

Značaj geografske širine za lociranje uzročnika magnetnih anomalija kod prospekcije arheoloških lokaliteta

Vesna Cvetkov



Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

[ДР РГФ]

Značaj geografske širine za lociranje uzročnika magnetnih anomalija kod prospekcije arheoloških lokaliteta | Vesna Cvetkov
| Aktuelna interdisciplinarna istraživanja tehnologije u arheologiji jugoistočne Evrope: Zbornik radova, Prvi skup Sekcije za arheometriju, arheotehnologiju, geoarheologiju i eksperimentalnu arheologiju Srpskog arheološkog društva, Beograd, 28.02.2020. | 2020 ||

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0005720>

ZNAČAJ GEOGRAFSKE ŠIRINE ZA LOCIRANJE UZROČNIKA MAGNETNIH ANOMALIJA KOD PROSPEKCIJE ARHEOLOŠKIH LOKALITETA

Vesna Cvetkov

Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu

Ključne reči: magnetometrija, asimetrija magnetnih anomalija, inklinacija, redukcija na pol

Uvod

Početak primene geofizičkih metoda u arheologiji vezuje se za četrdesete godine dvadesetog veka, da bi poslednjih desetak godina praktično postale nezaobilazni deo prospekcije arheoloških lokaliteta. Prva uspešna geofizička ispitivanja uradio je Ričard Atkinson, 1946. godine, kada je postupkom specifične električne otpornosti detektovao muljem zapunjene rovove u šljunku na neolitskom lokalitetu Dorčester na Temzi u Engleskoj (Linford 2006). Pozitivni rezultati ovog i velikog broja naknadnih geofizičkih istraživanja, tehnološki napredak instrumenata i softvera, kao i razvoj specifičnih tehnika akvizicije i obrade podataka prilagođenih potrebama arheologije u okviru standardnih geofizičkih metoda, doveli su do formiranja tzv. arheološke geofizike ili arheogeofizike. Danas se termin arheogeofizika često sreće u naučnim časopisima. U okviru konferencijama se izdvaja kao posebna sesija ili je čak čitava konferencija posvećena arheogeofizici, a uvedena je i u nastavni program arheologije na pojedinim fakultetima (Wynn 1986; Clark 1990, Conyers & Goodman 1997; Baven 1998; Gaffney *et al.* 2002;

Conyers 2004; Linford 2006; Witten 2006; Armstrong *et al.* 2019). Za geofizička ispitivanja u arheologiji, takođe, vezuje se i termin geoarheološka istraživanja zato što se geofizika nalazi pod okriljem geologije, kao i arheometrijska istraživanja pošto geofizika za otkrivanje arheoloških ostataka koristi različite metode i tehnike opažanja prirodnih ili veštački stvorenih fizičkih polja i fizičkih svojstava sredine.

Dva su razloga velike primene geofizičke prospekcije u arheologiji. Prvi, geofizičke metode su nedestruktivne (ako se izuzme paleomagnetizam) jer se merenja vrše na površini terena bez otkopavanja i oštećenja arheoloških objekata i narušavanja životne sredine. Drugi, merenja su visoko rezolutivna i brza, što obezbeđuje veliki broj podataka za kratko vreme, čime se znatno smanjuju troškovi i vreme istraživanja i iskopavanja.

Za geofizičku prospekciju mogu se koristiti praktično sve geofizičke metode i postupci, samostalno ili još češće u kombinaciji, što omogućava sagledavanje arheoloških nalazišta iz više aspekata i samim tim tačnije definisanje potencijalnih zona od interesa za arheo-

loška istraživanja i lociranje arheoloških objekata. Sam izbor metode prospekcije zavisi od cilja ispitivanja, vrste arheoloških objekta, od kog su materijala objekti i dubine na kojoj se nalaze, prisustva potencijalnih veštačkih i prirodnih smetnji, fizičkih svojstava tla, topografije terena, veličinskog područja ispitivanja, raspoloživog vremena i sredstava za istraživanje. Na osnovu navedenog, magnetometrija praktično ima najširu primenu u arheološkoj prospekciji u slabo naseljenim oblastima sa „povoljnom” geologijom (odsustvo izdanaka bazičnih i ultrabazičnih stena, rude gvožđa). Obično se kombinuje sa merenjima magnetne susceptibilnosti tla. Često se koristi i kao metoda za rekognosciranje i brzu procenu stanja na terenu, na osnovu koje se projektuju dalja detaljna geofizička i arheološka ispitivanja.

Produkt magnetometrijske akvizicije su karte intenziteta magnetnog polja i njegovih gradijenata. Interpretacijom dobijenih karata, različitim kvalitativnim i kvantitativnim postupcima i metodama, mogu se odrediti položaji zatrpanih zidova, ognjišta, rovova i drugih objekata, čime se smanjuje mogućnost praznih arheoloških sondi (Dittrich et al. 1998; Desvignes et al. 1999; Eppelbaum et al. 2001, 2015; Aspinall et al. 2008; Cheyney et al. 2011; Schettino et al. 2019). U osnovi, interpretacija se bazira na analizi i tumačenju anomalija magnetnog polja Zemlje (MPZ). Intenzitet i oblik izmerenih anomalija zavisi od magnetne susceptibilnosti, položaja i dimezije uzročnika anomalija, ali i od inteziteta, pravca i smera MPZ područja istraživanja. To znači da isti uzročnik može da izazove pozitivnu, negativnu ili bipolarnu magnetnu anomaliju u

zavisnosti od geografske širine na kojoj se nalazi. Kako bi oblik magnetne anomalije zavisio samo od geometrije i položaja uzročnika razvijen je niz matematičkih postupaka baziranih na teoriji potencijalnih polja (Baranov 1957; Baranov & Naudy 1964). Jedan od najčešće korišćenih postupaka je redukcija (svođenje) na pol (Baranov 1957; Cooper & Cowan 2005; Nabighian et al. 2005; Li 2008, Lahti et al. 2010). Poslednjih godina, sve je više radova u kojima su primenjeni različiti matematički algoritmi, postupci modelovanja i inverzije magnetometrijskih podataka sve u cilju što tačnijeg definisanja izvora magnetnih anomalija (Tscokas et al. 1991, Mušič 1999, 2008; Tsokas & Hansen 2000; Eppelbaum et al. 2001, 2003; Bescoby 2004; Diamanti et al. 2005; Eppelbaum 2010, 2015; Dalan et al. 2011, Schettino et al. 2018). Ono što je karakteristično za većinu nabrojanih postupaka je da zahtevaju otkanjanje uticaja inklinacije* (geografske širine) lokalnog MPZ.

Poreklo i uzroci magnetnih anomalija u arheologiji

Magnetne anomalije predstavljaju lokalne poremećaje MPZ. Na primer, kada je ispitivana podpovršina homogenog magnetnog sastava, tada je MPZ uniformno, međutim, prisutvo prirodne i/ili veštačke magnetne nehomogenosti deformiše polje, što se manifestuje kao anomalija MPZ ili skraćeno magnetna anomalija. S obzirom na to da većina arheoloških slojeva, struktura i objekata poseduje magnetna svojstva koja ih razlikuju od okolne sredine i da samim tim izazivaju magnetne anomalije doprinelo je da magnetometrija postane značajan alat u arheologiji. Smatra se da su istra-

* Inklinacija je vertikalni ugao koji vektor totalnog MPZ zaklapa sa horizontalom ravni u tački merenja.

živači Laboratorije za arheologiju i istoriju umetnosti Univerziteta u Oksfordu zajedno sa Martinom Aitkenom u martu 1958. godine prvi put primenili magnetometriju za pronalaženje zakopanih arheoloških ostataka. Naime, za potrebe istraživanja velikog nalazišta rimske keramike u blizini grada Piterboroa u Engleskoj konstruisali su specijalni protonski magnetometar sa kojim su detektovali magnetnu anomaliju koju je izazvala zakopana keramička peć na dubini od približno jednog metra. U to vreme fokus istraživanja bio je na keramičkim pećima i ognjištima, zidovima od kamena i opeke i metalnim artefaktima zato što oni izazivaju anomalije značajnog intenziteta, ali je već tada primećeno da instrument može da detektuje i anomalije niskog intenziteta nastale od jama i rovova (Clark 1990, Scollar *et al.* 1990; Gaffney *et al.* 2002; David *et al.* 2008). Sa primenom magnetometrije u arheološkoj prospekciji na prostoru Srbije nije se dugo čekalo. Već krajem šezdesetih i početkom sedamdesetih godina 20. veka počela je da se koristi na arheološkim lokalitetima Lepenski Vir i Viminacijum (Mužijević *et al.* 1992). Od tada, praktično nema značajnijeg arheološkog nalazišta u Srbiji na kome u nekoj fazi istraživanja nije primenjena magnetometrija. Najbolji primer predstavlja arheološki lokalitet Viminacijum, na kome se od 2002. godine sistematski primenjuje magnetometrijska prospekcija (Mikić i dr. 2006; Bogdanović 2010; Miletić & Miletić 2012).

Da li će neki arheološki materijal (objekat) biti detektibilan za magnetometrijsku prospekciju zavisi od njegovog kontrasta s a okolinom, koji je pak u funkcionalnoj vezi sa magnetizacijom i magnetnom susceptibilnošću sredi-

ne i objekta istraživanja. Magnetizacija je fizička veličina koja pokazuje stanje namagnetisanosti nekog materijala. Sastoji se od indukovane i remanentne magnetizacije. U slabom magnetnom polju poput MPZ, indukovana magnetizacija je paralelna i proporcionala primenjenom polju. Sa prestankom dejstva magnetskog polja indukovana magnetizacija će se smanjiti, a u nekim slučajevima će nestati. Pojedini minerali oksida i sulfida gvožđa, tzv. magnetični minerali, mogu da po prestanku dejstva magnetskog polja sačuvaju magnetizaciju. Ta očuvana magnetizacija naziva se remanentna magnetizacija (RM) i zavisi od: odlika MPZ u kome se materijal nalazio od trenutka formiranja do trenutka merenja, fizičkih i hemijskih procesa koji su delovali tokom sticanja remanentne magnetizacije i magnetskih svojstava prisutnih magnetičnih minerala u materijalu. Za arheologiju najznačajnije su sledeće vrste RM. Termoremanentna magnetizacija (TRM) stečena hlađenjem zagrejanog materijala ispod Kirijeve temperature (T_c) prisutnih magnetičnih minerala, na tzv. blokirajućoj temperaturi kada se „zamrzava“ pravac magnetizacije prouzrokovano MPZ i materijal magnetiše. Dugotrajnim grejanjem materijala, na temperaturama neznatno ispod T_c prisutnih magnetičnih minerala, nastaje termoviskozna RM (TVRM). Hemijska RM obrazovana tokom formiranja magnetičnih minerala na niskim temperaturama (ispod T_c), procesom oksido-redukcije i kristalizacije, kao i magnetizacija sedimentovanja nastala taloženjem sfernih fero čestica, od erodovanih stena ili biogenog porekla, dovoljno malih dimenzija da se ponašaju kao mali magneti i orijentišu paralelno sa MPZ.

* Kirijeva temperatura ili Kirijeva tačka (T_c) je temperatura na kojoj feromagnetici gube svoja magnetna svojstva.

Drugi bitan i najčešće razmatran parametar kod magnetometrijskih ispitivanja je razlika između magnetne susceptibilnosti objekta ispitivanja i sredine u kojoj se nalazi. Magnetna susceptibilnost je fizička veličina koja opisuje sposobnost materijala da se namagnetiše u magnetnom polju ili jednostavnije rečeno pokazuje u kojoj meri je dati materijal magnetičan. Direktno je proporcionalna sadržaju magnetičnih minerala, čija se magnetna susceptibilnost menja u širokom dijapazonu vrednosti u zavisnosti od hemijskog sastava minerala, veličine i rasporeda zrna. Najveći uticaj ima prisustvo i koncentracija magnetita (Fe_3O_4) i maghemita ($\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$) koji mogu biti primarno vezani za materijal ili nastaju transformacijom manje magnetičnih minerala poput hematita ($\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$), getita (αFeOOH), lepidokrokita (γFeOOH) i gregita (Fe_3S_4) usled promene temperature i/ili oksido-redukcijskih uslova sredine. Postoji više procesa koji dovode do povećanja magnetne susceptibilnosti tla. Grejanje, tokom kojeg u redukcijskim uslovima u prisustvu organske materije dolazi do transformacije slabo magnetičnih oksida gvožđa (npr. hematita) u znatno magnetičniji magnetit ili maghemit. Temperature na kojima dolazi do ovih transformacija nisu jasno definisane i kreću se od 150 - 570 °C, pri čemu niže temperature zahtevaju duže izlaganje (Linford & Canti 2001; Maki *et al.* 2006). Ovi hemijski prelazi generalno započinju redukcijom, a zatim oksidacijom i na relativno umerenim temperaturama kao što su na primer šumski požari (Oldfield 1992; Mullins 2006). Biomineralizacija utiče dvojako, delovanjem mikroba u slojevima sa velikom količinom organske materije gde dolazi do „fermentacije“ (Weston 2002) koja izaziva konverziju slabo magnetičnih oksida gvožđa u magnetičnije oblike. Prisustvo magnetotaktičkih bakterija koje stva-

raju nano kristale magnetita i gregita interakcijom organskih molekula i neorganskih materija. Ovi „biološki“ nano magneti sa ekstra i intracelijskim magnetnim strukturama, magnetozomima, ostaju u tlu i kada magnetotaktična bakterija odumre (magnetofosil) i dovode do povećane magnetne susceptibilnosti tla. Pedogeneza, proces formiranja tla, tokom koje može nastati ultra-finozrni magnetit u tlu bez uticaja čoveka i mikroorganizama (Maher & Taylor 1988). Inkorporirani magnetični materijali u gornjim delovima tla, poput izlomljene grnčarije ili fragmenata opeke (Weston 2002). Iako su nabrojani postupci izuzev poslednjeg, deo prirodne pedogeneze tla, ljudska aktivnosti poput: intenzivnog zagrevanja tla (ognjišta, gorele kuće i dr.), topljenje i obrade gvožđa (peći, šljaka i dr), pravljenja grnčarije, kontrolisanog paljenja (krčenja šume), nagomilavanje organskog materijala pri dužem boravku na jednom mestu (Gaffney *et al.* 2002), uklanjanje površinskog sloja zemlje (rovovi, grobovi, udubljenja od nosećih greda kuća), kao i prisustvo gvozdenih artefaka, konstrukcija od kamena (temelji kuća, popločane ulice i putevi), lokalno menjaju magnetizaciju i time ostavljaju trag za rekonstrukciju ljudskog stanovanja i delatnosti na nekom prostoru.

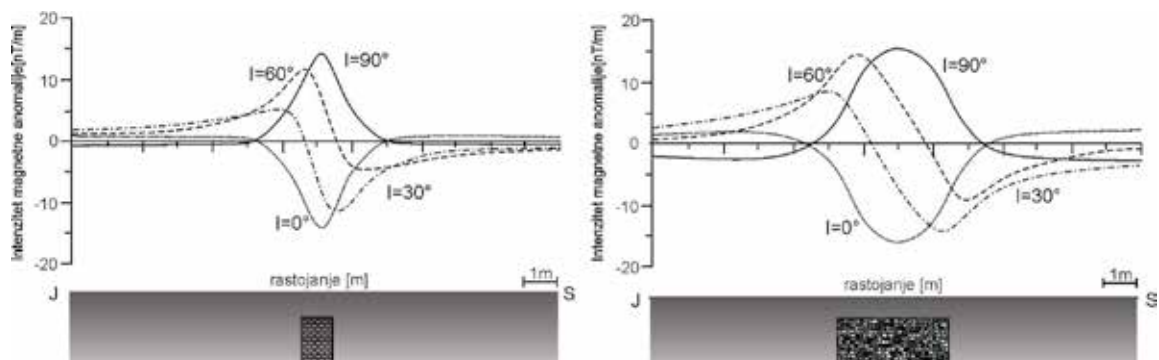
Najveće magnetne anomalije, ako se izuzmu gvozdeni predmeti, izaziva opeka, zidovi od opeke i ognjišta, zbog TRM i TVRM stečene pečenjem gline. Najmanje anomalije uzrokuju grobovi, rovovi i ostale arheološke strukture vezane za iskopavanje i premeštanje gornjih slojeva tla.

Otklanjanje asimetrije magnetnih anomalija

Magnetometri mere intenzitet MPZ koji je u suštini vektorska veličina određena pravcem MPZ u tački posmatranja. Pravac MPZ je na severnom i južnom polu vertikalna, na ekvatoru horizontalna, dok je na svim ostalim područjima pod nekim uglom u zavisnosti od geografske širine. Većina magnetometara^{*} meri skalarnu vrednost vektora MPZ tzv. totalni intenzitet MPZ i to bez kontrole njegovog pravca i smera. U arheologiji uglavnom se koriste magnetometri-gradiometri sa dva ili više senzora raspoređena jedan iznad ili pored drugog, koji mere vrednost totalnog MPZ, a na osnovu razlike vrednosti sa dva senzora i rastojanja između njih, dobija se vrednost gradijenta MPZ. Ovaj postupak praktično deluje kao filter niskih frekvencija, pojačava slabe magnetne anomalije malih objekata na malim dubinama i odstranjuje anomalije geoloških uzročnika, kao i vrednosti globalnog MPZ i uticaj solarne aktivnosti na MPZ. Tumačenjem izmerenih anomalija dobijaju se informacije o rasprostiranju i odlikama arheoloških struktura i objekata pod zemljom. Kvalitativnom interpreta-

cijom opisno se tumače magnetometrijske karte, pri tome određuju se relativni odnosi, položaj i dubina uzročnika anomalija. U geofizici je to prvi korak u tumačenju podataka, dok se u arheologiji često sa njom završava intepretacija podataka. Znatno pouzdanija je kvantitativna analiza magnetnih anomalija jer je zasnovana na računanju i modelovanju atributa uzročnika anomalija. Bez obzira koji se vid tumačenja primeni, potrebno je poznavati svojstva magnetnih anomalija u zavisnosti od: odlika uzročnika (dubine, dimenzije, oblika i položaj), koncentracija magnetičnih minerala i prisustva RM, orijentacije profila (značajno samo u blizini ekvatora) i geografske širine (inklinacije) mesta na kome se vrše magnetna merenja.

U zavisnosti da li je MPZ vertikalno, horizontalno ili koso, homogeno namagnetisani, simetrični, objekti prouzrokujuće pozitivnu, negativnu ili bipolarnu magnetnu anomaliju. Praktično, oblik magnetne anomalije biće simetričan, a položaj uzročnika određen vrhom anomalije na magnetnom polu ili na ekvatoru, dok će na područjima tzv. kose magnetizacije, gde su inklinacije između 0° i 90° , oblik anomalije biti asimetričan, a maksimum anomalije



Slika 1. Oblik magnetne anomalije iznad gorelih arheoloških objekata od opeke pri različitim vrednostima inklinacije

* Po dogovoru, smer vektora MPZ je pozitivan naniže, a negativan naviše.

** Pojedini fluksni magnetometri mere skalarnu vrednost vertikalne komponente MPZ.

pomeren u odnosu na centar uzročnika (Slika 1).

Kako bi oblik magnetne anomalije zavisio samo od svojstava uzročnika najčešće se na magnetometrijske podatke primenjuje postupak redukcija na pol (RTP-*Reduction to Pol*). Postupkom RTP magnetne anomalije izmerene na bilo kojoj geografskoj širini transformišu se u anomalije koje bi bile izmerene da su ispitivanja izvedena na magnetnom polu (Slika 2).

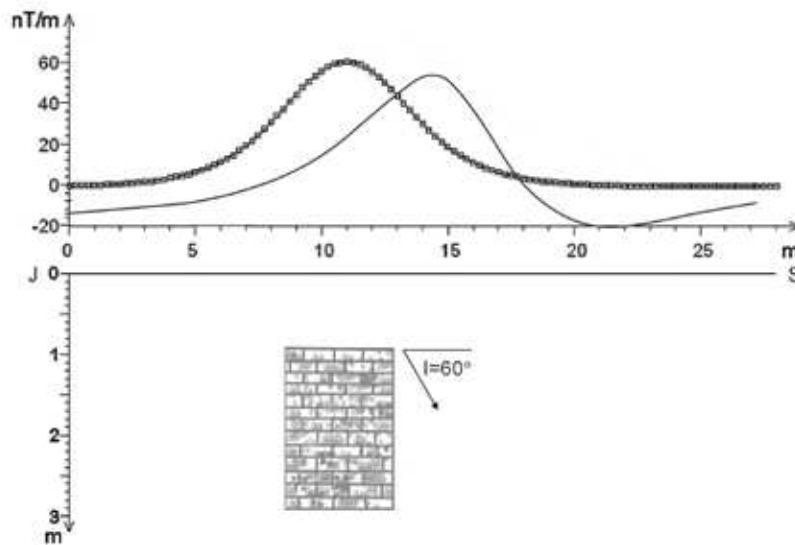
U suštini, primenom RTP položaji anomalija pomeraju se iznad uzročnika, maksimalni gradijent približava se ivicama uzročnika, a ukoliko su uzročnici simetrični objekti tada se asimetrične anomalije transformišu u simetrične. Kod vertikalnih i homogeno namagne-

ali oblik anomalija bliže odražava položaj zaleganja objekata (Slika 3). U oba slučaja oblik anomalija znatno je pojednostavljen i time olakšana interpretacija magnetometrijskih podataka.

Bez obzira da li su u pitanju podaci anomalija totalnog intenziteta MPZ ili gradijenta anomalija totalnog intenziteta MPZ, postupak transformacije podataka na magnetni pol je isti, i prikazan je izrazom (Baranov & Naudy, 1964):

$$L(\theta) = \frac{1}{[\sin(I) + i \cos(I) \cos(D - \theta)]^2}$$

gde su: $L(\theta)$ - operator RTP, θ - talasni broj, I - inklinacija i D - deklinacija.

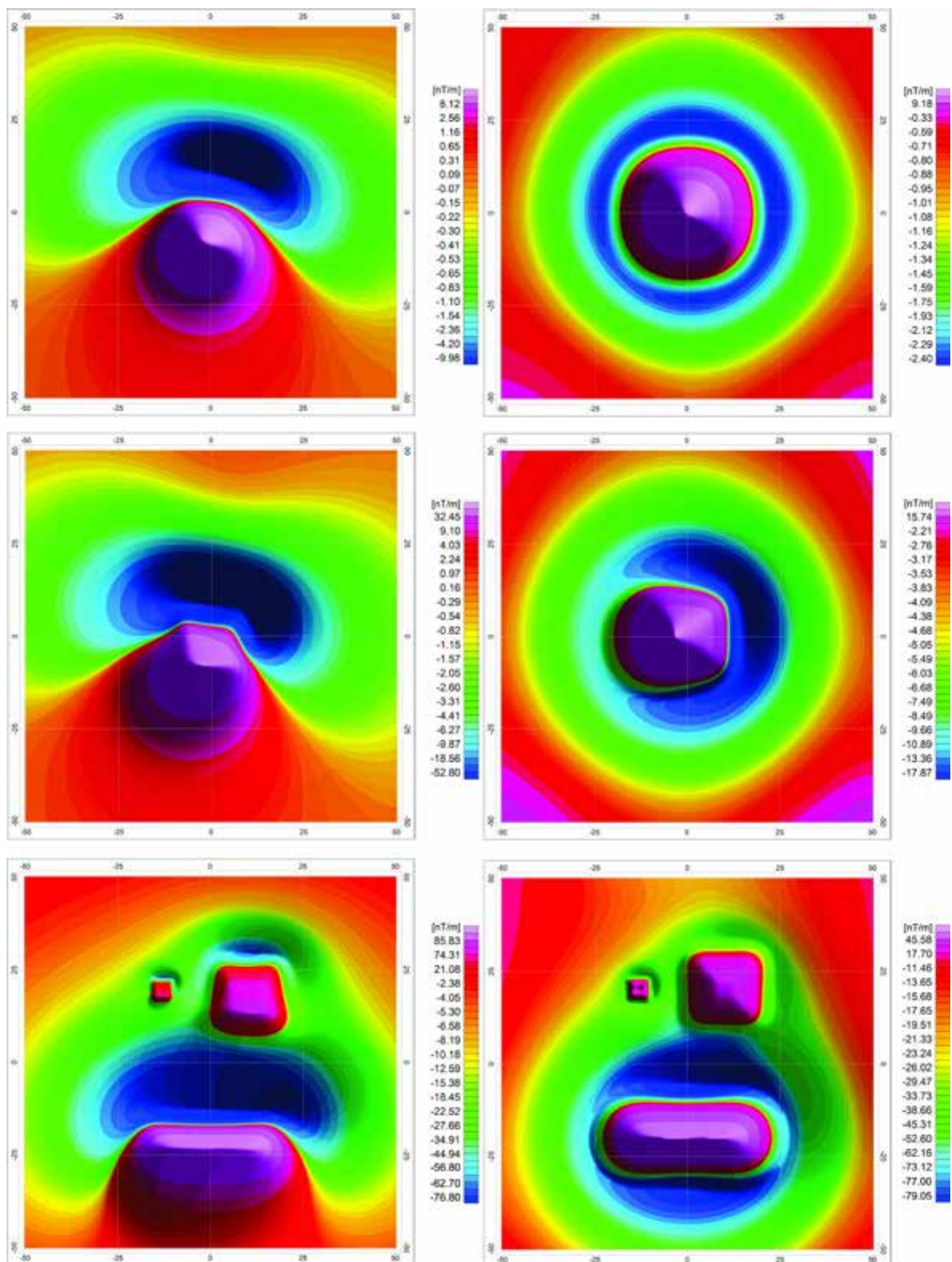


Slika 2. Magnetna anomalija izavana magnetičnim objektom na geografskoj širini Srbije, gde sadašnja vrednost inklinacije iznosi oko 60°: pre (puna linija) i nakon primene postupka RTP (linija izvučena sa kvadratićima)

tisanin uzročnika primenom RTP otklanja se bipolarna priroda magnetnih anomalija čime se znatno pojednostavljuje oblik anomalije, dok se kod nagnutih uzročnika zadržava bipolna priroda,

Iz operatora RTP vidi se da je potrebno poznavati pravac magnetizacije, deklinaciju i inklinaciju područja istraživanja. Postupak pretpostavlja da pravac magnetizacije odgovara MPZ,

* Deklinacija je horizontalni ugao između astronomskog pravca severa magnetnog meridijana u tački merenja.



Slika 3. Karte magnetih anomalija pre (leva kolona) i nakon postupka RTP (desna kolona) za: vertikalnu prizmu (gornji red); prizmu pod nagibom od 45° ka istoku (srednji red) i model sredine sa više prizmi koje imaju različite vrednosti magnetne susceptibilnosti, različite dimenzije i nalaze na različitoj dubini (zadnji red) (modifikovano, Cvetkov, 2016)

što je tačno u slučaju da je RM ili zane-marljiva ili paralelna sa delujućim MPZ (savremena RM). Sa aspekta paleomagnetiizma, naučne discipline koja proučava RM minerala, stena i arheološkog materijala, bitno je u kom kontekstu se posmatra RM. Za datiranje starosti arheološkog materijala koji je u toku svoje proizvodnje ili upotrebe prošao termičku obradu, tzv. arheomagnetna ispitivanja potrebno je poznavati intenzitet, pravac i smer vektora RM za istorijsko vreme koje odgovara starosti arheoloških artefakta. Sa aspekta geološke starosti MPZ, međutim, vrednosti deklinacije i inklinacije RM poslednjih nekoliko hiljada godina praktično odgovaraju vrednostima savremenog MPZ, te se za postupak RTP koriste vrednosti preuzete iz matematičkih modela globalnog MPZ (*IGRF-International Geomagnetic Reference Field*; *WMM-World Magnetic Model*) za datum kada je rađena akvizicija podataka.

Na malim geografskim širinama postupak RTP ne daje dobre rezultate zbog pojave singularnosti kada se pružanje objekta i inklinacija približavaju nuli. Ovaj problem je rešen različitim postupcima proširenja i modifikacije operatora RTP (Nabighian *et al.* 2005; Whitehead & Musselman 2007).

Zaključak

Magnetometrijskom prospekcijom detekuju se magnetne anomalije, nastale zbog prisustva arheoloških objekata i struktura čija se magnetizacija razlikuje od okoline. U praksi se pokazalo da arheološke strukture poput ukopa, rovova i grobova izazivaju anomalije malog inteziteta koje se teško detektuju, dok strukture od glinovitog materijala

koje su gorele i zgura mogu prouzrokovati znatno veće vrednosti anomalija.

U osnovi, tumačenje magnetometrijskih karata svodi se na analizu distribucije i oblika anomalija. Oblik anomalija zavisi od oblika i položaja uzročnika, ali i od pravca njegove magnetizacije i pravca vektora lokalnog MPZ. Ovo ima za posledicu da su anomalije pomerene u odnosu na položaj uzročnika na svim geografskim širinama sem u području magnetnih polova i ekvatora.

Kako bi se pojednostavio oblik anomalija, a samim tim i olakšala interpretacija najčešće se primenjuje postupak RTP. Nakon primene RTP magnetne anomalije bolje oslikavaju položaj i veličinu izvora magnetizacije. Ukoliko je uzročnik vertikalni i simetričan objekat tada se bipolarna anomalija transformiše u pozitivan ili negativan monopol. Kod nagnutih uzročnika anomalija ostaje bipolarna, ali njen položaj više odgovara „realnom” položaju u potpovršini.

Iz svega izloženog jasno se može videti da jedino poznavanje načina nastanka magnetnih anomalija, ponašanja magnetnog dipola u MPZ i osnovnih svojstava anomalija, uz pretpostavke o očekivanim arheoloških strukturama na istraživanom području, obezbeđuje pouzdanu magnetometrijsku interpretaciju.

* U suštini monopol fizički ne postoji, nego se smatra da ga izaziva objekat koji ima osobine jako izduženog dipola.

Bibliografija

- Amstrong, L., Cheetham, P., Darvill, T. 2019.** Tales from the outer limits: Archaeological geophysical prospection in lowland peat environments in the British Isles. *Archaeological Prospection* 26, 2: 91-101.
- Aspinall, A., Gaffney, C., Schmidt, A. 2008.** *Magnetometry for archaeologists*. Ed: Conyer L. B. Kvamme K. L., Altamira Press.
- Baranov, V. 1957.** A new method for interpretation of aeromagnetic maps: Pseudogravimetric anomalies. *Geophysics* XXII/ 2: 359-383.
- Baranov, V., Naudy, H. 1964.** Numerical calculation of the formula of reduction to the magnetic pole. *Geophysics* XXIX/ 1: 67-79.
- Bescoby, D. J., Gavin, C. C., Chroston, P. N., 2004.** Enhanced interpretation of magnetic survey data using artificial neural networks: a case study from Butrint, southern Albania. *Archaeological Prospection* 11, 4: 189-199.
- Bevan, B.W. 1998.** Geophysical exploration for archaeology: An introduction to geophysical exploration. Midwest archaeological center Special report No. 1, U.S. Department of the interior, National park service, Lincoln, NE.
- Bogdanović, I. 2010.** Rezultati arheo-geofizičkih istraživanja na lokalitetu kod Koraba (Istočna nekropola Viminacijuma). *Arheologija i prirodne nauke* 5: 83-110.
- Cheyney, S., Hill, I., Linford, N. 2011.** Advantages to Using the Pseudogravity Transformation to Aid Edge Detection of Total Field Archaeomagnetic Datasets. *Archaeological Prospection* 18 2: 81-93.
- Clark, A. 1990.** *Seeing Beneath the Soil: Prospecting Methods in Archaeology*. London: Routledge.
- Conyers, L.B., Goodman, D. 1997.** *Ground-penetrating radar. An introduction for archaeologists*. Walnut, Creek, Altamira press.
- Cooper, G. R. J., Cowan, D. R. D. 2005.** Differential reduction to the pole. *Computer & Geosciences* 31: 989-999.
- Cvetkov, V. 2016.** *Magnetometrija-praktikum*. Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet.
- David, A., Linford, N., Linford, P. 2008.** Geophysical Survey in Archaeological Field Evaluation, London: 1-60.
- Dalan, R. A., Bevan, B. W., Goodman, G., Lynch, D., De Vore, S., Adamek, S., Martin, T., Holley, G., Michlovic, M. 2001.** The Measurement and Analysis of Depth in Archaeological Geophysics: Tests at the Biesterfeldt Site, USA. *Archaeological Prospection* 18, 4: 245-265.
- Desvignes. G., Tabbagh, A., Benech. C. 1999.** The determination of the depth of magnetic anomaly sources. *Archaeological Prospection* 6, 2: 85-105.
- Diamanti, N. G., Tsokas, G. N., Tsourlos, P. I., Vafid, A. 2005.** Integrated interpretation of geophysical data in the archaeological site of Europos (northern Greece). *Archaeological Prospection* 12, 2: 79-91.
- Dittrich, D., Koppelt, U. 1998.** Quantitative interpretation of magnetic data over settlement structures by inverse modelling. *Archaeological Prospection* 4, 4, Special Issue: European Geophysical Society XXII General Assembly: 165-177.
- Eppelbaum, L. V., Khesin, B. E, Itkis S. E. 2001.** Prompt magnetic investigations of archaeological remains in areas of infrastructure development: Israeli Experience. *Archaeological Prospection* 8, 3: 163-185.
- Eppelbaum, L., Ben-Avraham, Z., Itkis, S. 2003.** Ancient Roman Remains in Israel provide a challenge for

- physical-archaeological modeling techniques, *First Break*, 21, 2: 51-61.
- Eppelbaum, L. 2010.** Application of Potential Geophysical Fields at Archaeological Sites in Israel: An Introduction. *Conference Proceedings, 23rd EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, Apr 2010, cp-175-00124.
- Eppelbaum, L.V. 2015.** Quantitative Interpretation of Magnetic Anomalies from Thick Bed, Horizontal Plate and Intermediate Models Under Complex. *Archaeological Prospection* 22, 4: 255-268.
- Gaffney, G. 2008.** Detecting trends in the prediction of the buried past: A review of geophysical techniques in archaeology. *Archaeometry* 50, 2: 313-336.
- Gaffney, C., Gater, J., Ovenden, S. 2002.** The use of geophysical techniques in archaeological evaluations. Technical Paper No 6, Institute of Field archaeologists. IFA paper No.6. Ed: Alison Taylor, Published Institute of Field Archaeologists, University of Reading: 1-24.
- Lahti, I., Karinen, T. 2010.** Tilt derivative multiscale edges of magnetic data. *The Leading Edge*: 24-29.
- Li, X. 2008.** Magnetic reduction-to-the-pole at low latitudes: Observations and considerations. *The Leading Edge*: 990-1002.
- Linford, N. 2006.** The application of geophysical methods to archaeological prospection. *Rep. Prog. Phys.* 69: 2205-2257.
- Linford, N., Canti, M.G., 2001.** Geophysical evidence for fires in antiquity: preliminary results from an experimental study. *Archaeological Prospection* 8: 211-225.
- Муџијевић, Р., Старчевић, М., Стојановић, Р. 1992.** Примена геофизике у археологији. *Археологија и природне науке* (ур. Д. Срејовић), Београд: 115-123.
- Maher, B. A., Taylor, R. M. 1988.** Formation of ultrafine-grained magnetite in soils. *Nature* 336: 368-371.
- Mikić, M., Stojanović, V., Mrđić, N. 2006.** Primena gradiometra za potrebe zaštitnih arheoloških istraživanja na Viminacijumu-lokalitet Rit. *Arheologija i prirodne nauke* 2: 21-26.
- Miletić, V., Miletić, J. 2012.** Geofizička istraživanja na prostoru Viminacijuma (grad i vojni logor) u 2011. godini. *Arheologija u Srbiji; projekti Arheološkog instituta u 2011. godini.* ur: Bikić, V., Golubović S., Antonović, D. Arheološki institut, Beograd: 63-65.
- Mullins, C. E. 2006.** Magnetic susceptibility of the soil and its significance in soil science—a review. *European Journal of Soil Science* 28, 2: 223-246.
- Mušič, B. 1999.** Geophysical prospecting in Slovenia: an overview with some observations related to the natural environment. *Arheološki vestnik* 50: 349-405.
- Mušič, B. 2008.** Nastavki za kvantitativno analizo rezultata arheološke geografije na primeru Sagalassosa, Turcija. *Arheo* 25: 53-67.
- Nabighian, M. N., Grauch, V. J. S., Hansen, R.O., LaFehr, T. R., Li, Y., Peirce, J. W., Phillips, J. D., Ruder, M. E. 2005.** 75th Anniversary The historical development of the magnetic method in exploration. *Geophysic*, 70/6, 33ND-61ND.
- Oldfield, F., 1992.** The source of fine-grained 'magnetite' in sediments. *Holocene* 2: 180-182.
- Schettino, A., Gnezzzi, A., Pierantonio, P. P. 2018.** Magnetic field modelling and analysis of uncertainty in archaeological geophysics. *Archaeological Prospection* 26, 2: 137-153.
- Scollar, I., Tabbagh, A., Hesse, A., Herzog, I., 1990.** Archaeological Prospecting and Remote Sensing. Cambridge

ge University Press, Cambridge.

Tsokas, G. N., Papazachos, C. B.

Loucyannakis, M. Z., Karousova,

O. 1991. Geophysical data from archaeological sites: Inversion filters based on the verticalsited finite prism model. *Archaeometry* 33: 215-230.

Tsokas, G. N., Hansen, R. O., 2000.

On the use of complex attributes and the inferred source parameter estimates in the exploration of archaeological sites, *Archaeological Prospection* 7, 1: 17-30.

Whitehead, N., Musselman, C. 2007.

2D Frequency Domain Processing of Potential Field Data, Extension for Oasis montaj Tutorial. Geosoft.

Wynn, J. 1986. A review of geophysical methods used in archaeology. *Geoarchaeology*, 1, 3: 245-257.

Witten, A. *Handbook of Geophysics and Archaeology*. Equinox Publishing, London.

Weston, D. G. 2002. Soil and susceptibility: aspects of thermally induced magnetism within the dynamic pedological system. *Archaeological Prospection* 9, 4: 207-215.