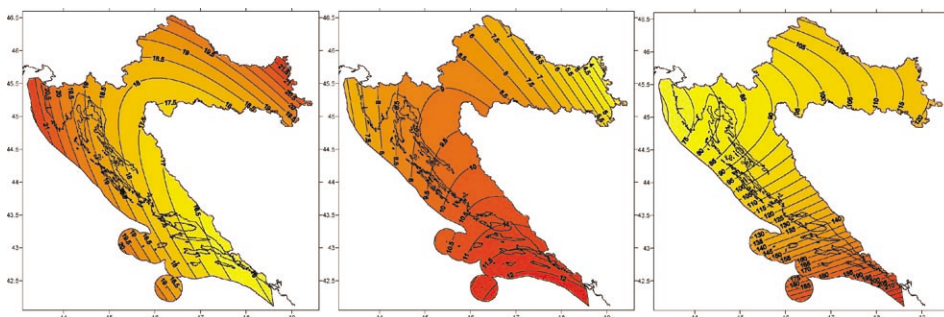
$$\sigma = \sqrt{\nu/(n-6)}, \quad (5)$$

gdje je ν zbroj kvadrata razlika između vrijednosti opažanog i normalnog polja, n broj točaka, a 6 broj traženih koeficijenata (vidi npr. Kovács i Kőrmendi 1999). U našem slučaju sve točke imaju odstupanja manja od 2σ , te stoga ni jedna točka nije odbačena.

Tablica 2. donosi koeficijente Hrvatskoga Geomagnetskog Normalnog Referentnog Polja (HGMRP) za deklinaciju, inklinaciju i totalni intenzitet epohe 2004,5. Normalna polja D , I i F prikazana su na slici 3.

Tablica 2. Koeficijenti HGMRP za 2004,5.

E	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
D (°)	2,36	0,000972	0,003605	0,000003	0,000001	0,000006
I (°)	62,05	0,015582	0,000890	-0,000005	-0,000002	-0,000003
F (nT)	47396,17	5,147779	1,321561	0,001839	0,000292	-0,000855

Slika 2. HGMRP2004,5 za D [dec.st.], I [dec.st.] i F [nT].Slika 3. HGMRP2004,5 – DGRF2004,5 za D [dec.min.], I [dec.min.] i F [nT].

Usporedbom HGMRP i globalnoga modela Definitive Geomagnetic Reference Field (DGRF) za epohu 2004,5 (slika 3) pronađene su značajne maksimalne razlike, koje iznose $18,7'$ za deklinaciju, $11,7'$ za inklinaciju i $204,7$ nT za totalni intenzitet. Osim dobro poznatih razlika u prirodi normalnog i glavnog polja, ovdje valja istaknuti da podaci izmjere 2004. godine nisu uključeni u DGRF.

5. Sekularna varijacija između 1927,5 i 2004,5

Sekularna varijacija grubo je procijenjena korištenjem reduciranih podataka izmjere 2004. godine i Mokrovićevih podataka iz 1928. godine. Može se uočiti da povijesni podaci objedinjuju izmjere različitih geomagnetskih elemenata od 1806. do 1918. godine te da su nastali uporabom različitih tehnika mjerenja, instrumentarija

kao i uvjeta mjerenja. Dodatnu nesigurnost u podatke unosi nepoznavanje visine točaka u kojima su izvođene izmjere, zbog čega nije određivana korekcija za visinu. Geomagnetsko polje za epohu 1927,5 interpolirano je uz pomoć metode Radial Basis Function (RBF interpolacija programa Surfer) u točkama HGSM. Razlike pronađene u odnosu na geomagnetsko polje za epohu 2004,5 prikazuje tablica 3.

Tablica 3. *Razlike geomagnetskog polja 2004,5 – 1927,5.*

Sekularna točka	ΔD [dec. st.]	ΔI [dec. st.]	ΔF [nT]
POKU	7,0	1,3	2899
MEDJ	7,1	1,6	3073
BARA	6,2	1,9	3344
RACI	6,4	1,8	3068
KONA	6,4	0,6	2526
SINP	7,1	1,1	2763
KRBP	7,3	1,1	2710
PONP	7,2	1,0	3087

Pronađena prosječna promjena geomagnetskog polja na teritoriju Hrvatske u 77-godišnjem razdoblju između 1927,5 i 2004,5 iznosila je približno +5'/god. za deklinaciju, +1'/god. za inklinaciju, te + 38 nT/god. za totalni intenzitet.

6. Zaključak

Poradi potpunije procjene kvalitete geomagnetske izmjere, preporuča se redukciju podataka izvoditi ne samo s obzirom na svaki, već i na sve bliske geomagnetske opservatorije. Iako su rezultati dobiveni iz prve izmjere sekularne mreže iz 2004. godine zadovoljavajući, poboljšanja se mogu očekivati uključanjem prijenosnog variometra (I, nadamo se, budućega nacionalnoga geomagnetskog opservatorija) u izmjeru odnosno njezinu redukciju. Osim toga, budući da je teritorij Hrvatske geološki vrlo kompleksan, nužno je uspostaviti mnogo gušću geomagnetsku mrežu, koja će omogućiti detaljnije kartiranje polja te time potvrditi prikladnost položaja postojećih sekularnih točaka, kao i poboljšati modeliranje normalnog polja. Modeli normalnog polja općenito su pouzdaniji od globalnih modela IGRF, uz pretpostavku redovitih i čestih terestričkih izmjera.

Prema tomu, periodična i poželjno dvogodišnja izmjera na točkama HGSM temeljni je preduvjet dobivanja boljeg uvida u geomagnetsko polje i njegovu promjenu na prostoru Hrvatske.

ZAHVALA. Autori se zahvaljuju Državnoj geodetskoj upravi Republike Hrvatske na projektu "Osnovna geomagnetska mreža Republike Hrvatske – za potrebe službene kartografije – I. faza", te INTERMAGNET-u na opservatorijskim podacima.

Literatura

- Brkić, M., Šugar, D. (2007): The 2004 geomagnetic repeat station survey of Croatia – A National Report, poster, 3rd MagNetE Workshop on European Geomagnetic Repeat Station Survey 2005 – 2006, Bucharest, 14–16 May 2007.
- Brkić, M., Šugar, D., Peti, I. (2007): Croatian geomagnetic repeat stations survey of 2004, poster presentation, Session MPRG08 (Magnetic field observation: where have we been and where are we going?), EGU General Assembly 2007.
- Brkić, M., Šugar, D., Rezo, M., Markovinović, D., Bašić, T. (2006): Croatian Geomagnetic Repeat Stations Network, “Geomagnetics for Aeronautical Safety: A Case Study in and around the Balkans”, NATO Security through Science Series, Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on New Data for the Magnetic Field in the former Yugoslav Republic of Macedonia for Enhanced Flying and Airport Safety, Ohrid, 18–22 May 2005, Springer.
- Kovács, P., Körmendi, A. (1999): Geomagnetic Repeat Station Survey in Hungary during 1994–1995 and the Secular Variation of the Field between 1950 and 1995, *Geophysical Transactions*, 42, 3–4, pp. 107–132.
- Meloni, A., Battelli, O., De Santis, A., Dominici, G. (1994): The 1990.0 magnetic repeat station survey and normal reference fields for Italy, *Annali Di Geofisica*, Vol. XXXVII, N. 5.
- Mokrović, J. (1928): Razdioba glavnih elemenata zemaljskoga magnetizma u Kraljevini Srba, Hrvata i Slovenaca, *Rad Geofizičkog zavoda u Zagrebu*, 3–14, Zagreb.
- Newitt, L. R., Barton, C. E., Bitterly, J. (1996): *Guide for Magnetic Repeat Station Surveys*, IAGA, Boulder, USA.
- Rasson, J. L., Delipetrov, M. (2006): Repeat surveys of Macedonia, “Geomagnetics for Aeronautical Safety: A Case Study in and around the Balkans”, NATO Security through Science Series, Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on New Data for the Magnetic Field in the former Yugoslav Republic of Macedonia for Enhanced Flying and Airport Safety, Ohrid, 18–22 May 2005, Springer.

Croatian Geomagnetic Normal Reference Field of 2004.5

ABSTRACT. The results of the first declination, inclination and total intensity survey of the Croatian Geomagnetic Repeat Stations Network that took place in the summer of 2004 are presented. The applied measurement procedures, the instruments used, as well as the reduction of measurements to the epoch of 2004.5 are described. The Croatian Normal Reference Field of the 2004.5 is represented by means of the coefficients of the second order polynomial in latitude and longitude. Normal field model showed a significant differences in respect to global DGRF. The secular variation of the Croatian territory was estimated with the help of Mokrović's 1928. data.

Key words: geomagnetic repeat station network, geomagnetic survey, geomagnetic normal reference field.

Prihvaćeno: 2008-02-25