

UDK 550.384.3(497.5):537.67:528.024.8

Izvorni znanstveni članak

# Sekularna varijacija geomagnetskog polja na teritoriju Hrvatske

Mario BRKIĆ<sup>1</sup>, Eugen VUJIĆ<sup>2</sup> – Zagreb

*SAŽETAK.* Prikazana je redukcija izmjera geomagnetske deklinacije, inklinacije i totalnog intenziteta izvedenih na Hrvatskoj geomagnetskoj sekularnoj mreži u 2004. i 2007. godini. Određeno je Hrvatsko geomagnetsko normalno referentno polje za epohu 2007,5. Izračunata je sekularna varijacija geomagnetskog polja za teritorij Republike Hrvatske u razdoblju 2004,5 – 2007,5.

*Ključne riječi:* geomagnetska sekularna mreža, redukcija geomagnetske izmjere, geomagnetsko normalno referentno polje, sekularna varijacija geomagnetskog polja.

## 1. Uvod

Sekularna varijacija normalnog magnetskog polja Zemlje njegova je dugodobna i nepredvidiva promjena. Normalno polje je Zemljino magnetsko polje Zemlje bez doprinosa vanjskog polja (proizvedeno magnetosferskim i ionosferskim električnim strujama) i njegovih efekata induciranih u litosferi. Sekularna varijacija definira se kao prva vremenska derivacija normalnog polja, ali je obično izražena razlikama opservatorijskih srednjih godišnjih vrijednosti geomagnetskog elementa – npr. deklinacije, inklinacije ili totalnog intenziteta. Ona uključuje i efekte promjenjive magnetizacije koje glavno polje (polje tekuće jezgre) inducira u litosferi (Newitt *et al.* 1996).

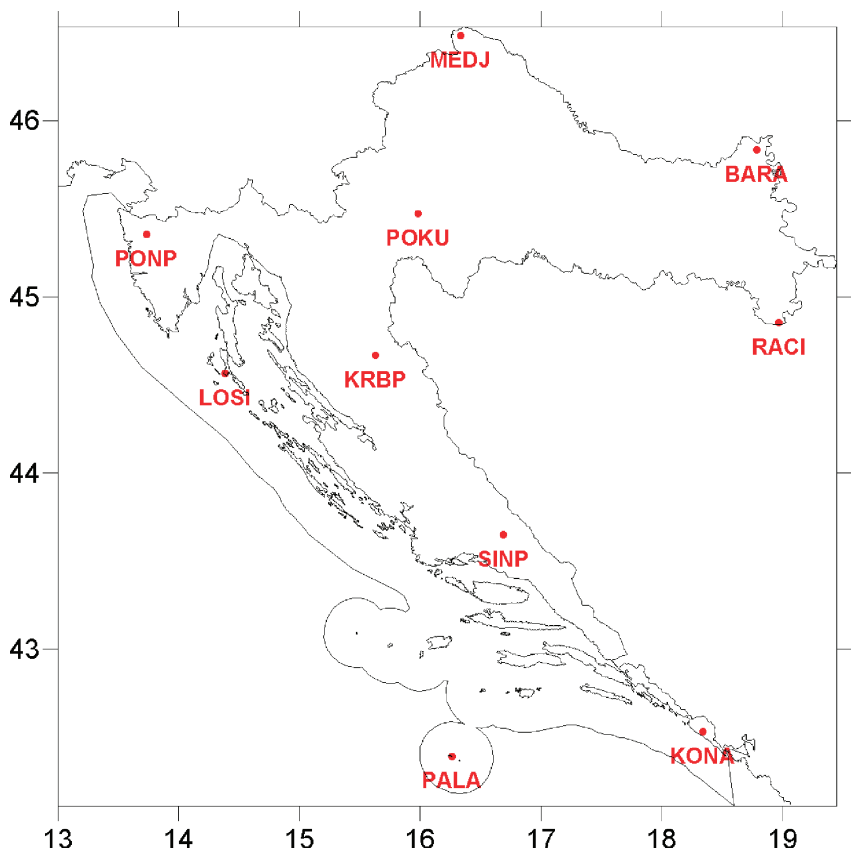
U nedostatku nacionalnoga geomagnetskog opservatorija, ali i poradi prostorne promjenjivosti Zemljina magnetskog polja i njegove sekularne varijacije, prvi korak u određivanju sekularne varijacije je terenska izmjera geomagnetskih elementa na mreži sekularnih točaka (engl. *repeat stations network*). Rezultati geomagnetske izmjere svode se vremenskom redukcijom na jedinstvenu epohu,

<sup>1</sup> prof. dr. sc. Mario Brkić, Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet, Kačićeva 26, 10000 Zagreb,

<sup>2</sup> Eugen Vujić, dipl. ing., Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, Geofizički odsjek, Horvatovac 95, 10000 Zagreb.

uobičajeno sredinu godine. Normalno polje može se dalje odrediti izradom lokalnog modela iz reduciranih vrijednosti geomagnetskih elemenata fitanjem Taylorova polinoma po geodetskoj širini i dužini (vidi npr. De Santis i dr. 1997, Chiappini i dr. 1999, Xu i dr. 2003).

Opažanja sekularne varijacije Zemljina magnetskog polja u neovisnoj Hrvatskoj započela su 2004. god. uspostavom Hrvatske geomagnetske sekularne mreže (HGSM) (Brkić i dr. 2006). Osam sekularnih točaka tada su činile: POKUpsko, MEDJimurje, BARAnja, RACInovci, KONAvle, SINjsko Polje, KRBavsko Polje i PONte Porton (tablica 1 i slika 1). Postupci i metode izmjere uz pomoć GEM Systems GSM-19G Overhauser protonskog magnetometra i Bartingtonova MAG-01H DI magnetometra opisani su npr. u (Brkić i dr. 2006). Sljedeća izmjera HGSM izvedena u rujnu i listopadu 2007. godine (Brkić i dr. 2009) pružila je priliku za prvo suvremeno određivanje sekularne varijacije na cijelom teritoriju Republike Hrvatske, što je i predmet ovog rada.



Slika 1. Hrvatska geomagnetska sekularna mreža danas. Točke PALAgruza i LOSinj uspostavljene su 2008. god. Najmanja međusobna udaljenost točaka mreže iznosi 93 km, najveća 263 km, a prosječna 178 km.

## 2. Deklinacija, inklinacija i totalni intenzitet za epohe 2004,5 i 2007,5

Apsolutna opažanja deklinacije  $D$ , inklinacije  $I$  i totalnog intenziteta  $F$ , izvedena na točkama HGSM-a, reducirana su na epohu 2004,5 te 2007,5 uz pomoć modela (1) koji pretpostavlja da sekularna varijacija na referentnom opservatoriju i sekularnoj točki nije jednaka (Newitt i dr. 1996):

$$E_{ST}^{epoha} = E_{OP}^{epoha} + (E_{ST}^{t_m} - E_{OP}^{t_m}) + \int_{t_m}^{t_m + \Delta T} (SV_{ST}(t) - SV_{OP}(t)) dt, \quad (1)$$

gdje je  $E_{OP}^{epoha}$  element na opservatoriju (godišnji srednjak),  $E_{ST}^{t_m}$  i  $E_{OP}^{t_m}$  element opažan na sekularnoj točki ST odnosno opservatoriju OP u trenutku  $t_m$ ,  $SV_{ST}$  i  $SV_{OP}$  sekularna varijacija na sekularnoj točki odnosno opservatoriju, a  $\Delta T$  vrijeme između epohe i trenutka opažanja. Sekularna varijacija na opservatoriju  $SV_{OP}(t_e)$  za epohu  $t_e$ , računana je uz pomoć (Chambodut and Manda 2005):

$$SV_{OP}(t_e) = \frac{E_{OP}^{t_{i+1}} - E_{OP}^{t_i}}{t_{i+1} - t_i}, \quad (2)$$

gdje su  $t_i$  odnosno  $t_{i+1}$  uzastopne epohe, a  $t_e = 1/2 (t_i + t_{i+1})$ . Elementi su računani primjenom 12-mjesečna kliznog srednjaka na njihove mjesečne srednjake (URL 1).

Za svaku sekularnu točku opažanja 2004. i 2007. godine reducirana su na opservatorij Tihany (THY) te su izračunane pripadne srednje vrijednosti i rasapi (tablice 1 i 2), gdje je sukladno preporukama Magnetic Network in Europe (MagNetE) za mjeru pouzdanosti uzet rasap, definiran kao  $\max\{|E_{\text{maks}} - E_{\text{sred}}|, |E_{\text{min}} - E_{\text{sred}}|\}$ .

Tablica 1. Opažanja  $D$ - $I$ - $F$  2004. god. reducirana na THY i epohu 2004,5.

Sekularna točka	$\varphi$ [°]	$\lambda$ [°]	$h$ [m]	$D$ [°]	Rasap $D$ [']	$I$ [°]	Rasap $I$ [']	$F$ [nT]	Rasap $F$ [nT]
POKU	45,4733	15,9833	105	2,490	0,75	62,011	0,19	47436,8	4,5
MEDJ	46,4839	16,3317	199	2,402	0,62	62,931	0,20	47755,3	2,4
BARA	45,8364	18,7869	86	3,051	0,42	62,521	0,08	47739,3	1,7
RACI	44,8564	18,9694	81	2,961	0,82	61,540	0,32	47454,0	4,7
KONA	42,5322	18,3403	47	2,606	0,55	59,261	0,19	46769,0	1,5
SINP	43,6494	16,6886	296	2,296	0,86	60,479	0,14	46921,6	2,9
KRBP	44,6697	15,6300	648	2,270	0,30	61,242	0,08	47040,1	1,8
PONP	45,3561	13,7347	5	1,918	0,46	61,774	0,15	47222,2	0,6

Tablica 2. Opažanja *D-I-F* 2007. god. reducirana na *THY* i epohu 2007,5.

Sekularna točka	<i>D</i> [°]	Rasap <i>D</i> [']	<i>I</i> [°]	Rasap <i>I</i> [']	<i>F</i> [nT]	Rasap <i>F</i> [nT]
POKU	2,742	0,97	62,009	0,15	47524,4	1,7
MEDJ	2,680	0,55	62,928	0,10	47843,1	3,0
BARA	3,329	0,51	62,521	0,07	47828,7	0,4
RACI	3,235	0,44	61,539	0,25	47541,0	3,5
KONA	2,855	0,50	59,253	0,30	46861,2	1,4
SINP	2,556	1,16	60,473	0,40	47012,2	2,0
KRBP	2,507	0,77	61,234	0,18	47128,1	1,9
PONP	2,195	0,57	61,762	0,28	47309,0	3,0

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

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

pretpostavljajući pritom dipolni doprinos modela sferne Zemlje polumjera *R* = 6371,2 km (vidi npr. Meloni i dr. 1994).

Pouzdanost reduciranih izmjera 2004. i 2007. godine iskazana prosječnim rasapom iznosi 0,6' za *D*, 0,2' za *I* te 2,5 nT za *F* odnosno 0,7' za *D*, 0,2' za *I* te 2,1 nT za *F*. Maksimalne razlike metode (1) u odnosu na jednostavnu metodu redukcije (vidi npr. Brkić i Šugar 2008) iznose 5" za *D*, 5" za *I* te 0,2 nT za *F* za epohu 2004,5, te 13" za *D*, 4" za *I* i 0,3 nT za *F* za epohu 2007,5.

### 3. Hrvatsko geomagnetsko normalno referentno polje 2007,5

Za opis normalnog polja geomagnetskih elemenata i njihovih sekularnih varijacija preko Hrvatske korišteni su Taylorovi polinomi (De Santis i dr. 1997, Chiappini i dr. 1999, Xu i dr. 2003):

$$E(\lambda, \varphi) = e_{00} + e_{10}(\varphi - \varphi_0) + e_{01}(\lambda - \lambda_0) + e_{11}(\varphi - \varphi_0)(\lambda - \lambda_0) + e_{20}(\varphi - \varphi_0)^2 + e_{02}(\lambda - \lambda_0)^2 \quad (4a)$$

za geomagnetske elemente, te:

$$SV(\lambda, \varphi) = e_{00} + e_{10}(\varphi - \varphi_0) + e_{01}(\lambda - \lambda_0) \quad (4b)$$

za njihove sekularne varijacije. Ovdje su  $E(\varphi, \lambda)$  i  $SV(\varphi, \lambda)$  normalna polja ( $E_{normal}$ ), a referentne vrijednosti koordinata jesu:  $\varphi_0 = 44,9^\circ$  i  $\lambda_0 = 16,8^\circ$ .

Jednadžbe (4a) i (4b) bile su prilagođivane rezultatima mjerenja koristeći težinsku metodu najmanjih kvadrata (WE-fit) oblika:

$$\sum_{i=1}^N (E_i^{epoha} - E_{normal})^2 = \min. \quad (5)$$

za dobivanje koeficijenata  $e_{jk}$  ( $j, k = 0, 1$ ). Pritom je  $N$  broj sekularnih točaka koje sudjeluju u prilagodbi, a  $E_i^{epoha}$  su ili vrijednosti geomagnetskih elemenata ili njihovih sekularnih varijacija na  $i$ -toj točki. Nakon što su izračunati koeficijenti normalnog polja, standardna neodređenost  $d$  određena je iz izraza:

$$\delta = \sqrt{\frac{\Sigma}{N - P}}, \quad (6)$$

gdje je  $\Sigma$  zbroj kvadrata reziduala ( $rsd = E_i^{epoha} - E_{normal}$ ) normalnog polja, a  $P$  je broj koeficijenata ( $P = 6$  za  $D, I$  i  $F$ ; odnosno  $P = 3$  za njihove sekularne varijacije). Težinski faktor jednak je 0 za one sekularne točke gdje je  $rsd > 2\delta$ , a jednak je 1 za  $rsd \leq 2\delta$ . Postupak je iterativan dok svi reziduali ne postanu  $\leq 2\delta$  (Meloni i dr. 1994, Kovács i Körmendi 1999).

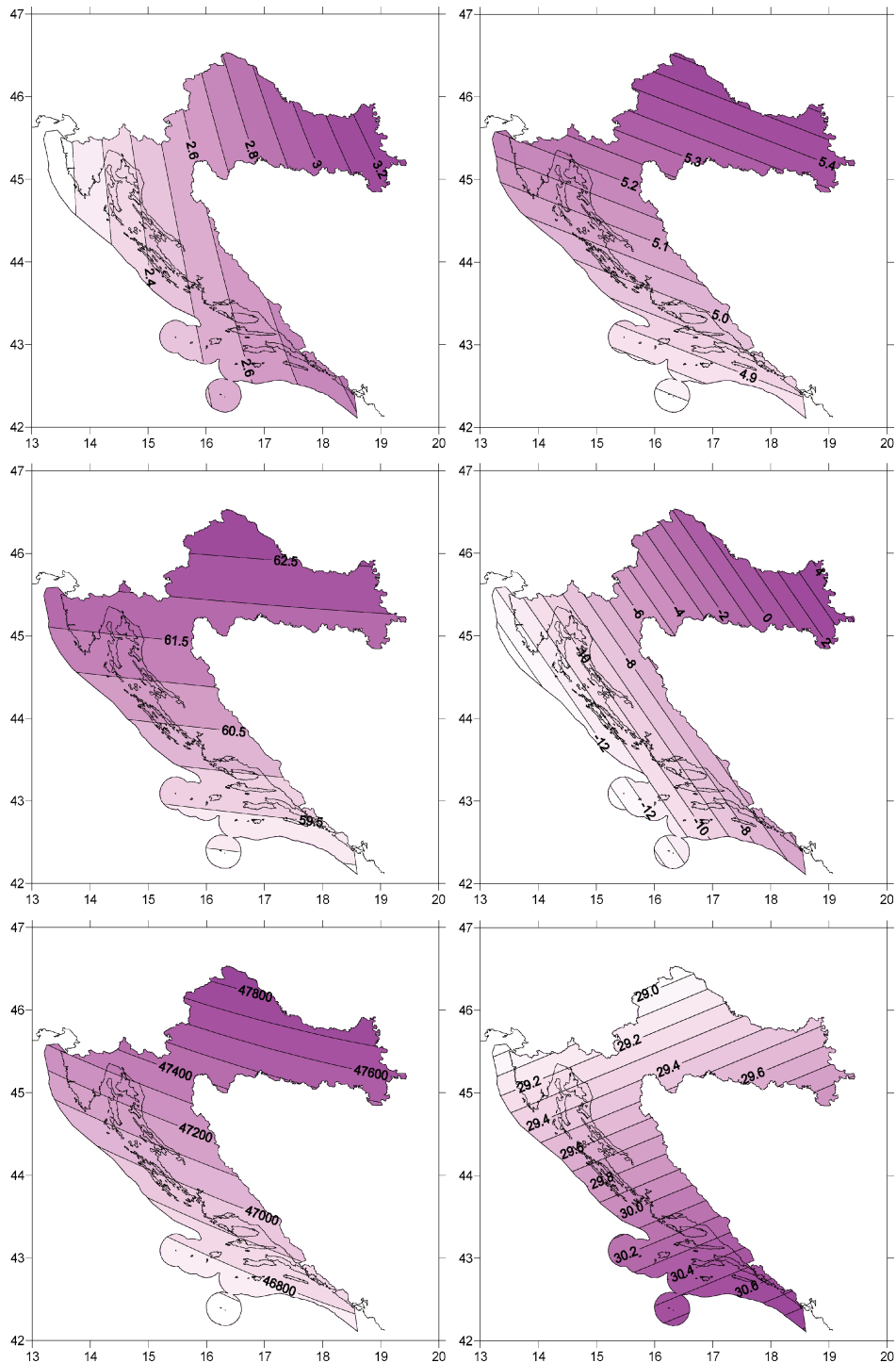
Hrvatsko geomagnetsko normalno referentno polje (HGMRP) za  $D, I$  i  $F$  za epohu 2007,5 određeno je koeficijentima u tablici 3. i prikazano slikom 2. Maksimalne razlike HGMRP-a u odnosu na *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF) globalni model za epohu 2007,5 iznose 12,1' za  $D$ , 6,4' za  $I$  te 105,2 nT za  $F$ .

Tablica 3.  $D, I$  i  $F$  koeficijenti HGMRP-a za 2007,5.

$E$	$e_{00}$	$e_{01}$	$e_{10}$	$e_{02}$	$e_{11}$	$e_{20}$
$D$ [°]	2,76	0,1852	0,0837	0,0003	0,0235	0,0064
$I$ [°]	61,54	0,0600	0,9440	-0,0030	-0,0110	-0,0220
$F$ [nT]	47386	66,6	302	-5,5	-4,2	11,2

#### 4. Sekularna varijacija 2004,5 – 2007,5

Prosječna godišnja promjena izračunata iz reduciranih mjerenja sekularnih točaka (tablice 1 i 2) za razdoblje 2004,5 – 2007,5 iznosi 5,2'/god. za  $D$ , -4'/god. za  $I$ , te 29,6 nT/god. za  $F$ . Sekularna varijacija normalnog polja u istom razdoblju reprezentirana je polinomom (4b) s koeficijentima danim u tablici 4, te je prikazana na slici 2. Iako maksimalne razlike godišnjih promjena za normalno i reducirano polje iznose 0,5'/god. za  $D$ , 3'/god. za  $I$ , te 0,9 nT/god. za  $F$ , u prosjeku su te godišnje promjene jednake. Nadalje, usporedba sekularne varijacije normalnog polja i sekularne varijacije *International Geomagnetic Reference Field* globalnog modela za 2004,5 – 2007,5 pokazuje u točkama HGSM-a maksimalne razlike od 0,84'/god. za  $D$ , 54'/god. za  $I$ , te 7,8 nT/god. za  $F$ .



Slika 2. Lijevo: HGMRP 2007,5 za  $D$  [°],  $I$  [°] i  $F$  [nT]. Desno: sekularna varijacija  $D$  [°/god.],  $I$  [°/god.] i  $F$  [nT/god.] normalnog polja za 2004,5 – 2007,5.

Tablica 4. Koeficijenti sekularne varijacije HGMRP-a za 2004,5 – 2007,5.

SV	$e_{00}$	$e_{01}$	$e_{10}$
$D$ [°/god.]	5,25	0,047	0,171
$I$ [°/god.]	–4	2,73	2,57
$F$ [nT/god.]	29,6	0,11	–0,38

## 5. Zaključak

Hrvatska geomagnetska mreža sekularnih točaka, uspostavljena 2004. godine, po primila je 2008. godine proširenjem za dvije točke svoj konačni oblik. Uzastopna mjerenja 2004., 2007., 2008. i 2009. potvrdila su da mreža zadovoljava kriterije IAGA i preporuke Magnetic Network in Europe (MagNetE). Ipak, i dalje postoji razvidna potreba za barem jednom dodatnom sekularnom točkom na području Bosne i Hercegovine, čime bi se poboljšala osnovna svrha ove mreže – određivanje sekularne varijacije na teritoriju Hrvatske.

Redukciju je moguće provesti kada opservatorijski srednjaci geomagnetskih elemenata postanu raspoloživi, a i danas u praksi rezultati postaju javni barem nekoliko godina nakon provedene izmjere. U ovom je radu u redukciji mjerenja Hrvatske geomagnetske sekularne mreže na epohe 2004,5 i 2007,5 primijenjena metoda koja pretpostavlja da sekularna varijacija na referentnom opservatoriju THY i sekularnoj točki nije jednaka. Dobivene razlike u odnosu na jednostavnu metodu redukcije (vidi npr. Brkić i Šugar 2008) zanemarive su, ponajprije zato što su mjerenja izvedena relativno blizu epoha redukcije. Konačna pouzdanost reduciranih izmjera 2004. i 2007. godine usporediva je s pouzdanostima suvremenih geomagnetskih izmjera (Newitt i dr. 1996).

Hrvatsko geomagnetsko normalno referentno polje za 2007,5 definirano je koeficijentima polinoma drugog reda po latitudi i longitudi. Ono pokazuje nezanimarive razlike u odnosu na *International Geomagnetic Reference Field* model te je stoga prikladnije kao referentno za određivanje lokalnih geomagnetskih anomalija.

Sekularna varijacija normalnoga geomagnetskog polja za teritorij Republike Hrvatske određena je na temelju podataka suvremenih izmjera 2004. i 2007. godine te definirana koeficijentima polinoma prvog reda po latitudi i longitudi. Njezina srednja vrijednost iznosi 5,2°/god. za deklinaciju, –4°/god. za inklinaciju, te 29,6 nT/god. za totalni intenzitet. Iako ta promjena deklinacije zahtijeva najviše petogodišnji interval izmjera geomagnetskog polja u svrhu obnove službenih karata, takav interval izmjera ne pruža uvid u detaljniju strukturu pojave (vidi npr. Brkić i dr. 2008), te je stoga poželjno sekularnu varijaciju pratiti izmjerama, ako je moguće, jednom godišnje. U usporedbi s prosječnom godišnjom promjenom reduciranog polja u razdoblju 1927,5 – 2004,5, izvedenom iz povijesnih mjerenja i prve suvremene izmjere (Brkić i Šugar 2008), godišnja promjena reduciranog polja 2004,5 – 2007,5 bilježi promjenu od +0,2°/god. za deklinaciju, –5°/god. za inklinaciju, te –8 nT/god. za totalni intenzitet, što potvrđuje da i sama sekularna varijacija nije konstantna. Također, nezanemarive razlike sekularnih varijacija

izvedenih uz pomoć Hrvatskoga geomagnetskog normalnog referentnog polja i International Geomagnetic Reference Field modela i dalje upućuju na značaj terenskih izmjera te preporučuju korištenje sekularnih varijacija Hrvatskoga geomagnetskog normalnog referentnog polja za lokalne potrebe, na teritoriju Hrvatske.

Daljnja poboljšanja modela geomagnetskog polja i sekularne varijacije na teritoriju Republike Hrvatske očekuju se predstojećom primjenom prenosivog variometra u terenskim izmjerama, te uspostavom nacionalnoga geomagnetskog opservatorija.

*ZAHVALA. Autori su zahvalni Državnoj geodetskoj upravi Republike Hrvatske, Institutu za istraživanje i razvoj obrambenih sustava Ministarstva obrane Republike Hrvatske, te geomagnetskom opservatoriju Tihany i INTERMAGNET-u na podacima koji su omogućili izradu ovog rada.*

## Literatura

- Brkić, M., Šugar, D. (2008): Hrvatsko geomagnetsko normalno referentno polje 2004,5, Geodetski list, 1, 1–7.
- 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.
- Brkić, M., Šugar, D., Pavasović, M. (2008): The representative recent secular variation of the geomagnetic field on the Croatian territory, International scientific conference on Magnetism – Geomagnetism – Biomagnetism MGB – 2008, 7th and 8th November 2008 Sezana, Slovenia.
- Brkić, M., Šugar, D., Pavasović, M., Rezo, M. (2009): Osnovna geomagnetska mreža Republike Hrvatske, Državna geodetska uprava RH, Izvješća o znanstveno-stručnim projektima iz 2006. i 2008. godine.
- Chiappini, M., De Santis, A., Dominici, G., Torta, J. M. (1999): A Normal Reference Field for the Ionian Sea Area, Phys. Chem. Earth (A) 24, No. 5, 433–438.
- De Santis, A., Chiappini, M., Dominici, G., Meloni, A. (1997): Regional geomagnetic field modelling: the contribution of the Istituto Nazionale di Geofisica, Annal. Geophys., 40 (5), 1161–1169.
- 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, 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, No. 5.



Newitt, L. R., Barton, C. E., Bitterly, J. (1996): Guide for Magnetic Repeat Station Surveys, IAGA, Boulder, USA.

Xu, W. J., Xia, G. H., An, Z. C., Chen, G. X., Zhang, F. Y., Wang, Y. H., Tian, Y. G., Wei, Z. G., Ma, S. Z., Chen, H. F. (2003): Magnetic Survey and ChinaGRF 2000, Earth Planets Space, 55, 215–217.

URL 1: World Data Centre for Geomagnetism (Edinburgh), <http://www.wdc.bgs.ac.uk>, (15.07.2009.).

## Geomagnetic Field Secular Variation on Territory of Croatia

*ABSTRACT. The reduction of geomagnetic declination, inclination and total intensity surveys that took place on the Croatian Geomagnetic Repeat Stations Network in 2004 and 2007 is presented. The Croatian Normal Reference Field of the 2007.5 is determined. The geomagnetic field secular variation for Croatian territory and period 2004.5 – 2007.5 is calculated.*

*Keywords: geomagnetic repeat station network, geomagnetic survey reduction, geomagnetic normal reference field, geomagnetic field secular variation.*

*Prihvaćeno: 2010-02-19*