

UDK 528.236.5:550.38(497.5):537.67(100)
Izvorni znanstveni članak

Geomagnetska deklinacija na prostoru Hrvatske na temelju globalnih geomagnetskih modela

Mario BRKIĆ – Zagreb¹, Željko HEĆIMOVIĆ – Zagreb², Tomislav BAŠIĆ – Zagreb³

SAŽETAK. Pregledno su prikazani globalni geomagnetski modeli International Geomagnetic Reference Field (IGRF) i World Magnetic Model (WMM). Primjenom razvoja u red sfernih harmonika, računana je magnetska deklinacija i njezina godišnja promjena na području Hrvatske. Promatrana je nepravilna i spora promjenljiva narav dugovalne komponente Zemljina magnetskog polja za osnovne epohe proteklog stoljeća. Pouzdanost IGRF i WMM-deklinacija procjenjuje se na unutar 1 stupnja, što je zadovoljavajuće za globalne primjene. Za lokalne potrebe nužno veću pouzdanost geomagnetske deklinacije moguće je osigurati jedino kontinuiranim opažanjem i periodičnim izmjerama elemenata Zemljina magnetskog polja.

Ključne riječi: globalni geomagnetski modeli, IGRF, WMM, magnetska deklinacija, sekularna varijacija.

1. Globalni geomagnetski modeli

Međunarodna udruga za geomagnetizam i aeronomiju (IAGA), zadatak koje je unapređenje istraživanja magnetizma i aeronomije Zemlje i ostalih tijela Sunčeva sustava i međuplanetarnog prostora, odlučilo je da se magnetsko polje opisuje magnetskom indukcijom \vec{F} . To je vektorska veličina čija je SI jedinica 1 tesla ($1 \text{ T} = 1 \text{ Nm}^{-1}\text{A}^{-1}$). U opisu Zemljina magnetskog polja često se primjenjuje jedinica 1 nanotesla ($1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{ T}$).

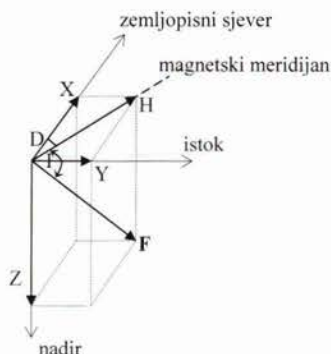
Određivanje Zemljina magnetskog polja u određenoj točki uključuje određivanje iznosa i smjera magnetske indukcije. U tu svrhu definiraju se dvije referentne ravnine, od kojih je jedna najčešće horizontalna, a druga prolazi kroz geografski meridijan. Tada se položaj vektora \vec{F} određuje s pomoću dva kuta: magnetskom deklinaci-

¹Dr. sc. Mario Brkić, Institut za obrambene studije, istraživanja i razvoj, MORH, pp 252, 10000 Zagreb

²Dr. sc. Željko Hećimović, Hrvatski geodetski institut, Savska c. 41/XVI, pp 19, 10000 Zagreb

³Prof. dr. sc. Tomislav Bašić, Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet, Kačićeva 26, 10000 Zagreb

jom D , tj. kutom što ga magnetski meridijan (vertikalna ravnina kroz \vec{F}) zatvara s ravninom zemljopisnog meridijana, i magnetskom inklinacijom I , tj. kutom što ga vektor \vec{F} zatvara s horizontalnom ravninom (vidi npr. Skoko 1992). Preostali elementi Zemljina magnetskog polja (slika 1) su X (sjeverna komponenta), Y (istočna komponenta), Z (vertikalna komponenta, pozitivna prema dolje) i H (horizontalna komponenta magnetske indukcije).



Slika 1. Elementi Zemljina magnetskog polja.

Magnetsko polje mjereno na površini Zemlje ili iznad nje sadrži doprinos više izvora: (1) glavnog polja, koje čini više od 95% ukupnog polja, a za koje se smatra da ga uzrokuju električne struje duboko u Zemljinoj unutrašnjosti, najvjerojatnije u vanjskoj tekućoj jezgri; (2) polja kore i gornjeg plašta, uzrokovanog magnetičnim stijenama i električnim strujama u Zemljinoj kori; (3) vanjskog polja, koje potječe od električnih struja u atmosferi i iznad nje. Ta polja superponiraju se i indukcijom djeluju jedna na druga.

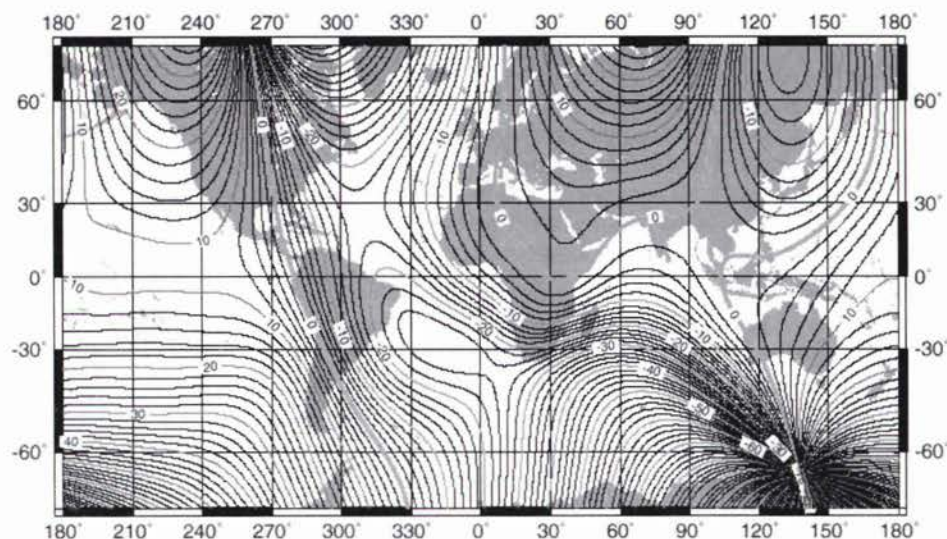
Globalni geomagnetski modeli dizajnirani su tako da reprezentiraju glavno geomagnetsko polje. Preostali dijelovi ukupna geomagnetskog polja zajednički se nazivaju *anomalno geomagnetsko polje*, koje je promjenljivo i prostorno i u vremenu. Globalni geomagnetski modeli omogućuju proračun elemenata magnetskog polja i pripadnu godišnju promjenu (sporu i nepredvidljivu promjenu glavnog polja).

Proračun elemenata temelji se na koeficijentima razvoja u sferne harmonike, izvedenim iz geomagnetskih opažanja. Općenito neki globalni geomagnetski model vrijedi od jedne *osnovne epohe* (engl. *base epoch*) do sljedeće u nizu. Primjerice, *World Magnetic Model* za osnovnu epohu 2000, WMM2000, valjan je od 2000,0 do 2005,0 godine, kada postaje aktualan WMM2005.

Rani globalni modeli, nastali prije 1900. god., temelje se na geomagnetskim opažanjima s drvenih brodova te na kopненоj izmjeri, a modeli između 1900. i 1967. god. ponajprije na morskim, kopnenim i aeromagnetskim istraživanjima. Satelitski geomagnetski podaci postaju značajni od 1967. god. Od globalnih, najpoznatiji su modeli *British Geological Survey (BGS)*, zatim *Definitive and International Geomagnetic Reference Field (DGRF/IGRF)* modeli, koje je generirao *IGRF Committee of the International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA)*, te *World*

Magnetic Model (WMM), nastao za potrebe *North Atlantic Treaty Organization* uz suradnju *British Geological Survey*, *U.S. Geological Survey for the British Hydrographic Office* i *U.S. National Imagery and Mapping Agency*.

World Magnetic Model standardni je model u *UK Ministry of Defence* i *US Department of Defense*, te za *North Atlantic Treaty Organization* i *World Hydrographic Office*, ali je također u širokoj uporabi i za civilne sustave. Namijenjen je za navigaciju brodova, zrakoplova, projektila, satelita, te drugih vozila i platformi. WMM se može naći u većini GPS prijaimnika, što omogućuje prebacivanje iz sustava s geografskim sjeverom u sustav s magnetskim sjeverom i obratno. Sljedeća slika prikazuje WMM magnetsku deklinaciju.



Slika 2. Magnetska deklinacija za epohu 2000 prema WMM2000 [lučni st.].

2. WMM-modeli

Zemljino magnetsko polje B može se izraziti kao vektorska suma doprinosa triju glavnih izvora: glavnog polja generirana u Zemljinoj jezgri (B_m), polja kore od lokalnih stijena (B_c), i kombinirano poremećajno polje od električnih struja koje teku u gornjoj atmosferi i magnetosferi, a koje također induciraju električne struje u moru i zemlji (B_d), tj.

$$B(r, t) = B_m(r, t) + B_c(r) + B_d(r, t). \quad (1)$$

Aktualni *World Magnetic Model 2000* sadrži model glavnog polja B_m za epohu 2000,0 valjan za razdoblje od 2000,0 do 2005,0 godine, te predikcijski model godišnje promjene (*engl. secular variation*). U izradbi WMM2000 korišteni su podaci globalne mreže opservatorija, satelitski podaci (npr. *Polar Orbiting Geomagnetic Survey – POGS* te danskog satelita *Ørsted*), podaci površinskih točaka za ponavljaju-

na opažanja te podaci aeromagnetskih i pomorskih istraživanja. Detaljno o instrumentima, odabiru i kontroli kvalitete podataka vidi u Macmillan i Quinn (2000).

Polje magnetiziranih stijena kore B_c znatno je manje magnitude nego glavno polje. Prostorna promjena polja kore je valnih duljina reda veličine metra pa do više tisuća kilometara. Sama magnetizacija može biti inducirana (glavnim magnetskim poljem), remanentna, a najčešće je kombinacija jednog i drugog tipa (Lowrie 1997). Budući da se u izradbi WMM2000 koriste višegodišnji podaci, pretpostavljeno je da se polja kore ne mijenjaju s vremenom.

Polje koje potječe od struja u ionosferi i magnetosferi te njihove rezultante, inducirane struje u kori, varira i u prostoru i u vremenu. Poremećajno polje B_d mijenja se pravilno, s fundamentalnim periodom od jednog dana, i nepravilno u vremenu veličine sekunda do više dana. Pravilne dnevne (diurnalne) varijacije generirane su dnevnom ionizacijom atmosfere (na visinama 100-130 km) kao posljedica Sunčeva zračenja, te gibanjem atmosfere s pomoću vjetrova i tida u Zemljinu glavnom polju. Nepravilne promjene, magnetske oluje, intenzivnije su na višim geomagnetskim latitudama. I pravilne i nepravilne varijacije poremećajnog polja modulirane su ciklusom godišnjih doba te Sunčevim ciklusom.

Magnetsko polje B definira se kao negativni gradijent potencijala

$$B = -\nabla V(r, \vartheta, \lambda, t). \quad (2)$$

Izvan Zemljine površine, u području bez smetnji, potencijal zadovoljava Laplaceovu jednadžbu:

$$\nabla^2 T = 0 \quad (3)$$

gdje sferne koordinate (r, ϑ, λ) predstavljaju radialnu udaljenost od središta Zemlje, geocentričnu kolatitudu ($90^\circ -$ latituda) i longitudu, a t označava vrijeme.

Rješenje te diferencijalne jednadžbe u sfernoj aproksimaciji moguće je izraziti razvojem u red sfernih harmonika (vidi npr. Sharma 1986, ili Macmillan i Quinn 2000):

$$V(r, \vartheta, \lambda, t) = a \sum_{n=1}^{n_{i\max}} \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (g_n^m(t) \cdot \cos m\lambda + h_n^m(t) \cdot \sin m\lambda) \cdot P_n^m(\vartheta) + a \sum_{n=1}^{n_{e\max}} \left(\frac{r}{a}\right)^n \sum_{m=0}^n (g_n^m(t) \cdot \cos m\lambda + s_n^m(t) \cdot \sin m\lambda) \cdot P_n^m(\vartheta) \quad (4)$$

gdje su a srednji polumjer Zemlje (6371,2 km), $g_n^m(t)$ i $h_n^m(t)$ unutrašnji Gaussovi koeficijenti u trenutku t , $q_n^m(t)$ i $s_n^m(t)$ vanjski Gaussovi koeficijenti u trenutku t , $P_n^m(\vartheta)$ su Schmidtove normalizirane pridružene Legendreove funkcije stupnja n i reda m . Schmidtova normalizacija omogućuje određivanje najznačajnijih harmonika u modelu pregledom relativnih magnituda koeficijenata (Quinn et al. 1995).

Gaussovi koeficijenti slabo su promjenljive funkcije vremena. Poradi potreba navigacije za unutrašnje Gaussove koeficijente pretpostavlja se linearna promjena (u obliku Taylorova razvoja) za iduće 5-godišnje razdoblje:

$$\begin{aligned} g_n^m(t) &= g_n^m + \dot{g}_n^m \cdot (t - t_0) & t_0 \leq t \leq t_0 + 5 \\ h_n^m(t) &= h_n^m + \dot{h}_n^m \cdot (t - t_0) & t_0 \leq t \leq t_0 + 5 \end{aligned} \quad (5)$$

gdje su $g_n^m(t)$ i $h_n^m(t)$ koeficijenti glavnog polja za osnovnu epohu t_0 , a $\dot{g}_n^m(t)$ i $\dot{h}_n^m(t)$ koeficijenti godišnje promjene (sekularne varijacije) za 5-godišnje razdoblje nakon osnovne epohe. Predikcije glavnog polja za više od 5 godina nisu dovoljno točne za opće navigacijske svrhe i stoga se modeli i zemljovidni moraju obnavljati svakih pet godina. Za vanjske Gaussove koeficijente pretpostavlja se nepromjenljivost unutar vremena ulaznih podataka za model

$$\begin{aligned} q_n^m(t) &= q_n^m & t \approx t_0 \\ s_n^m(t) &= s_n^m & t \approx t_0 \end{aligned} \quad (6)$$

U praksi se glavno/vanjsko polje i godišnja promjena modeliraju odvojeno. Za maksimalni stupanj glavnog polja ni_{max} izabran je 12, vanjskog polja ne_{max} 5, a za godišnju promjenu glavnog polja 8. Postojanje promjene nagiba funkcije gustoće spektra snage kod unutrašnjih koeficijenata stupnja 12-15 interpretira se tako da harmonicima nižeg stupnja, tj. do 12-og, dominira glavno polje, a višim harmonicima, od 15-og dominira polje kore (vidi Quinn et al. 1995 ili Macmillan i Quinn 2000). Pregledno o problemu 'rezanja' razvoja u sferne harmonike i modeliranja na primjeru IGRF-modela vidi u Cain 1995. Poradi nedostatnih podataka, godišnja promjena ne može biti modelirana do istoga maksimalnog stupnja kao glavno polje.

Uz pomoć (4), opažani dijelovi magnetskog polja B_r (radijalna komponenta u smjeru iz Zemljina središta prema van), B_ϑ (komponenta u smjeru juga), B_λ (komponenta u smjeru istoka):

$$\begin{aligned} B_r = -\frac{\partial V}{\partial r} &= \sum_{n=1}^{12} (n+1) \left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} \sum_{m=0}^n (g_n^m \cdot \cos m\lambda + h_n^m \cdot \sin m\lambda) \cdot P_n^m(\vartheta) \\ &\quad - \sum_{n=1}^5 n \left(\frac{r}{a}\right)^{n-1} \sum_{m=0}^n (q_n^m \cdot \cos m\lambda + s_n^m \cdot \sin m\lambda) \cdot P_n^m(\vartheta) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} B_\vartheta = -\frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \vartheta} &= -\sum_{n=1}^{12} \left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} \sum_{m=0}^n (g_n^m \cdot \cos m\lambda + h_n^m \cdot \sin m\lambda) \cdot \frac{dP_n^m(\vartheta)}{d\vartheta} \\ &\quad - \sum_{n=1}^5 \left(\frac{r}{a}\right)^{n-1} \sum_{m=0}^n (q_n^m \cdot \cos m\lambda + s_n^m \cdot \sin m\lambda) \cdot \frac{dP_n^m(\vartheta)}{d\vartheta} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} B_\lambda = -\frac{1}{r \sin \vartheta} \frac{\partial V}{\partial \lambda} &= \frac{1}{\sin \vartheta} \sum_{n=1}^{12} \left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} \sum_{m=0}^n m \cdot (g_n^m \cdot \cos m\lambda - h_n^m \cdot \sin m\lambda) \cdot P_n^m(\vartheta) \\ &\quad + \frac{1}{\sin \vartheta} \sum_{n=1}^5 \left(\frac{r}{a}\right)^{n-1} \sum_{m=0}^n m \cdot (q_n^m \cdot \cos m\lambda - s_n^m \cdot \sin m\lambda) \cdot P_n^m(\vartheta) \end{aligned} \quad (9)$$

i opažane godišnje promjene \dot{B}_r , \dot{B}_ϑ , \dot{B}_λ :

$$\dot{B}_r = -\frac{\partial \dot{V}}{\partial r} = \sum_{n=1}^8 (n+1) \left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} \sum_{m=0}^n (\dot{g}_n^m \cdot \cos m\lambda + \dot{h}_n^m \cdot \sin m\lambda) \cdot P_n^m(\vartheta), \quad (10)$$

$$\dot{B}_\vartheta = -\frac{1}{r} \frac{\partial \dot{V}}{\partial \vartheta} = -\sum_{n=1}^8 \left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} \sum_{m=0}^n (\dot{g}_n^m \cdot \cos m\lambda + \dot{h}_n^m \cdot \sin m\lambda) \cdot \frac{dP_n^m(\vartheta)}{d\vartheta}, \quad (11)$$

$$\dot{B}_\lambda = -\frac{1}{r \sin \vartheta} \frac{\partial \dot{V}}{\partial \lambda} = \frac{1}{\sin \vartheta} \sum_{n=1}^8 \left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} \sum_{m=0}^n m \cdot (\dot{g}_n^m \cdot \cos m\lambda - \dot{h}_n^m \cdot \sin m\lambda) \cdot P_n^m(\vartheta) \quad (12)$$

tvore sustav jednadžbi u kojem su tražene nepoznanice Gaussovi koeficijenti modela.

Jednom određeni Gaussovi koeficijenti modela glavnog polja i modela godišnje promjene, upotrebljavaju se za računanje vrijednosti komponenata (7), (8) i (9) te njihovih godišnjih promjena (10), (11) i (12) u bilo kojoj točki blizu Zemljine površine i za bilo koji datum unutar pet godina od osnovne epohe.

Općenito se satelitski podaci odnose na geocentrični, a površinski podaci na geodetski koordinatni sustav (u kojem se visina mjeri u odnosu na srednju razinu mora, aproksimiranu sferoidom). Ako su ulazni podaci zadani geodetskom latitudom i visinom, nužno je prije određivanja Gaussovih koeficijenata podatke i njihove položaje transformirati u geocentrični sustav. Položajne koordinate (h , ϑ , λ), gdje je h visina iznad srednje razine mora, a ϑ geodetska kolatituda, transformiraju se u (r , ϑ , λ) uz pomoć (Macmillan i Quinn 2000):

$$\tan \vartheta = \frac{(A^2 \sin^2 \vartheta' + B^2 \cos^2 \vartheta')^{1/2} h + A^2}{(A^2 \sin^2 \vartheta' + B^2 \cos^2 \vartheta')^{1/2} h + A^2} \tan \vartheta' \quad (13)$$

i

$$r^2 = h^2 + 2h(A^2 \sin^2 \vartheta' + B^2 \cos^2 \vartheta')^{1/2} + \frac{A^2 \sin^2 \vartheta' + B^2 \cos^2 \vartheta'}{A^2 \sin^2 \vartheta' + B^2 \cos^2 \vartheta'}, \quad (14)$$

gdje je A ekvatorijalni, a B polarni polumjer sferoida (npr. WGS-84 elipsoida).

Izlazne veličine sferno harmonijskog modela, B_ϑ , B_λ i B_r , moraju se pak transformirati u X , Y i Z s pomoću (Macmillan i Quinn 2000):

$$\begin{aligned} X &= -B_\vartheta \cos \psi - B_r \sin \psi \\ Y &= B_\lambda \\ Z &= B_\vartheta \sin \psi - B_r \cos \psi \end{aligned} \quad (15)$$

gdje je ψ razlika geocentrične ϑ i geodetske kolatitude ϑ' , tako da je $\psi = \vartheta - \vartheta'$.

Preostale komponente polja moguće je računati iz (vidi sliku 1):

$$D = \arctg \frac{Y}{X}, \quad I = \arctg \frac{Z}{H}, \quad F = \sqrt{H^2 + Z^2}, \quad H = \sqrt{X^2 + Y^2}, \quad (16)$$

a njihove godišnje promjene koristeći

$$\begin{aligned}\dot{H} &= \frac{X \cdot \dot{X} + Y \cdot \dot{Y}}{H} \\ \dot{F} &= \frac{X \cdot \dot{X} + Y \cdot \dot{Y} + Z \cdot \dot{Z}}{F} \\ \dot{D} &= \frac{180}{\pi} \frac{X \cdot \dot{Y} - Y \cdot \dot{X}}{H^2} \\ \dot{I} &= \frac{180}{\pi} \frac{H \cdot \dot{Z} - Z \cdot \dot{H}}{F^2},\end{aligned}\tag{17}$$

gdje su \dot{D} i \dot{I} dani u stupnjevima po godini.

WMM2000 kao model dvanaestog stupnja i reda u razvoju opisuje dugovalne prostorne fluktuacije magnetskog polja koje najvećim dijelom potječu iz Zemljine jezgre, a srednje i kratkovalne fluktuacije s izvorom u plaštu i kori nisu uključene u model. Pojedine lokalne, regionalne i temporalne anomalije magnetske deklinacije mogu premašivati i 10 stupnjeva! Anomalije deklinacije od 3 ili 4 stupnja nisu neuobičajene, ali su malog prostornog pružanja i relativno su izolirane (Quinn et al. 1995). Na kopnu su prostorne anomalije vezane uz planinske lance, rudna ležišta, točke udara munje, geološke rasjede i civilizacijski šum. U oceanima se anomalije pojavljuju najčešće preko granica kontinenata, u blizini podmorskoga gorja, brazda i grebena, te rasjeda, posebice onih vulkanskoga podrijetla. Naravno, brodovi i podmornice također su izvori anomalija. Već spomenute temporalne anomalije mogu trajati od nekoliko minuta do više dana i posljedica su ionsferskih i magnetosferskih procesa. U WMM-model nisu uključene nagle fluktuacije geomagnetskog polja koje se javljaju za vrijeme magnetskih oluja i koje su gotovo konstantno prisutne u područjima aurora.

Za cijelo razdoblje valjanosti WMM2000 i za oceanska područja, *National Geophysical Data Center NOAA* procjenjuje korijen srednje kvadratne pogreške (*root mean square - rms*) deklinacije i inklinacije 0,5 stupnjeva, te 280 nT za totalno polje; pogreške preostalih komponenata približno iznose 140 nT za X i Y , te 200 nT za Z i H . Na kopnu se očekuju ponešto više vrijednosti pogrešaka, ali ipak su one za deklinaciju i inklinaciju unutar jednog stupnja.

Točnost WMM2000-modela može se za kontinentalne točke procijeniti usporedbom vrijednosti izračunanih s pomoću modela u odnosu na godišnje srednje vrijednosti opažanja opservatorija i u odnosu na podatke površinskih postaja za ponavljana opažanja. Ta opažanja sadrže reduciran efekt poremećajnog polja, ali su kontaminirane poljem kore, što rezultira značajnim doprinosom polja kore rezidualima. Tipične *rms*-vrijednosti X , Y , Z i F reziduala kreću se oko 200 nT (vidi Macmillan i Quinn 2000).

3. IGRF/DGRF-modeli

U svrhu računanja Zemljina glavnog magnetskog polja, IAGA periodično razmatra reprezentacije geomagnetskog polja i objavljuje niz koeficijenata pod imenom *International Geomagnetic Reference Field (IGRF)*. Pritom se naziv IGRF odnosi na sve raspoložive IGRF-modele, promatrane kolektivno. Prethodni IGRF, modificiran

uporabom novih podataka, neraspoloživih u vrijeme stvaranja modela, naziva se *Definitive Geomagnetic Reference Field*.

Teorijski opisi geomagnetskih elemenata razvojem u red sfernih harmonika prikazani su u prethodnom poglavlju. Za razliku od WMM-modela, IGRF-modeli odrezani su u desetom stupnju i redu razvoja (120 koeficijenta), što je kompromis u svrhu određivanja dobro definiranih modela glavnog polja, uz izbjegavanje kontaminacije različitim pripovršinskim izvorima. IGRF-koeficijenti godišnje promjene odrezani su u osmom stupnju i redu razvoja (80 koeficijenta). Iscrpno o određivanju aktualnog IGRF2000-modela vidi u Olsen i dr. 2000, Cain i dr. 2000 i URL 1.

Tri su ograničenja IGRF-modela:

(I) Budući da numerički koeficijenti nisu apsolutno točni, izračunano polje ne odgovara aktualnom.

Određenje IGRF-modela za tekuću epohu uključuje ekstrapolaciju opažanja unaprijed, pri čemu sami podaci mogu biti neadekvatni ako ne postoje nedavna satelitska opažanja. Prema tomu, model za tekuću epohu može biti manje točan nego retrospektivni modeli. Za IGRF2000 (za koji je moguće koristiti preliminarne Oersted podatke) IAGA sugerira 50 nT *rms*-pogrešku poradi netočnih koeficijenata. Pridružena godišnja promjena nosit će pogrešku od 20 nT/god., što donosi značajno povećanje nepouzdanosti kasnijih i prediciranih modela glavnog polja.

Općenito se vektor pogreške može javiti kao pogreška bilo kojeg elementa polja ili njihove kombinacije. Na primjer, vektor veličine 10 nT *rms*-lokalne pogreške daje rms vrijednosti oko 5-7 nT za F (od geomagnetskog ekvatora pa do pola), 0,6' -1,2' za D (od ekvatora do oko 60° geomagnetske latitute, odnosno znatno veće vrijednosti blizu pola), te 0,8' -0,3' za I (od ekvatora prema polu). Za globalne *rms*-vrijednosti različite od 10 nT iz tog primjera, sve gornje vrijednosti elemenata mijenjaju se proporcionalno (URL 1).

(II) IGRF-modeli poradi rezanja reda reprezentiraju jedino male valne brojeve (velike valne duljine).

IGRF je model polja koje ima izvor u Zemljinoj jezgri. Zbog goleme udaljenosti Zemljine površine od tog izvora, opažano polje jezgre dominantno je dugovalno. Također, značajan, ali kratkovalni doprinos dolazi od magnetiziranih stijena Zemljine kore i obično iznosi oko 200-300 nT *rms*. Međutim, treba imati na umu da za danu valnu duljinu ne postoji način da se razdvoji doprinos polja jezgre od polja kore. Iako je polje kore uglavnom manjih valnih duljina nego polje jezgre, gotovo sigurno postoji konačan (u biti konstantan) doprinos kore, prisutan u IGRF-modelima (tj. u harmonicima stupnja ≤ 10). S druge strane, najkraća valna duljina reprezentirana IGRF-modelom iznosi oko 4000 km, što znači da model ignorira sve kraće valne duljine, bez obzira da li je njihov izvor u kori ili jezgri (ibid.).

(III) Postoje doprinosi aktualnom polju, a koje IGRF ne pokušava modelirati. Magnetizacija stijena kore obično lokalno pridonosi oko 200 nT, a često i mnogo više. Postoji i mnoštvo vremenski promjenljivih polja, uzrokovanih ljudskom aktivnosti (promet, tramvaji i vlakovi, itd.) ili prirodnim pojavama (od električnih struja u magnetosferi odnosno ionosferi). Ionosferska i magnetosferska polja ponajviše se javljaju unutar sekunda do više sati; u 'tihim' uvjetima mogu biti mala oko 20 nT,

pa sve do 1000 nT za vrijeme magnetskih oluja. U većim vremenskim razdobljima (više dana do više godina), struje magnetosfere pridonose vjerojatno 1000 nT za vrijeme magnetske oluje i nakon nje (ibid.).

4. Globalni geomagnetski modeli za prostor Hrvatske

Na temelju raspoloživih IGRF, DGRF i WMM-koeficijenata (vanjski Gaussovi koeficijenti $q_n^m(t)$ i $s_n^m(t)$ nisu bili dostupni) i fortranskog programa GEOMAG (John M. Quinn 2000) izrađeni su geomagnetski modeli magnetske deklinacije i pripadne godišnje promjene.

Računanja deklinacije provedena su u mreži rastera $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ s pružanjem $B_{\min} = 42,0^\circ$, $B_{\max} = 47,0^\circ$, $L_{\min} = 13,0^\circ$ i $L_{\max} = 20,0^\circ$, koje u cijelosti prekriva područje Hrvatske. Dobiveni modeli magnetskih deklinacija dani su u lučnim stupnjevima, a godišnje promjene magnetske deklinacije izražene su u lučnim minutama na godinu.

Uz pomoć IGRF/DGRF i WMM-modela dobivaju se vrijednosti geomagnetskih deklinacija u odnosu na WGS84-elipsoid. Takve magnetske deklinacije transformirane su na Besselov elipsoid koristeći sedamparametarsku Helmertovu trodimenzionalnu transformaciju s pomoću parametara koji uzimaju u obzir utjecaj geoida (Bašić i Bačić 2000).

Prostorne raspodjele globalne geomagnetske deklinacije različite su s obzirom na model i epohu računanja. Tako su primjerice globalne deklinacije za epohu 1900,0 u Hrvatskoj negativne! Od toga doba može se na prostoru Hrvatske pratiti pomak prema području pozitivnih vrijednosti deklinacija, te smanjenje raspona i raspršenja njihovih vrijednosti (tablice 1, 2 i 3). Ekstremne razlike IGRF-900 i IGRF2000-modela iznose $11,100^\circ$.

Tablica 1. IGRF-magnetske deklinacije (D) za RH u epohama 1900,0 – 2005,0.

D [°]	1900,0	1905,0	1910,0	1915,0	1920,0	1925,0	1930,0	1935,0	1940,0	1945,0	1950,0
min.	-9,751	-9,367	-8,831	-8,075	-7,257	-6,386	-5,502	-4,690	-3,986	-3,458	-2,850
maks.	-6,592	-6,191	-5,643	-4,900	-4,122	-3,316	-2,516	-1,796	-1,170	-0,756	-0,133
sred.	-8,201	-7,795	-7,243	-6,488	-5,687	-4,856	-4,029	-3,281	-2,624	-2,165	-1,552
st.dev.	0,861	0,867	0,871	0,869	0,859	0,842	0,820	0,795	0,768	0,736	0,739
D [°]	1955,0	1960,0	1965,0	1970,0	1975,0	1980,0	1985,0	1990,0	1995,0	2000,0	2005,0
min.	-2,242	-2,094	-1,755	-1,496	-1,029	-0,656	-0,114	0,565	0,923	1,349	1,787
maks.	0,395	0,335	0,551	0,790	1,087	1,403	1,822	2,404	2,659	3,045	3,453
sred.	-0,973	-0,897	-0,649	-0,378	-0,020	0,349	0,829	1,443	1,742	2,144	2,564
st.dev.	0,717	0,654	0,615	0,607	0,557	0,543	0,508	0,485	0,451	0,432	0,413

Tablica 2. *DGRF-magnetske deklinacije (D) za RH u epohama 1945,0 – 1990,0.*

D [°]	1945,0	1950,0	1955,0	1960,0	1965,0	1970,0	1975,0	1980,0	1985,0	1990,0
min.	-3,642	-3,038	-2,502	-2,031	-1,704	-1,496	-1,247	-0,656	-0,125	0,546
maks.	-0,980	-0,501	-0,007	0,419	0,697	0,790	0,916	1,403	1,830	2,370
sred.	-2,354	-1,837	-1,321	-0,867	-0,547	-0,378	-0,174	0,349	0,824	1,415
st.dev.	0,723	0,685	0,673	0,657	0,641	0,607	0,572	0,543	0,514	0,480

Tablica 3. *WMM-magnetske deklinacije (D) za RH u epohama 1990,0 – 2005,0.*

D [°]	1990,0	1995,0	2000,0	2005,0
min.	0,553	0,856	1,383	1,816
maks.	2,339	2,550	3,024	3,420
sred.	1,418	1,640	2,146	2,559
st.dev.	0,467	0,439	0,419	0,397

Za epohu 2002,0 IGRF i WMM-modeli na prostoru Hrvatske daju srednje vrijednosti deklinacije približno $+2,3^\circ$. Pritom i IGRF i WMM deklinacije pokazuju na području Hrvatske porast za približno $1,4^\circ$ od zapada prema istoku (slike 3 i 4).

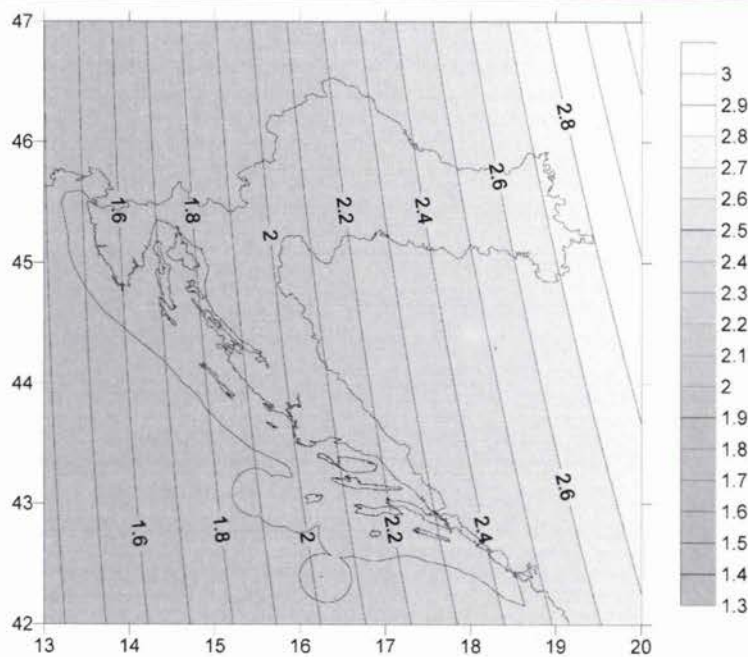
Statistike IGRF odnosno WMM-predikcija za epohu 2005,0 pokazuju nastavak trenda porasta vrijednosti deklinacija: minimalne vrijednosti iznose $1,787^\circ$ odnosno $1,816^\circ$, maksimalne $3,453^\circ$ odnosno $3,420^\circ$, a sredine $2,564^\circ$ odnosno $2,559^\circ$.

Napomenimo da su deklinacije za epohu 2002,0 i 2005,0 prediirane s pomoću koeficijena za osnovnu epohu 2000,0, te prema tomu nisu pouzdane kao i deklinacije izvedene iz prošlih modela osnovnih epoha. Pouzdanije vrijednosti očekuju se od idućih modela za osnovnu epohu 2005,0.

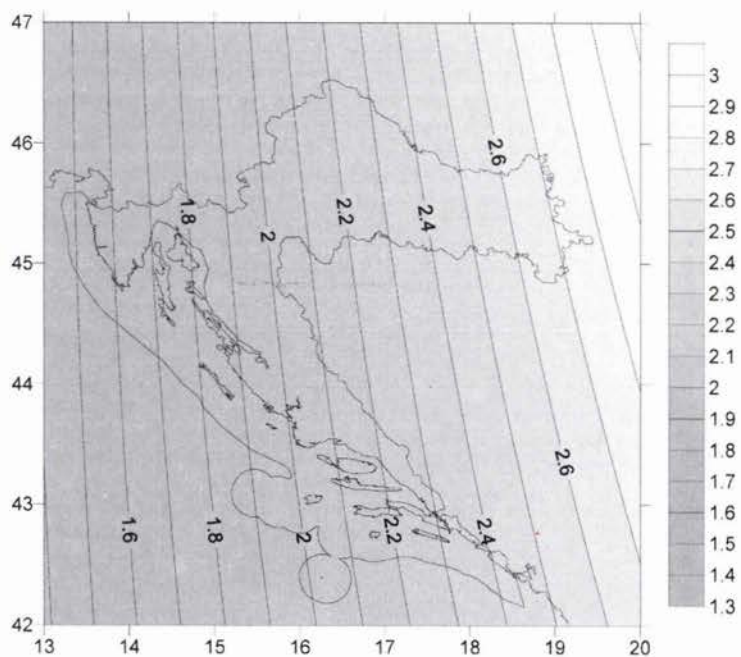
Usporedba IGRF i WMM-deklinacija na prostoru RH pokazuje male razlike odnosno podudaranje globalnih modela (tablica 4). Ekstremne razlike između izračunanih magnetskih deklinacija s pomoću modela IGRF2000 i WMM2000 a za epohu 2002,0 iznose 2 lučne minute.

Tablica 4. *Razlike IGRF i WMM-magnetske deklinacije (D) za RH u epohama 1900,0 – 2000,0.*

ΔD [']	1990,0	1995,0	2000,0
min.	-1,44	4,02	-2,04
maks.	3,90	7,26	1,26
sred.	1,53	6,14	-0,09
st.dev.	1,17	0,75	0,81



Slika 3. Magnetska deklinacija [lučni st.], model IGRF2000, epoha 2002,0.



Slika 4. Magnetska deklinacija [lučni st.], model WMM2000, epoha 2002,0.

Uz pomoć SV (*Secular Variation*) koeficijentata IGRF i WMM–geomagnetskih modela računane su godišnje promjene. Polagana, ali nepredvidljiva narav promjene prosječnih godišnjih vrijednosti magnetske deklinacije na prostoru Hrvatske vidljiva je iz tablica 5, 6 i 7.

Tablica 5. *IGRF godišnje promjene magnetske deklinacije (dD) za RH u epohama 1900,0 – 2000,0.*

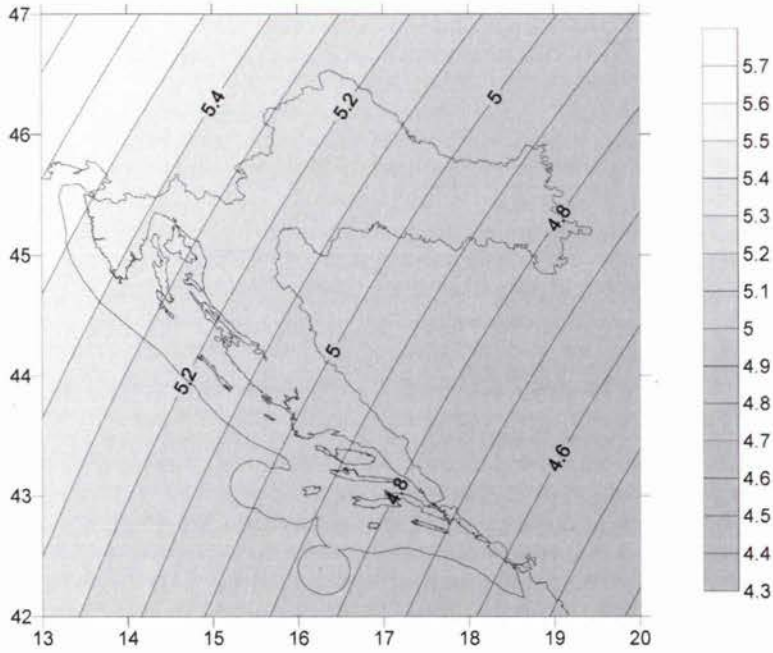
ΔD [°/god.]	1900,0	1905,0	1910,0	1915,0	1920,0	1925,0	1930,0	1935,0	1940,0	1945,0	1950,0
min.	4,606	6,388	8,855	9,293	9,515	9,126	8,123	6,964	5,824	7,301	6,360
maks.	5,159	6,796	9,066	9,782	10,408	10,523	9,751	8,515	6,221	7,479	7,419
sred.	4,878	6,586	9,015	9,564	9,970	9,840	8,955	7,770	6,017	7,362	6,983
st.dev.	0,118	0,085	0,042	0,120	0,201	0,300	0,350	0,344	0,099	0,038	0,267
ΔD [°/god.]	1955,0	1960,0	1965,0	1970,0	1975,0	1980,0	1985,0	1990,0	1995,0	2000,0	
min.	-0,713	3,551	3,144	1,517	1,262	5,025	5,154	3,441	2,788	4,382	
maks.	2,606	4,688	4,413	3,371	3,021	6,498	6,576	4,755	4,435	5,764	
sred.	0,911	4,208	3,796	2,460	2,171	5,760	5,853	4,094	3,599	5,041	
st.dev.	0,779	0,238	0,352	0,436	0,389	0,419	0,403	0,355	0,392	0,293	

Tablica 6. *DGRF godišnje promjene magnetske deklinacije (dD) za RH u epohama 1945,0 – 1990,0.*

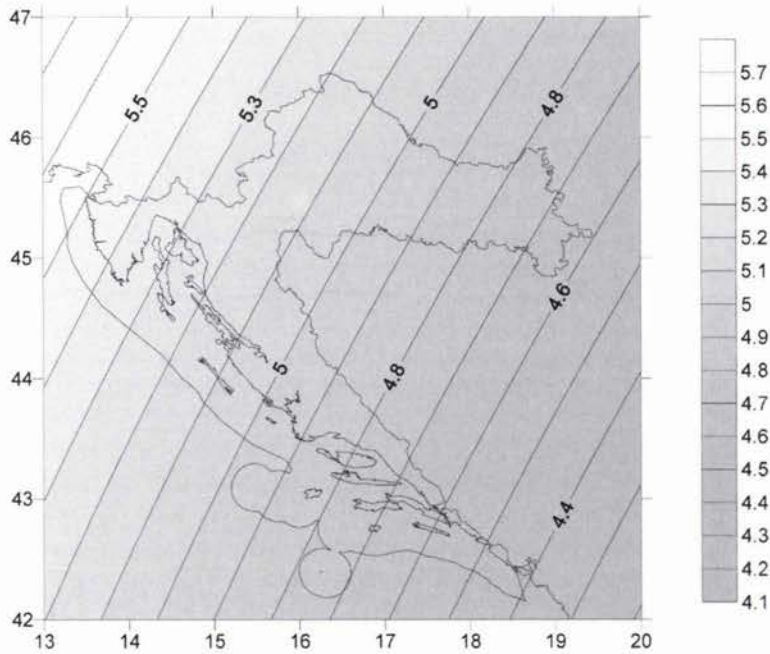
ΔD [°/god.]	1945,0	1950,0	1955,0	1960,0	1965,0	1970,0	1975,0	1980,0	1985,0	1990,0
min.	5,076	5,858	5,038	3,345	1,119	0,553	6,084	5,025	3,579	3,380
maks.	7,378	6,489	5,843	4,317	2,970	2,378	7,943	6,498	4,953	4,699
sred.	6,203	6,202	5,454	3,847	2,036	1,473	6,996	5,760	4,257	4,033
st.dev.	0,512	0,150	0,198	0,210	0,426	0,406	0,433	0,419	0,363	0,355

Tablica 7. *WMM godišnje promjene magnetske deklinacije (dD) za RH u epohama 1990,0 – 2000,0.*

ΔD [°/god.]	1990,0	1995,0	2000,0
min.	3,249	2,530	4,190
maks.	4,639	4,377	5,763
sred.	3,954	3,428	4,954
st.dev.	0,394	0,433	0,336



Slika 5. Godišnje promjene magnetske deklinacije [°/god.], IGRF2000, epoha 2002,0.



Slika 6. Godišnje promjene magnetske deklinacije [°/god.], WMM2000, epoha 2002,0.

Prosječna godišnja promjena za IGRF i WMM-modele i epohu 2002,0 pozitivna je i iznosi 5,0 lučnih minuta u godinu dana te ima smjer prirasta od jugoistoka ka sjeverozapadu (slike 3 i 4).

Godišnja promjena deklinacije za epohu 2004,0 prema IGRF modelu poprima minimalnu vrijednost 4,378, maksimalnu 5,751, a srednju 5,032, a prema WMM 4,187, 5,754 i 4,949 lučnih minuta na godinu.

Na kraju treba upozoriti na bliskost *normalnog* polja (geomagnetsko polje koje ostaje nakon oduzimanja vanjskih doprinosa i njima induciranih unutarnjih efekata), koje se pokušava odrediti geomagnetskom izmjerom, i *glavnog* polja, opisana globalnim geomagnetskim modelima. Prema tomu, za aktualne potrebe obnove zemljovida u Republici Hrvatskoj, razmatrani globalni WMM i IGRF-modele zanimljivi su jer mogu grubo, imajući u vidu sva navedena ograničenja, aproksimirati geomagnetske deklinacije i godišnje promjene s topografskih i drugih zemljovida.

Valja istaknuti da je poznavanje Zemljina magnetskog polja na prostoru Hrvatske moguće obogatiti jedino kontinuiranim opažanjem i periodičnim izmjerama elemenata polja. Na nužnost mjerenja elemenata polja indiciraju i nezanemarivi iznosi prostorne odnosno vremenske promjene globalne geomagnetske deklinacije. Podaci dobiveni redovitim mjerenjima omogućit će unapređenje ne samo lokalnih i regionalnih već povratno i globalnih modela geomagnetskih elemenata.

ZAHVALA. Rad je dijelom izrađen unutar zajedničkog projekta Ministarstva obrane Republike Hrvatske i Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, kojima se zahvaljujemo na potpori.

Literatura

- Bašić, T., Ž. Bačić (2000): Transformation between the Local and Global Geodetic Datum in Croatia. DGK-61, Report on the Symposium of the IAG Subcommission for Europe (EUREF), held in Tromsø, 22-24 Juni 2000, München.
- Cain, J. C. (1995): Main field and secular variation. U.S. National Report to IUGG, 1991-1994 Rev. Geophys. Vol. 33 Suppl., American Geophysical Union.
- Cain, J. C., O. Ajayi i D. Mozzoni (2000): Evaluating the secular variation of the IGRF-1995 and IGRF-2000. Geophysical Fluid Dynamics Institute and School of Computational Science and Information Technology, Florida State University, Tallahassee, Florida.
- GEOMAG (John M. Quinn National Geomagnetic Information Center U.S. Geological Survey).
- Quinn, J. M., R. J. Coleman, D. L. Shiel i J. M. Nigro (1995): The Joint US/UK 1995 Epoch World Magnetic Model. Technical Report # 314 (TR-314), U.S. Naval Oceanographic Office, Stennis Space Center, MS 39522-5001 USA.
- Lowrie, W. (1997): Fundamentals of Geophysics. Cambridge University Press, UK.
- Macmillan, S. i J. M. Quinn (2000): The Derivation of World Magnetic Model 2000. British Geological Survey Technical Report WM/00/17R. NERC 2000 British Geological Survey, Edinburgh.

- Olsen, N., T. J. Sabaka i L. Tøffner-Clausen (2000): Determination of the IGRF 2000 model, *Earth Planets Space*, 52, 1175-1182.
- Sharma, P. V. (1986): *Geophysical Methods in Geology*. Elsevier Science Publishing Co., Inc., New York.
- Skoko, D. (1992): O Zemljinom magnetskom polju. Savez društava za proučavanje i unapređenje pomorstva, Poseban otisak iz "Pomorskog zbornika", knjiga 30/1992, Rijeka.
- URL 1: IAGA Division V – Working Group 8, <http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/wg8> (5.9.2002.).

Geomagnetic Declination of the territory of the Republic of Croatia based on Global Geomagnetic Models

ABSTRACT. International Geomagnetic Reference Field (IGRF) and World Magnetic Model (WMM) global geomagnetic models were presented. The magnetic declination and its secular variation was calculated by application of expansion of spherical harmonics. The irregular and slow variation of the Earth's magnetic field long-wave component was observed for the previous century's base epochs. Estimated IGRF and WMM declination accuracy is within 1 degree, which is satisfactory for global application. Higher accuracy of the geomagnetic declination necessary for local purposes can be attained only by continuous measurements and periodic surveys of the Earth's magnetic field elements.

Keywords: global geomagnetic models, IGRF, WMM, magnetic declination, secular variation.

Prihvaćeno: 2003-2-18