

UDK 550.380(497.5):550.386:550.8.05:550.8.08

Izvorni znanstveni članak

Noćna opažanja geomagnetskog polja na sekularnoj točki POKUpsko

Danijel ŠUGAR, Matej VARGA, Matija CINDRIĆ – Zagreb¹

SAŽETAK. Prikazana je analiza noćnih opažanja magnetske deklinacije D i totalnog magnetskog intenziteta F na geomagnetskoj sekularnoj točki POKUpsko (POKU) te je dana usporedba sa simultanim podacima geomagnetskog opservatorija Tihany (THY) u Mađarskoj. Općenito, geomagnetsko polje mirnije je noću, kada se postižu opažanja manjih vrijednosti rasapa i raspona, a to omogućava pouzdanije i točnije određivanje geomagnetskih elemenata. Provedena je kroskorelacijska analiza simultanih opažanja koja je potvrdila sličnost varijacije geomagnetskog polja na opservatoriju THY i sekularnoj točki POKU. Noćna opažanja zahtjevnija su od dnevnih, a potrebna je i posebna mjerna oprema i organizacija mjerenja. Dana je analiza svih mjernih kampanja na točki POKU u razdoblju 2004–2012. te je pokazano da se noćnim opažanjima postižu najpouzdanije vrijednosti geomagnetskih elemenata. Provedbom prvoga noćnog opažanja geomagnetskog polja u Republici Hrvatskoj stečeno je vrijedno iskustvo te je testiran mjerni instrumentarij i oprema.

Ključne riječi: geomagnetska izmjera, dnevna varijacija, noćno polje, geomagnetski elementi, K_p -indeks.

1. Uvod

Dana 26. na 27. srpnja 2012. prvi su put u Hrvatskoj obavljena noćna opažanja geomagnetskog polja na HGSM (Hrvatska Geomagnetska Sekularna Mreža) točki POKUpsko (POKU). U noćnim opažanjima sudjelovali su mr. sc. Danijel Šugar, dipl. ing. geod., Matej Varga, mag. ing. geod. et geoinf. te student diplomskog studija na Geodetskom fakultetu Matija Cindrić, univ. bacc. ing. geod. et geoinf. Uobičajeno se geomagnetska izmjera provodi u ranim jutarnjim satima nakon izlaska Sunca ili u kasnim poslijepodnevrim satima prije njegovog zalaska. U tim terminima geomagnetsko je polje najmirnije, odnosno manji je efekt tzv. dnevne (diurnalne) varijacije (Newitt i dr. 1996, Mandea i Korte 2011). Opažanja geo-

¹ Mr. sc. Danijel Šugar, dipl. ing. geod., Matej Varga, mag. ing. geod. et geoinf., student Matija Cindrić, univ. bacc. ing. geod. et geoinf., Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Croatia, e-mail: dsugar@geof.hr, mvarga@geof.hr, macindric@geof.hr.

magnetskog polja u spomenutim razdobljima daju vrijednosti manjega rasapa, a osigurava se i pouzdanija naknadna redukcija geomagnetskih elemenata. Noćna opažanja geomagnetskog polja na sekularnoj točki POKU obavljena su u sklopu međunarodnoga znanstvenog projekta *Joint Croatian-Hungarian Geomagnetic Survey and Model* (MZOS 2009–2012).

2. Pregled dosadašnjih istraživanja

Prema Newitt i dr. (1996) geomagnetsko polje tijekom noći (engl. *night-time field*) definira se kao polje tijekom najmanje poremećena dijela dana. Općenito, ne može se pretpostaviti da je polje tijekom noći neporemećeno, već je ono neporemećeno (engl. *undisturbed night-time field*) samo onda kada nema utjecaja vanjskoga polja. Razlika između noćnog polja i neporemećenoga noćnog polja je u tome što noćno polje može biti pomaknuto od neporemećenog polja zbog, primjerice, naknadnih efekata magnetske oluje (*ibid.*). Zbog smanjene dnevne varijacije preporuča se obavljanje geomagnetskih opažanja rano ujutro i/ili u kasno predvečerje, a noćna su opažanja još i bolja. Nedostaci rada po noći kompenzirani su manjim brojem potrebnih apsolutnih opažanja te postignutom poboljšanom točnošću. Općenito, uvjeti opažanja stabilniji su tijekom noći (manje vjetrovito vrijeme, manje temperaturne varijacije i smanjene ljudske aktivnosti, a samim time i razina civilizacijskog šuma). U područjima geomagnetskih širina 30°–55° na sjevernoj i južnoj Zemljinoj hemisferi (a to je pojas kojem i Hrvatska pripada) veća je vjerojatnost da je polje manje poremećeno u razdoblju između 0 i 3 sata po lokalnom vremenu, tj. u srednjoeuropskoj vremenskoj zoni to odgovara vremenu 23 do 2 sata UTC. Poznato je da su se noćna opažanja izvodila u SAD-u (Brkić 2012).

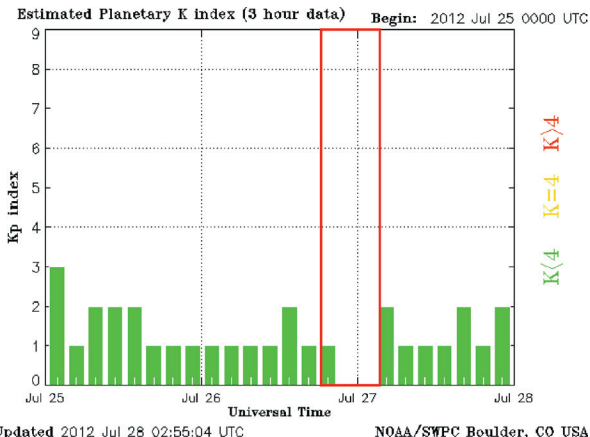
3. Obavljena noćna opažanja

Za opažanja geomagnetskog polja korištena je klasična oprema koja se sastoji od nemagnetičnog teodolita Zeiss Theo 010B s fluxgate sondom na nemagnetičnom stativu (opažanje magnetske deklinacije D i inklinacije I), elektroničke jedinice Bartington Mag-010H te protonsko-precесиjskog magnetometra (PPM) GEMSys GSM-19G (opažanje totalnoga magnetskog intenziteta F). Opažane vrijednosti D i I s odgovarajućim UTC vremenima bilježene su na prijenosnom računalu primjenom softvera *D-I-F Survey*, a istovremeno je vođen i terenski zapisnik u analognom obliku. Za potrebe orijentacije nemagnetičnog teodolita signalizirana je geomagnetska orijentacijska točka GOT2 za koju je poznat elipsoidni (geodetski) azimut u službenome referentnom sustavu RH – HTRS96, odnosno na referentnom elipsoidu GRS80 (Šugar i dr. 2012). Za signalizaciju je poslužila posebna mjerna značka u kojoj se nalazi žaruljica spojena na vanjsku bateriju, čime je omogućeno viziranje orijentacijske točke u mraku (vidi sliku 1).

Za očitavanje elektroničke jedinice u mraku te za očitavanje horizontalnoga i vertikalnoga kruga na optičkom teodolitu korištena je naglavna lampa, u kojoj su izvor svjetlosti LED diode. Zbog utvrđene male, ali ipak nezanemarive magnetičnosti naglavne lampe, ona je približavana teodolitu samo u trenucima očitavanja krugova



Slika 1. Signalizacija točke GOT2.



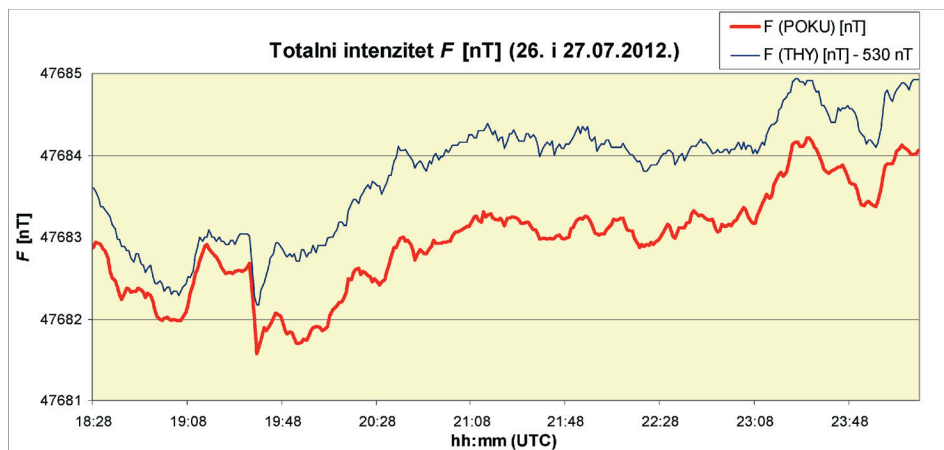
Slika 2. Kp-indeks tijekom opažanja (URL 1).

i osvjetljavanja nitnoga križa teodolita. Tijekom pripreme za noćna opažanja planirano je za osvjetljavanje očitavanja na elektroničkoj jedinici te za očitavanja krugova na optičkom teodolitu upotrebljavati tzv. svjetleće štapiće (engl. *glow sticks*). Uobičajeno se takvi štapići sastoje od veće vanjske plastične ampule ispunjene jednom tekućinom, dok se u unutarnjoj staklenoj kapsuli nalazi druga tekućina. Puknućem staklene kapsule i miješanjem dviju tekućina dolazi do kemiluminescentne reakcije i emisije svjetlosti (URL 2). Nažalost, na taj način emitirana svjetlost nije dovoljna za planiranu namjenu, međutim, svjetleći štapići pokazali su se korisnima za obilježavanje položaja opreme (PPM, elektronička jedinica i dr.) u mraku. Na udaljenosti 582,43 m od orijentacijske točke GOT2, osvjetljeni signal mogao se dobro vizirati uz prethodno osvjetljavanje nitnoga križa nemagnetičnog teodolita. Međutim, zbog konfiguracije okolne doline i blizine rijeke Kupe, često se stvara magla za vedra i mirna vremena, što posljedično otežava vidljivost, a ponekad ju i potpuno onemogućava.

4. Analiza i interpretacija rezultata noćnih opažanja

Tijekom opažanja geomagnetsko je polje bilo vrlo mirno, što je i vidljivo na magnetogramu totalnoga magnetskog intenziteta F (vidi sliku 3). Na slici 3 su vrijednosti F na opservatoriju THY umanjene za 530 nT kako bi ih se moglo vizualno usporediti na grafičkom prikazu. Naime, tijekom opažanja, koje je trajalo 5 sati i 49 minuta (početak opažanja u 18:28 UTC 26. 07. 2012., kraj opažanja u 00:17 UTC 27. 07. 2012.), F se mijenjao u rasponu od samo 2,6 nT. O mirnoći polja govori i grafički prikaz Kp-indeksa, koji je za vrijeme opažanja imao vrijednosti 0–1 (vidi sliku 2), što je terenska ekipa rijetko imala prilike susresti tijekom dosadašnjih geomagnetskih izmjera.

Iako su opažanja F obavljena s intervalom uzorkovanja 3 sekunde, zbog potrebe izrade magnetograma (slika 3), daljnje analize i usporedbe s podacima geo-



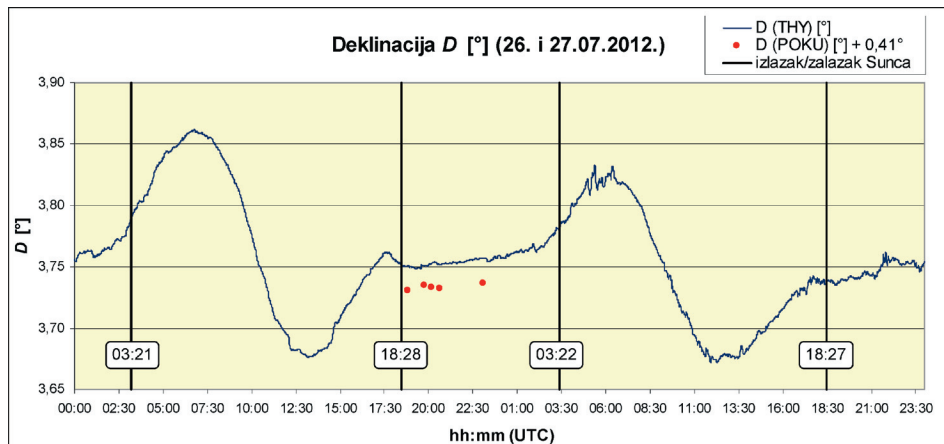
Slika 3. Minutni srednjaci F [nT] na točki POKU i opservatoriju THY (umanjeni za 530 nT) u vremenskom intervalu od 18:28 do 00:17 UTC (26–27. 07. 2012.).

magnetskog opservatorija Tihany (THY) u Mađarskoj izračunani su minutni srednjaci.

Minutni srednjaci F izračunani su primjenom Gaussova filtra sukladno standardima organizacije INTERMAGNET. Algoritam Gaussova filtra dan je u Janovsky i Sucksdorff (1996), dok su njegovi koeficijenti preuzeti iz publikacije *INTERMAGNET Technical Reference Manual, verzija 4.5* (2011) (URL 3). Minutni srednjaci izračunani su na osnovi trosekundnih opažanja i centrirani na punu minutu (00:30 – 01:29), što je u skladu sa standardima organizacije INTERMAGNET (*ibid.*) i IAGA2002 formatom podataka (URL 4) u kojem su dani i podaci opservatorija THY. Na slici 3 debljom su krivuljom prikazani minutni srednjaci F opažani na točki POKU, dok su minutni srednjaci F opažani na opservatoriju THY i umanjeni za 530 nT prikazani tankom krivuljom. Jasno je uočljiv sličan hod magnetograma F na točki POKU i opservatoriju THY. Totalni intenzitet F opažan je na pomoćnoj točki (POM) udaljenoj 7,07 m od sekularne točke POKU. Na osnovi prethodno određene razlike totalnih intenziteta $F(\text{POM}) - F(\text{POKU})$, opažanja su svedena na sekularnu točku POKU.

Tijekom opažanja F , na sekularnoj su točki primjenom nul-metode određivane vrijednosti deklinacije D i inklinacije I kroz ukupno 5 nizova, tj. setova mjerenja. Iako je bilo planirano obaviti puno veći broj setova mjerenja tijekom cijele noći, mjerenja su iznenadno prekinuta nedugo nakon 23 sata UTC zbog jake kiše. Konzola PPM-a, elektronička jedinica i sâm nemagnetični teodolit Zeiss Theo 010B s fluxgate sondom su za trajanja nevremena bili zaštićeni vodonepropusnim navlakama. Opažanja F nastavljena su do prestanka kiše, kada su prekinuta, a cjelokupni mjerni instrumentarij i oprema su sklonjeni.

Vrijednosti deklinacije D opažane na sekularnoj točki POKU, a zbog potrebe vizualizacije na grafičkom prikazu uvećane za $0,41^\circ$, zajedno su s vrijednostima D na opservatoriju THY za dane 26. i 27. 07. 2012. prikazane na slici 4. Magnetogram D na opservatoriju THY prikazan je tankom krivuljom, dok su vrijednosti D



Slika 4. Vrijednosti D [°] na opservatoriju THY i opažane na točki POKU uvećane za $0,41^\circ$ (26. i 27. 07. 2012.). Naznačeni su trenuci izlaska i zalaska Sunca na THY (UTC).

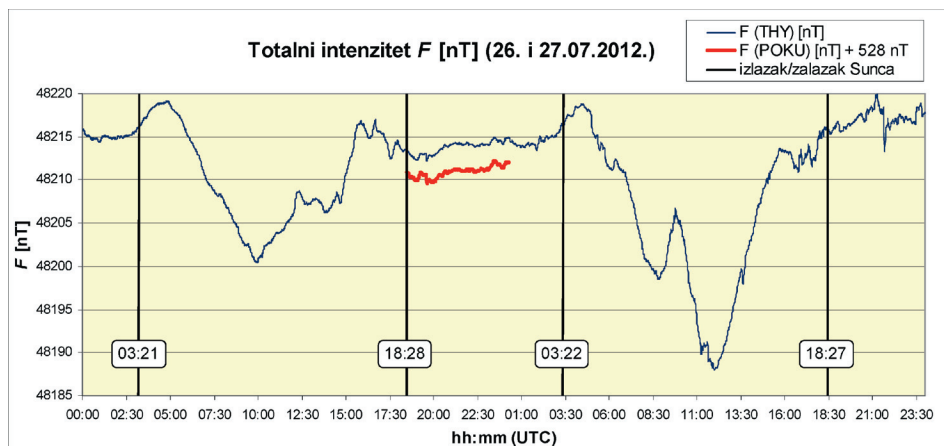
na točki POKU prikazane crvenim točkama. Na slici 4 su također naznačena vremena izlaska i zalaska Sunca na opservatoriju THY.

Navedena vremena izlaska i zalaska Sunca izračunana su pomoću *on-line* kalkulatora *National Oceanic and Atmospheric Administration – Earth System Research Laboratory (NOAA-ESRL)* (URL 5), a izražena su u vremenskoj skali UTC.

U danima uzetim u razmatranje (26. i 27. 07. 2012.) Sunce na sekularnoj točki POKU izašlo je oko 13 minuta kasnije, a zašlo oko 3 minute kasnije u usporedbi s opservatorijem THY. Zbog malih vremenskih razlika, u daljnjem će se razmatranju smatrati da su se izlasci, odnosno zalasci Sunca na sekularnoj točki POKU i opservatoriju THY događali istovremeno.

Na slici 4 naznačena su tri karakteristična vremenska intervala: dana 26. 07. 2012. kada je Sunce bilo iznad horizonta (03:21 – 18:28 UTC), noć s 26. na 27. 07. 2012. (18:29 – 03:21 UTC) kada je Sunce bilo ispod horizonta te dana 27. 07. 2012. (03:22 – 18:27 UTC) kad je Sunce ponovno bilo iznad horizonta. Razlike između maksimalne i minimalne vrijednosti D u navedenim vremenskim intervalima iznose: 11,2', 2,0' i 9,7'. Iz magnetograma D na slici 4 te iz vrijednosti spomenutih raspona jasno je uočljivo zašto je pouzdanije opažanja geomagnetskog polja provoditi tijekom noći. Naravno, to vrijedi u uvjetima malih aktivnosti Zemljine magnetosfere. Zbog malog raspona varijacije I na opservatoriju THY kroz dane 26. i 27. 07. 2012. od samo 139" te raspona I na točki POKU kroz sve setove opažanja od 14", taj geomagnetski element u nastavku ovoga rada nije uzet u razmatranje.

Poput analize opažanja deklinacije D , slična se analiza može provesti i za opažanje totalnoga magnetskog intenziteta F . Na slici 5 tankom je krivuljom prikazan magnetogram F opažan na opservatoriju THY 26. i 27. 07. 2012., a debljom su krivuljom prikazane i vrijednosti F opažane na točki POKU uvećane za 528 nT kako



Slika 5. Vrijednosti F [nT] na opservatoriju THY i opažane na točki POKU uvećane za 528 nT (26. i 27. 07. 2012.). Naznačena su vremena izlaska i zalaska Sunca na THY (UTC).

bi ih se moglo vizualno usporediti. Također, na slici 5 naznačena su vremena izlaska i zalaska Sunca na opservatoriju THY prikazana u vremenskoj skali UTC, čime su određena tri karakteristična vremenska intervala. Razlike između maksimalne i minimalne vrijednosti F za intervale dana 26. 07. 2012. kada je Sunce bilo iznad horizonta, za noć s 26. na 27. 07. 2012. te vremenski interval kada je Sunce bilo iznad horizonta na opservatoriju THY dane su kako slijedi: 18,8 nT, 4,4 nT i 30,8 nT.

Zbog znatno manjeg raspona varijacije F tijekom noći u odnosu na one tijekom dana, i ovdje opažanja tijekom noći vode pouzdanijim mjernim i reduciranim vrijednostima. Usporedbom magnetograma F na točki POKU i opservatoriju THY uočava se sličnost oblika varijacije.

5. Usporedba vremenskih nizova opažanja na točkama POKU i THY

Na grafičkom prikazu totalnoga magnetskog intenziteta F (vidi sliku 3) opažanog na sekularnoj točki POKU i onog opažanog na opservatoriju THY, a zbog potreba vizualizacije umanjenog za 530 nT, vidljivo je njihovo dobro međusobno slaganje što se očituje kroz gotovo paralelne magnetograme. Da bi se dobio uvid u eventualne vremenske pomake simultano opažanog F na sekularnoj točki POKU i opservatoriju THY, provedena je analiza pomoću tzv. kroskorelacije (engl. *cross-correlation*). Kroskorelacija vremenskih nizova neke mjerene veličine je mjera stupnja linearne povezanosti tih dvaju vremenskih nizova. Visoka korelacija između vremenskih nizova pri određenom vremenskom pomaku (engl. *lag*) može upućivati na kašnjenja ili brzanja sustava (Mathworks 2012). Definiramo li dva vremenska niza mjerenih veličina $x(i)$ i $y(i)$, gdje je $i = 0, 1, 2, \dots, N-1$, tada je kroskorelacija $r(d)$ pri vremenskom pomaku d dana izrazom (URL 6):

$$r(d) = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} [(x(i) - mx) \cdot (y(i-d) - my)]}{\sqrt{\sum_{i=0}^{N-1} (x(i) - mx)^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=0}^{N-1} (y(i-d) - my)^2}}, \quad (1)$$

gdje su mx i my aritmetičke sredine nizova mjerenih vrijednosti $x(i)$, odnosno $y(i)$. Ako se izraz (1) primijeni za sve vremenske pomake $-(N-1) \leq d \leq N-1$, tada se niz vrijednosti $r(d)$ sastoji od $2(N-1) + 1 = 2N - 1$ elemenata. Kada se kroskorelacija računa za dva vremenska niza za pomake d iz intervala $-(N-1) < d < N-1$, tada se niz $r(d)$ sastoji od $(2d + 1)$ elemenata. Iz izraza (1) slijedi da $r(d)$ može poprimiti vrijednosti iz intervala $-1 \leq r(d) \leq 1$ sa sljedećim značenjima:

- za $r(d) \approx 1$ porast veličina iz vremenskog niza $x(i)$ odgovara porastu veličina iz vremenskog niza $y(i)$,
- za $r(d) \approx 0$ varijacija veličina iz vremenskog niza $x(i)$ nije povezana s varijacijom veličina iz vremenskog niza $y(i)$,
- za $r(d) \approx -1$ porast veličina iz vremenskog niza $x(i)$ odgovara smanjenju veličina iz vremenskog niza $y(i)$ pri vremenskom pomaku d (Mathworks 2012).

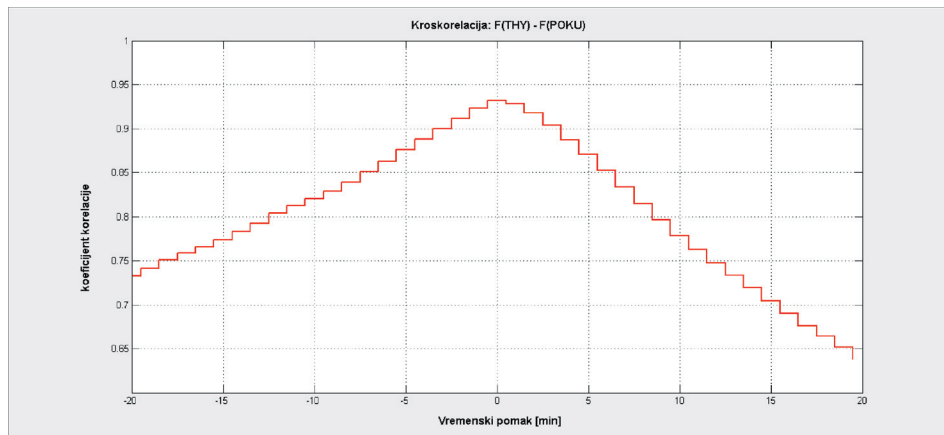
Za računanje kroskorelacije između opažanja totalnog intenziteta F na sekularnoj točki POKU i opservatoriju THY korišteno je 350 minutnih srednjaka opažanih na sekularnoj točki POKU (vidi slike 4 i 5) i 2880 minutnih srednjaka opažanih na opservatoriju THY. Računanje je provedeno u *Time Series Tool* u sklopu *Matlaba*, programskog jezika i interaktivne okoline za numerička računanja. Razlika geodetskih dužina opservatorija THY i sekularne točke POKU iznosi

$$\lambda(THY) - \lambda(POKU) = 1^{\circ}54'34'', \quad (2)$$

što odgovara vremenskoj razlici od 7 minuta i 37 sekundi uzimajući u obzir približno trajanje srednjega zvjezdanog dana od 23 sata 56 minuta i 4,0916 sekundi (URL 7). Zato je odlučeno provesti računanje kroskorelacije za vremenske pomake d iz intervala $-20 \leq d \leq 20$ minuta. Najveća vrijednost kroskorelacije između vremenskih nizova totalnog intenziteta F opažanog na sekularnoj točki POKU i opservatoriju THY je za vremenski pomak $d = 0$ minuta, gdje je najveća vrijednost $r(d) = r(0) = 0,9321$. Grafički prikaz kroskorelacije totalnoga magnetskog intenziteta F na sekularnoj točki POKU i opservatoriju THY dan je na slici 6.

Na slici 6 zorno je prikazana distribucija kroskorelacije F između opservatorija THY i točke POKU u ovisnosti o vremenskom pomaku d . Kroskorelacija ima najveću vrijednost kada je vremenski pomak $d = 0$ minuta, što se moglo naslutiti iz magnetograma F na slici 3. Pozitivni iznosi kroskorelacije, tj. koeficijentata korelacije govore da porastu F na sekularnoj točki POKU odgovara porast F na opservatoriju THY, što također slijedi iz slike 3.

Da bi se provelo računanje kroskorelacije između vremenskih nizova nekoga geomagnetskog elementa potrebno je imati podatke prikupljene s istim intervalom uzorkovanja. Ako ih nema, tada podatke opažanja treba numerički uzorkovati (interpolirati) prije računanja kroskorelacije jer kroskorelacijska analiza uzima u



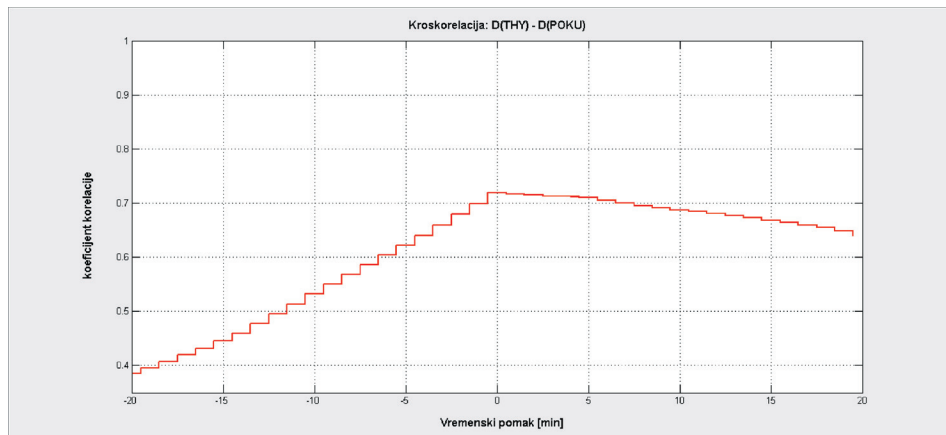
Slika 6. Kroskorelacija totalnoga magnetskog intenziteta F između opservatorija THY i točke POKU. Na apscisnoj osi su vremenski pomaci u minutama, a na ordinatnoj osi koeficijenti korelacije.

obzir samo vremenske pomake između podataka, a ne vrijeme proteklo između uzastopnih opažanja (Mathworks 2012).

Pri totalnom intenzitetu F jednaki su intervali uzorkovanja postignuti računanjem minutnih srednjaka na točki POKU i preuzimanjem minutnih srednjaka opservatorija THY. Za deklinaciju D na opservatoriju THY poznati su minutni srednjaci, no na sekularnoj točki POKU deklinacija D određena je iz vremenski nejednoliko razmaknutih pet setova.

Prilikom kroskorelacijske analize deklinacije D unutar *Time Series Toola* provedena je linearna interpolacija opažanih vrijednosti D na POKU u intervalu od 18:51 do 23:05 UTC 26. 07. 2012., što uključuje 255 minutnih vrijednosti (od kojih je samo 5 opažano, a ostale su interpolirane). Na osnovi minutnih srednjaka s točke POKU i opažanih 2880 minutnih srednjaka D s opservatorija THY opažanih 26. i 27. 07. 2012. provedeno je računanje kroskorelacije. Kao i pri totalnom intenzitetu F , maksimalna vrijednost kroskorelacije dobivena je za vremenski pomak $d = 0$ minuta, tj. $r(d) = r(0) = 0,7187$. Slično kao i za totalni intenzitet F , kroskorelacijska analiza provedena je za vremenske pomake $-20 \leq d \leq 20$ minuta. Iako je maksimalna vrijednost kroskorelacije D između opservatorija THY i sekularne točke POKU manja nego pri totalnom intenzitetu F , ona je i ovdje pozitivna što znači da porastu D na opservatoriju THY odgovara porast D na sekularnoj točki POKU.

Iako su podaci deklinacije D opažani na sekularnoj točki POKU diskontinuirani, u sklopu kroskorelacijske analize s kontinuiranim podacima deklinacije D na opservatoriju THY dobiven je kontinuirani prikaz s najvećom vrijednošću za vremenski pomak $d = 0$ minuta (vidi sliku 7). Takve rezultate treba interpretirati s oprezom. Naime, deklinacija D na sekularnoj točki POKU određena je iz četiri mjerna položaja unutar pojedinog seta primjenom nul-metode i vremenski je centrirana na središnji trenutak pojedinog seta. Deklinacija D na opservatoriju je određena iz minutnih srednjaka opažanja variometra čime je dobiven kontinuirana-



Slika 7. Kroskorelacija deklinacije D između opservatorija THY i točke POKU. Na apscisnoj osi su vremenski pomaci u minutama, a na ordinatnoj osi koeficijenti korelacije.

ni niz podataka. Zbog potrebe računanja kroskorelacije između D na opservatoriju THY i na sekularnoj točki POKU, obavljena je linearna interpolacija D na točki POKU, čime su dobiveni kontinuirani podaci. Takvi podaci vrlo vjerojatno ne odgovaraju stanju lokalnoga geomagnetskog polja na sekularnoj točki POKU, a samim time ni fizikalnoj realnosti. Nadalje, vremenski interval podataka deklinacije D na točki POKU traje 95 minuta kraće od vremenskog intervala totalnog intenziteta F na točki POKU. Dakle, uzimajući u obzir do sada izneseno, iako se numeričke vrijednosti kroskorelacijske analize D i F na opservatoriju numerički dobro podudaraju, upitno je fizikalno značenje kroskorelacije D između opservatorija THY i sekularne točke POKU. Provedena je i kroskorelacija deklinacije D između opservatorija THY i sekularne točke POKU, ali bez vrijednosti iz prvog seta opterećenog vjerojatnom pogreškom orijentacije: maksimalna vrijednost kroskorelacije iznosi 0,7879, a postiže se za vremenski pomak $d = -2$ minute. Za potpunu i smislenu provedbu kroskorelacijske analize deklinacije D potrebno je imati kontinuirana opažanja na sekularnoj točki POKU, za što je nužno korištenje terenskog variometra.

6. Analiza opažanih vrijednosti D i F na točki POKU za razdoblje 2004–2012.

Geomagnetske sekularne točke mreže HGSM stabilizirane su i uspostavljene u ljeto 2004. godine (Brkić i dr. 2005). U sklopu uspostave mreže obavljena su i geomagnetska opažanja, čime su određene vrijednosti geomagnetskih elemenata D , I , F (Brkić i dr. 2006). Mreža HGSM je 2008. godine proširena za dodatne dvije točke na otocima Lošinj i Palagruži, čime je dostigla svoj današnji oblik (Brkić i dr. 2011). Točka mreže HGSM koja je bila prva uspostavljena i na kojoj je obavljena geomagnetska izmjera je POKU. Na toj se točki od njezine uspostave do danas

kontinuirano svake godine provode opažanja geomagnetskog polja. Taj kontinuirani niz omogućio je određivanje i praćenje sekularne varijacije, te je temelj za analizu statističkih pokazatelja opažanih (sirovih) vrijednosti D i F . Kao statistički pokazatelji opažanih geomagnetskih elemenata koriste se rasap i raspon. Raspon vrijednosti definiran je kao razlika najveće i najmanje vrijednosti opažanoga geomagnetskog elementa, dok se rasap (mjera pouzdanosti sukladno preporukama *Magnetic Network in Europe – MagNetE*) definira kao veća vrijednost između apsolutne vrijednosti razlike maksimalne (E_{max}) i srednje (E_{sred}) vrijednosti, odnosno apsolutne vrijednosti razlike minimalne (E_{min}) i srednje vrijednosti geomagnetskog elementa, tj.

$$rasap = maks \{ |E_{max} - E_{sred}|, |E_{min} - E_{sred}| \}. \quad (3)$$

U tablici 1 dani su podaci o svim provedenim geomagnetskim izmjerama D na sekularnoj točki POKU u razdoblju 2004–2012: datum opažanja, broj opažanih setova, vrsta seta (jutarnji/dnevni/večernji/noćni), rasap D ["], raspon D ["], trajanje seta (od trenutka prvog očitavanja do posljednjeg očitavanja D), omjer rasapa D i trajanja setova ["/sat], omjer raspona D i trajanja setova ["/sat] te na kraju vrijednosti Kp -indeksa za trosatne vremenske intervale.

Tablica 1. Statistički pokazatelji opažanih vrijednosti deklinacije D na točki POKU za razdoblje 2004–2012.

Datum opažanja	Br. setova	Set	Rasap D ["]	Raspon D ["]	Trajanje (hh:mm:ss)	(Rasap D) /trajanje ["/sat]	(Raspon D) /trajanje ["/sat]	Kp -indeks
03.06.2004.	4	jutarnji	202	372	3:24:50	59	109	1
03.06.2005.	4	jutarnji	68	120	1:44:26	39	69	2
08.09.2005.	4	dnevni	28	39	0:29:28	57	79	1
18.07.2006.	5	jutarnji	95	138	1:53:51	73	50	0
17.10.2007.	7	jutarnji	171	297	2:31:27	68	118	0
17.10.2007.	4	večernji	28	52	0:34:31	49	90	0
31.05.2008.	4	jutarnji	124	195	1:47:29	69	109	2
31.05.2008.	4	večernji	18	33	0:47:59	23	41	2
01.06.2008.	4	jutarnji	126	232	1:09:30	109	200	1
18.06.2009.	4	jutarnji	11	18	0:46:29	14	23	0
18.06.2009.	4	večernji	42	71	0:48:05	52	89	1
19.07.2010.	7	večernji	27	48	1:26:36	19	33	1–2
20.07.2010.	5	jutarnji	35	53	0:58:41	36	54	1
14.04.2011.	4	jutarnji	55	106	1:08:03	49	94	1–2
14.04.2011.	4	večernji	16	31	0:57:06	17	33	3
04.07.2011.	5	jutarnji	26	39	1:18:35	20	30	2
04.07.2011.	5	večernji	136	176	0:54:00	151	196	3–4
26.07.2012.	5	večernji/ noćni	23	33	4:18:22	5	8	0–1

Iz tablice 1 vidljivo je da je pri svakoj izmjeri opažanje D obavljeno u najmanje četiri seta radi dobivanja pouzdanih mjernih, a poslije i reduciranih vrijednosti. Statistički pokazatelji u tablici 1 izračunani su na osnovi svih opažanih vrijednosti D na sekularnoj točki POKU u razdoblju 2004–2012.

Izmjera koja se sastoji od najmanje četiri seta opažanja pruža utvrđivanje konzistentnosti rezultata i prepoznavanje seta opterećenoga grubom pogreškom (Šugar 2008). Rasapi i rasponi vrijednosti D variraju ovisno o broju setova, odnosno o njihovom vremenu trajanja te o stanju geomagnetskog polja, što je na globalnoj razini karakterizirano vrijednošću Kp -indeksa. S obzirom na činjenicu da su vrijednosti geomagnetskih elemenata funkcija vremena, očekuje se da će u setovima koji su dulje trajali biti i veće vrijednosti rasapa, odnosno raspona. Stoga su uvedene veličine omjera rasapa i trajanja setova, odnosno raspona i trajanja setova. Ako se analiziraju iznosi rasapa i raspona D za sve mjerne kampanje u razdoblju 2004–2012., uočljivo je da su najmanje vrijednosti postignute 18. 06. 2009. tijekom jutarnjih setova. Da na vrijednosti rasapa i raspona ima utjecaja Kp -indeks zorno prikazuju večernji setovi 18. 06. 2009. kada je vrijednost Kp -indeksa bila 1, za razliku od jutarnjih setova kada je njegova vrijednost bila 0. Potrebno je istaknuti da ostvarene vrijednosti rasapa i raspona D ovise o više izvora pogrešaka, poput točnosti orijentacije, točnosti horizontiranja teodolita, osobne pogreške opažača i stanja lokalnoga geomagnetskog polja na točki koje ne mora biti uvijek u skladu s vrijednošću globalnoga Kp -indeksa. Posljednje posebice proizlazi iz jutarnjih i večernjih setova opažanja 14. 04. 2011. Naime, rasapi i rasponi iz večernjih setova toga su dana bili znatno manji od jutarnjih, iako je navečer Kp -indeks iznosio 3, a tijekom jutarnjih setova bio je u rasponu 1–2. U svakom slučaju, najmanji omjeri rasapa, odnosno raspona D i trajanja setova ostvareni su upravo iz noćnih opažanja. Iako rasponi i rasapi nisu po svom iznosu najmanji, najdulje je trajanje setova što je dovelo do najmanjih vrijednosti omjera rasapa, odnosno raspona D i trajanja setova.

Ako se iz razmatranja izuzme D iz prvog seta opažanja 26. 07. 2012., rasap iznosi samo 8", a raspon 12" uz trajanje setova 3 sata i 24 minute. U tom slučaju omjer rasapa i trajanja iznosi 2"/sat, odnosno 4"/sat, što su najmanje vrijednosti iz svih razmatranih geomagnetskih izmjera na sekularnoj točki POKU u razdoblju 2004–2012. Te vrijednosti potvrđuju činjenicu da je geomagnetsko polje najmirnije tijekom noći. Otežani uvjeti opažanja noću zauzvrat nude pouzdanije i konzistentnije vrijednosti geomagnetskih elemenata. Opravdanost isključivanja D iz prvoga seta opažanja 26. 07. 2012. iz ove analize uočljiva je i sa slike 4. Naime, prilikom orijentacije nemagnetičnog teodolita na početku svakoga seta viziralo se na signaliziranu GOT-točku u dva položaja durbina (I i II) te se iz ta dva opažanja računala srednja vrijednost:

$$M = (I + II \pm 180^\circ)/2, \quad (4)$$

$$D = DEKL + (Az - M). \quad (5)$$

Razlika između azimuta Az (sa sekularne prema orijentacijskoj GOT-točki) i srednje vrijednosti M dodaje se vrijednosti $DEKL$ izračunanoj na osnovi četiriju očitavanja sukladno postupcima nul-metode kako bi se dobila mjerena vrijednost deklinacije D (Jankovsky i Sucksdorff 1996, Mingeo 2005). Razlika $(Az - M)$ prilikom

orijentacije nemagnetičnog teodolita na početku prvoga seta od prosječne se razlike (A_z-M) iz preostalih četiriju setova (sa standardnim odstupanjem 3") razlikuje za 16". Ta se razlika može dovesti u vezu s pogreškom orijentacije na početku prvoga seta, koja je vjerojatno uzrokovana promjenom stanja bočne refrakcije koja se događa u vremenima oko izlaska, odnosno zalaska Sunca. Pojava pomaka slike vizurne točke oko nekog srednjeg položaja s većim periodom (i do nekoliko minuta) poznata je u literaturi pod imenom "lebdenje" ili "vučenje" slike. Uzrok je te pojave pomicanje čitavog sloja toplog zraka, a pojavljuje se ujutro i navečer (Benčić i Solarić 2008). S tom se pojavom terenska ekipa susrela u više navrata tijekom dosadašnjih geomagnetskih izmjera. Pritom treba istaknuti da je orijentacija nemagnetičnog teodolita prije svakoga seta opažanja deklinacije obavljena viziranjem signala za noćna opažanja na GOT2, iako je signal na početku prvoga seta bio dobro vidljiv zbog danjeg svjetla (vidi sliku 4). Također, na početku svakoga seta kontrolirana je horizontalnost instrumenta.

Za trenutke opažanja deklinacije D bilježena su i opažanja totalnog intenziteta F . Slično kao i za D , na osnovi četiriju opažanja izračunana je srednja vrijednost F koja vremenski odgovara srednjoj vrijednosti D iz pojedinog seta. Za sve mjerne kampanje u razdoblju 2004–2012. napravljena je analiza opažanih vrijednosti F , a numerički podaci prikazani su u tablici 2.

Tablica 2. Statistički pokazatelji opažanih vrijednosti totalnoga magnetskog intenziteta F na točki POKU za razdoblje 2004–2012.

Datum opažanja	Br. setova	Set	Rasap F [nT]	Raspon F [nT]	Trajanje (hh:mm:ss)	(Rasap F) /trajanje [nT/sat]	(Raspon F) /trajanje [nT/sat]	K_p -indeks
03.06.2004.	4	jutarnji	5,6	10,8	3:24:50	1,6	3,2	1
03.06.2005.	4	jutarnji	1,8	3	1:44:26	1,0	1,7	2
08.09.2005.	4	dnevni	1,6	3,2	0:29:28	3,3	6,5	1
18.07.2006.	5	jutarnji	8,4	13,8	1:53:51	4,4	7,3	0
17.10.2007.	7	jutarnji	---	---	---	---	---	0
17.10.2007.	4	večernji	0,3	0,6	0:34:31	0,5	1,0	0
31.05.2008.	4	jutarnji	6,2	9,4	1:47:29	3,5	5,2	2
31.05.2008.	4	večernji	1,6	3,2	0:47:59	2,0	4,0	2
01.06.2008.	4	jutarnji	0,8	1,4	1:09:30	0,7	1,2	1
18.06.2009.	4	jutarnji	2,5	5	0:46:29	3,2	6,5	0
18.06.2009.	4	večernji	2,1	3,1	0:48:05	2,6	3,9	1
19.07.2010.	7	večernji	1,2	2,3	1:26:36	0,8	1,6	1–2
20.07.2010.	5	jutarnji	1,3	2,1	0:58:41	1,3	2,1	1
14.04.2011.	4	jutarnji	---	---	---	---	---	1–2
14.04.2011.	4	večernji	0,1	0,2	0:57:06	0,1	0,2	3
04.07.2011.	5	jutarnji	2,9	5	1:18:35	2,2	3,8	2
04.07.2011.	5	večernji	4,6	9	0:54:00	5,1	10,0	3–4
26.07.2012.	5	večernji/ noćni	0,8	1,4	4:18:22	0,2	0,3	0–1

Slično kao i za D u tablici 1, i ovdje su dane vrijednosti rasapa i raspona F za svaki dan opažanja. Iznimke su dani opažanja 17. 10. 2007. u jutarnjem setu i 14. 04. 2011. također u jutarnjem setu, kada zbog nepotpunosti opažanja nisu dane statističke veličine rasapa i raspona kao ni njihovi omjeri s trajanjem setova. Najmanje vrijednosti rasapa i raspona F zabilježene su 14. 04. 2011. u večernjem setu, kada je Kp -indeks iznosio 3. To pokazuje da nije uvijek postojana veza između vrijednosti globalnoga Kp -indeksa i stanja lokalnoga geomagnetskog polja na sekularnoj točki. S druge strane, treba ipak istaknuti da, primjerice, dana 04. 07. 2011. postoji znatna razlika omjera rasapa i trajanja setova iz jutarnjih ($Kp = 2$) i večernjih setova ($Kp = 3-4$). To vrijedi za D (tablica 1), ali i za F (tablica 2) čija su opažanja slobodna od pogreške opažača. O mirnoći geomagnetskog polja tijekom noćnih opažanja s 26. na 27. 07. 2012. govore podaci o rasapu totalnoga magnetskog intenziteta F od 0,8 nT i rasponu F od 1,4 nT, dok omjer rasapa F i trajanja setova iznosi 0,2 nT/sat, a omjer raspona F i trajanja setova iznosi 0,3 nT/sat.

7. Zaključak

Na osnovi provedenih opažanja geomagnetskog polja tijekom noći na sekularnoj geomagnetskoj točki POKU te usporedbe s dvodnevним podacima opservatorija THY može se zaključiti da je polje noću općenito znatno mirnije. Takvi uvjeti omogućavaju prikupljanje pouzdanih opažanja, određivanje pouzdanih vrijednosti geomagnetskih elemenata (D , I , F), a posljedično i dobivanje pouzdanih reduciranih vrijednosti. Kroskorelacijskom analizom totalnog intenziteta F između opservatorija THY i sekularne točke POKU pokazano je da ne postoji vremenski pomak između opažanja, što govori o sličnosti varijacije lokalnoga geomagnetskog polja na opservatoriju i sekularnoj točki, a to posljedično omogućuje pouzdaniju redukciju. Slično je provedeno i za deklinaciju D , međutim, zbog malog broja podataka i njihove diskontinuiranosti upitno je fizikalno značenje provedene analize. Za takvu je analizu potrebno imati kontinuirane podatke opažanja deklinacije D na sekularnoj točki POKU, pri čem je nužno korištenje terenskog variometra. Analizom svih mjernih kampanja geomagnetskog polja na sekularnoj točki POKU u razdoblju 2004–2012. utvrđeni su manji rasapi i rasponi D i F tijekom noćnih opažanja. Iako postoji korelacija, uočeno je da veza između vrijednosti globalnoga Kp -indeksa i stanja lokalnog polja na sekularnoj točki nije postojana. Kako se uobičajeno geomagnetske izmjere izvode oko izlaska, odnosno zalaska Sunca, potrebno je pri budućim izmjerama voditi računa o mogućim promjenljivim utjecajima bočne refrakcije na orijentaciju nemagnetičnog teodolita. Prvim noćnim terenskim mjerenjima geomagnetskog polja u Republici Hrvatskoj stečeno je vrijedno iskustvo te je testiran mjerni instrumentarij i oprema u realnim uvjetima. Iako su za provedbu geomagnetske izmjere tijekom dana uobičajeno potrebne dvije osobe, zbog specifičnosti uvjeta, za noćna su opažanja potrebne tri osobe: opažatelj na nemagnetičnom teodolitu, zapisničar te osoba zadužena za osvjetljavanje očitavanja na elektroničkoj jedinici, horizontalnom i vertikalnom krugu te nitnoga križa na optičkom teodolitu. Stečeno iskustvo može se primijeniti i u geomagnetskim izmjerama na lokacijama s izraženijim civilizacijskim šumom, koji je općenito manji tijekom noći kada su i smanjene ljudske aktivnosti. Iako je uočeno dobro poduda-

ranje geomagnetskog polja na sekularnoj točki POKU s onim na opservatoriju THY, korištenje terenskog variometra pri geomagnetskoj izmjeri omogućilo bi bolje praćenje varijacije geomagnetskog polja, a posljedično i pouzdaniju redukciju geomagnetskih elemenata.

ZAHVALA. Autori zahvaljuju prof. dr. sc. Mariu Brkiću, voditelju međunarodnoga znanstvenog projekta "Joint Croatian-Hungarian Geomagnetic Survey and Model" (MZOS, 2009–2012) u sklopu kojeg je i nastao ovaj rad. Također zahvaljuju organizaciji INTERMAGNET i geomagnetskom opservatoriju Tihany (Mađarska) na ustupljenim podacima.

Literatura

- Benčić, D., Solarić, N. (2008): Mjerni instrumenti i sustavi u geodeziji i geoinformatici, Školska knjiga, Zagreb.
- Brkić, M. (2012): Privatna komunikacija, studeni 2012.
- Brkić, M., Šugar, D., Rezo, M., Markovinović, D., Bašić, T. (2005): Hrvatska geomagnetska mreža sekularnih točaka, Geodetski list, 59 (82), 2, 113–127.
- 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, Springer, 18–22 May 2005, 137–143.
- Brkić, M., Šugar, D., Pavasović, M. (2011): The representative recent secular variation of the geomagnetic field on the Croatian territory, Proceedings of the International scientific conference on Magnetism – Geomagnetism – Biomagnetism MGB – 2008, Visokošolsko središće Sežana, Sežana, Slovenija, 49–57.
- Jankowski, J., Sucksdorff, C. (1996): Guide for magnetic measurements and observatory practice, IAGA, Boulder, SAD.
- Mandea, M., Korte, M. (2011): Geomagnetic observations and models, Springer, Dordrecht, Heidelberg, London, New York.
- Mathworks Inc. (2012): MATLAB Data Analysis, The Mathworks, Inc., Natick, Massachusetts, SAD.
- Mingeo (2005): DIM Declination/Inclination Theodolite Operation Manual version 1.2a, Mingeo, Budimpešta, Mađarska.
- Ministarstvo znanosti, obrazovanja i sporta – MZOS (2009–2012): Joint Croatian–Hungarian Geomagnetic Survey and Model, međunarodni znanstveni projekt, voditelj projekta prof. dr. sc. Mario Brkić.
- Newitt, L. R., Barton, C. E., Bitterly, J. (1996): Guide for Magnetic Repeat Station Surveys, IAGA, Boulder, SAD.
- Šugar, D. (2008): Hrvatska geomagnetska mreža sekularnih točaka – uspostava, izmjera i redukcija, magistarski rad, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.

Šugar, D., Bašić, T., Bačić, Ž. (2012): Azimuth determination and analysis on the repeat stations network in Croatia, Conference Proceedings, Volume II – 12th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, Sofia, Bugarska, 693–700.

URL 1: NOAA, http://www.swpc.noaa.gov/rt_plots/kp_3d.html, (21.12.2012.).

URL 2: GLOW STICKS, http://en.wikipedia.org/wiki/Glow_stick, (21.12.2012.).

URL 3: INTERMAGNET, http://www.intermagnet.org/publications/im_manual.pdf, (7.2.2013.).

URL 4: IAGA2002, <http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vdat/iagaformat.html>, (7.2.2013.).

URL 5: ESRL, <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/sunrise.html>, (21.12.2012.).

URL 6: Cross correlation, <http://paulbourke.net/miscellaneous/correlate/>, (7.2.2013.).

URL 7: Sideral time, http://en.wikipedia.org/wiki/Sidereal_time, (21.12.2012.).

Night-time Geomagnetic Field Observations on the POKUpsko Repeat Station

ABSTRACT. The analysis of the night-time magnetic declination D and magnetic total intensity F observations at the POKUpsko (POKU) repeat station as well as the comparison with simultaneous Tihany (THY) observatory (Hungary) data have been presented. Generally, the geomagnetic field is less disturbed during the night-time when smaller ranges and scatters are achieved leading to a more reliable determination of the geomagnetic element values. The cross-correlation analysis of the simultaneous observations has confirmed the similarity of the geomagnetic field variation between the THY observatory and POKU repeat station. Compared to day-time surveys, the observations during the night are more demanding and special equipment and organization are needed as well. The analysis of all repeat station surveys in the period 2004–2012 on the POKU repeat station has been given and was shown that the most reliable geomagnetic element values were determined from night-time observations. Performing the first night-time geomagnetic field surveys in the Republic of Croatia, the valuable experience has been achieved and measuring instruments and equipment have been tested.

Keywords: geomagnetic surveys, diurnal variation, night-time field, geomagnetic elements, K_p -index.

Primljeno: 2012-12-22

Prihvaćeno: 2013-02-20