

Nastavki za kvantitativno analizo rezultatov arheološke geofizike na primeru Sagalassosa, Turčija

Starting Points for a Quantitative Analysis of Archaeological Geophysics Results on the Example of Sagalassos, Turkey

© Branko Mušič

Izvleček: Arheološka geofizika sodi v domeno (ultra)plitve geofizike visoke ločljivosti. Deterministični način interpretacije, ki se je uveljavil v arheologiji, počasi zamenjuje kvantitativne analize, ki so se uveljavljale na področju »konvencionalne geofizike«. Določanje fizikalnih lastnosti in geometrije odkritih arheoloških ostankov postaja vse pomembnejše. Nehomogenost in anizotropnost preiskovanega medija in relativno majhna prostornina arheoloških ciljnih objektov pa preizkušajo učinek teh algoritmov v robnih pogojih. Za uspešno uvajanje postopkov kvantifikacije, kot sta direktna in inverzna metoda interpretacije, je potrebno razumevanje teoretičnega ozadja izbranih metod in strukture izmerjenih podatkov. Članek obravnava uvajanje različnih filtrov, transformacij in kvantitativne analize za zagotavljanje popolnejše informacije o odkritih arheoloških ostankih, kar predstavlja prvi korak v smeri reševanja inverznega problema interpretacije.

Ključne besede: arheološka geofizika, kvantitativna analiza, magnetna metoda, georadarska metoda

Uvod

Članek je nadaljevanje smernic za učinkovito rabo geofizikalnih raziskav, ki so bile pripravljene v okviru projekta EPOCH (Mušič, B. 2005). Več informacij o tem združenju je dostopnih na spletni strani projekta: <http://www.epoch-net.org>.

Termin »arheološka geofizika«, ki se je uveljavil v arheoloških krogih, opredeljuje naravo ciljnih objektov oz »tarč« raziskave v domeni (ultra)plitve geofizike visoke ločljivosti. Praktično vse geofizikalne metode, ki jih danes uporabljamo pri arheološki prospekciji, so se že prej uporabljale za reševanje stratigrafskih, ekonomsko-geoloških, geotehničnih, inženirsko-geoloških, hidrogeoloških ipd. problemov, kjer so kvantitativni postopki vrednotenja rezultatov praviloma uporabnejši od izključno kvalitativnih analiz. Medtem ko sta osnovna fizikalna teorija in principi uporabe enaka, pa majhne globine in relativno majhna prostornina arheoloških ostalin preizkušajo delovanje »arheološke« geofizike v robnih pogojih, s katerimi se redkeje srečujemo na področju »konvencionalne« geofizike, kjer nehomogenost in anizotropnost vrhnjega sloja tal, ki je naš raziskovani medij, predstavljajo najpomembnejši vir šuma na račun signala oz. koristne informacije iz večjih globin.

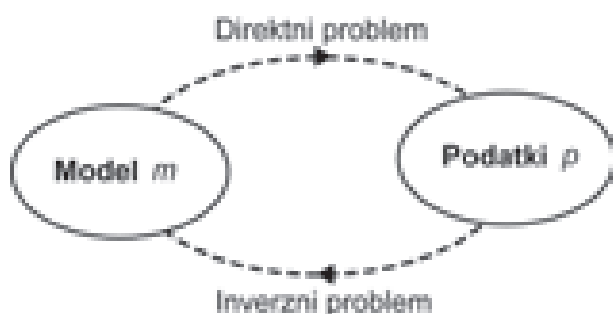
Abstract: Archaeological geophysics is the domain of high resolution (ultra)shallow geophysics. The deterministic interpretation that is put forward in archaeology is slowly substituted by the quantitative analysis previously established in the field of »conventional geophysics«. Determining the physical parameters and the geometry of archaeological remnants is becoming increasingly important. The non-homogeneity and anisotropy of the investigated medium and relatively small volume of archaeological targets are testing the effect of these algorithms in border conditions. For a successful introduction of the quantitative procedures and the direct (as well as inverse) problem, it is crucial to understand the theoretical background of the selected geophysical methods as well as the structure of the measured data. The article discusses the introduction of different filters, transformations and quantitative analyses that assure greater depth of information on the discovered archaeological remnants, which represents the first step in the direction of inverse problem solution.

Keywords: archaeological geophysics, quantitative analyses, magnetic method, ground penetrating radar method

Vključevanje skrbno izbranih kvantitativnih metod s področja »konvencionalne« ali bolje rečeno uporabne geofizike v »arheološko geofiziko«, daje dodatno interpretativno sposobnost arheološkega potenciala, kakor tudi dragoceno izkušnjo za matično področje (ultra)plitve geofizike visoke ločljivosti. Ker je interpretacija v geofiziki definirana kot analiza podatkov za ustvarjanje logičnih, s fizikalno teorijo podprtih modelov o fizikalnih lastnostih pod površinskih objektov, je ključnega pomena poznati možnosti, ki so na voljo plitvi geofiziki za potrebe arheologije. V članku so predstavljeni nekateri postopki kvantifikacije na izbranih primerih geofizikalnih raziskav antičnega mesta Sagalassos v Turčiji (<http://www.archaeology.org/interactive/sagalassos/>). Pri geofizikalnih raziskavah se za postopke določanja fizikalnih lastnosti uporabljata direktna metoda (*forward problem*) in inverzna metoda (*inverse problem*) interpretacije. Pri arheoloških raziskavah se je direktna metoda z arheo-fizikalnimi modeli že precej uveljavila, inverzna metoda pa je ostala na le redkih poskusih, ki so običajno še spregledani.

Metoda

Najpomembnejši vidik geofizike so zaključki o fizikalnih lastnostih preiskovanega medija na osnovi izmerjenih podatkov. To je omogočeno z uvajanjem koncepta di-

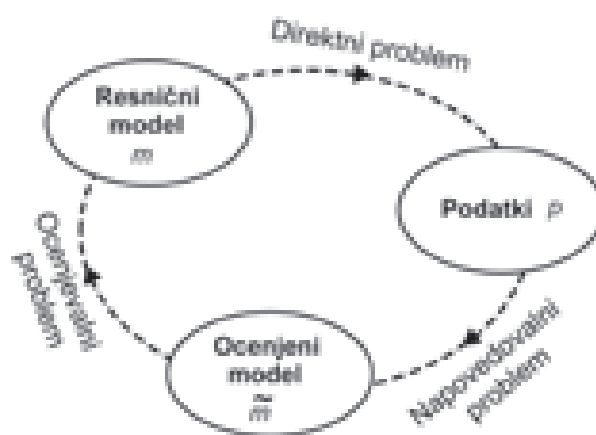


Sl. 1: Običajna definicija direktnega in inverznega problema interpretacije je preenostavna za stvarne situacije v naravi in zato v realnem svetu ne velja (povzeto po Sneider, R. et al. 1999, 119-190).

rektnega in inverznega problema. Fizikalni zakoni predstavljajo podlago za izračunavanje vrednosti fizikalnega polja v izbranih profilih oz. točkah, kar predstavlja napovedovalni model za to, kakšne bi morale biti izmerjene vrednosti za predpostavljen teoretični model. Na ta način lahko napovedujemo anomalije v različnih fizikalnih poljih, ki so posledica različnih predpostavljenih arheoloških ostankov v različnih naravnih danostih. Takšen pristop imenujemo direktni problem interpretacije. Pri inverznem problemu interpretacije je namen rekonstruirati model na osnovi meritev.

Inverzni problem interpretacije je določanje vrednosti ali prostorske spremenljivosti fizikalnih lastnosti s primerjavo izmerjenih vrednosti z napovedanimi vrednostmi za konkretni fizikalni model. V idealnem primeru obstaja eksaktna teorija, ki predpisuje, kako morajo biti izmerjene vrednosti transformirane, da ustvarimo odgovarjajoči model (sl. 1).

Pri tem naletimo na več težav. Prvič so inverzne tehnike običajno uporabne za idealne situacije, s katerimi se v praksi le redko srečujemo. Drugič so eksaktne inverzne tehnike pogosto zelo nestabilne. Najbistvenejši pa je tretji razlog. Pri večini inverznih problemov so modeli, ki jih želimo določiti, funkcije prostorskih spremenljivk. To pomeni, da v splošnem vsebuje model teoretično neskončno veliko stopenj prostosti. V realnosti je količina vrednosti, ki jih lahko uporabimo za določanje modela, običajno končna. Preprosto štetje spremenljivk pokaže, da podatki ne vsebujejo dovolj informacije za enoznačno določitev modela. Pri realističnih situacijah je torej za rekonstrukcijo modela z neskončno veliko stopenj prostosti



Sl. 2: Ustreznejša razlaga inverznega problema interpretacije, kjer je obravnavan kot kombinacija napovedovalnega in ocenjevalnega problema (povzeto po Sneider, R. et al. 1999, 119-190).

na voljo le končna količina podatkov. To pomeni, da inverzni problem ni edinstven postopek z enoznačnimi rešitvami, temveč obstaja veliko modelov, ki enako dobro razlagajo iste podatke in da posledično model, pridobljen z inverzno metodo, ni nujno pričakovani model oz. model, ki ga iščemo. Za stvarne probleme inverzna metoda sestoji iz vsaj dveh korakov (sl. 2) in ne samo enega (sl. 1). V splošnem sta dva bistvena razloga, zakaj se napovedani model razlikuje od resničnega modela. Prvi razlog je neenotnost inverznega problema, kar rezultira v številnih rešitvah (modelih), ki odgovarjajo istim vhodnim podatkom. Drugi razlog je, da realni podatki vedno vsebujejo napake, ki vplivajo tudi na napovedani model (Sneider, R. et al., 119-190). To še posebej velja za (ultra)plitvo geofiziko, ki raziskuje prvih nekaj metrov, kjer so spremenljivost, heterogenost in anizotropnost največje.

Za uspešno geofizikalno raziskavo je ključnega pomena izbor najustreznejših metod in način izvajanja meritev, ki upošteva fizikalne lastnosti arheoloških ciljnih objektov in neposredne okolice. V idealnih razmerah bi izbor najustreznejše geofizikalne metode oz. tehnike narekovali ciljni arheološki objekti. Dejansko ciljni arheološki objekti prispevajo samo določen delež pri tem izboru, ker moramo vselej upoštevati tudi posebnosti okolja, v katerem se ti objekti nahajajo. V geofiziki imenujemo anomalijo v fizikalnem polju, ki je posledica prisotnosti arheološkega objekta, "signal", vse neželjene motnje, ki so posledica številnih drugih okoljskih faktorjev, pa ime-

nujemo “šum”. Izbor najustreznejše metode narekuje izključno ocena razmerja med “signalom” in “šumom”, ki mora biti za izbrano metodo zadosti visoko, da kontrast med obema slojema podatkov zagotavlja uspešno prospekcijsko. V fazi obdelave rezultatov meritev uporabljamo razne filtre in transformacije, ki iz podatkovnih nizov odpravljajo neželjene informacije in v fazi interpretacije še kvantitativne metode za zanesljivejše zaključke o fizikalnih lastnostih in geometriji ciljnih objektov: geofizikalno modeliranje (Desvignes, G. et al. 1999, 85-105; Hašek, V. 1999, 25-42; Marshall, A. 1999, 11-29; Tsoukas, G. N. et al. 2000, 17-30; Coskun, N. et al. 2000, 179-186; Leckebusch, J. et al. 2001, 29-40; Linford, N. 2004, 237-246), simuliranje anomalij (De la Vega, M. et al. 2005, 19-30), inverzna metoda interpretacije (Dimanti, N. G. et al. 2005, 79-91; Desvignes, G., et al. 1999, 85-105; Hašek, V. 1999, 39-42; Eppelbaum, L.V. et al. 2001, 163-185; Zdanovich, G. et al. 2003;), dekonvolucijska metoda (Karousova, O. 1979), kvantitativna integracija geofizikalnih metod (Piro, S. et al. 2000, 203-213), kompozitne slike normaliziranih vrednosti, ki jih interpretiramo s statistično metodo nenadzorovane klasifikacije (unsupervised classification) (Ladefoged, T. N. et al. 1995, 471-481), neuronske mreže (Bescoby, D. J. et al. 1994, 189-199), podaljševanje magnetnih anomalij navzgor in transformacija na magnetni pol (Baranov V. 1957, 359-383).

Rezultati magnetnih raziskav

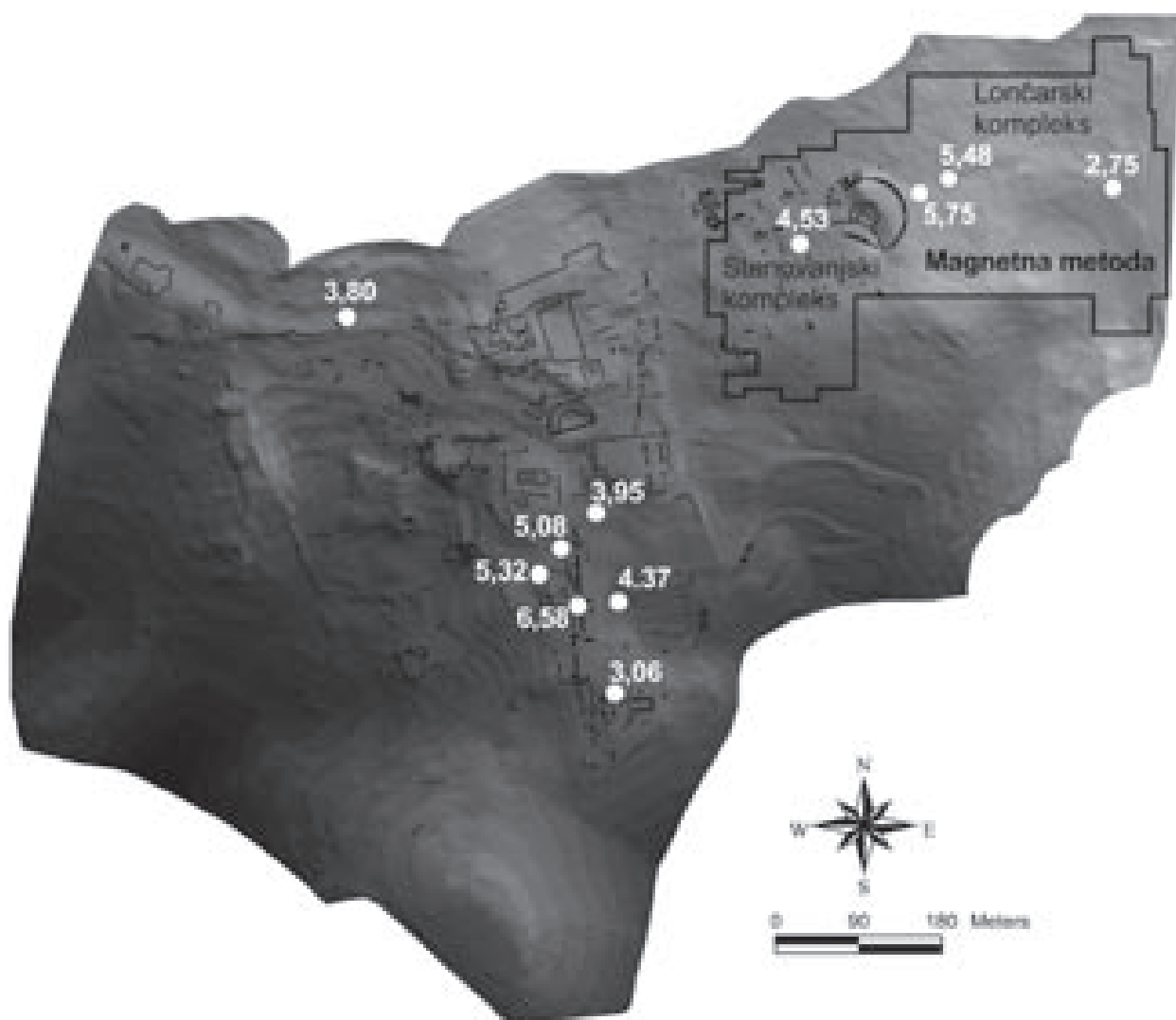
Magnetna metoda temelji na fizikalnih zakonih, ki veljajo za Zemljino magnetno polje. Snovi s sposobnostjo magnetizacije se namagnetijo v prisotnosti zunanjega Zemljinega magnetnega polja z magnetno indukcijo. Stopnja magnetizacije je podana z izrazom $M = \kappa H$, pri čemer je M jakost magnetizacije (magnetna polarizacija, dipolni moment), H jakost Zemljinega magnetnega polja in κ je magnetna susceptibilnost, s katero je določena stopnja magnetizacije za različne snovi. Pri magnetni prospekcijski je merjena fizikalna veličina gostota magnetnega pretoka oz. magnetna indukcija (B), ki je totalno magnetno polje skupaj z učinkom magnetizacije (M). Magnetno indukcijo lahko zapišemo kot $B = \mu_0(H + M) = \mu_0 \mu_r H$, pri čemer je μ magnetna permeabilnost materiala, μ_0 pa magnetna permeabilnost praznega prostora. SI enota za B je Tesla (Telford, W. M. et al, 1990, 64).

Možnosti magnetne metode v največji meri določa kontrast v magnetni susceptibilnosti med arheološkimi ostanki in neposredno okolico. Če želimo rezultate magnetne metode kvantificirati in kreirati teoretične napovedne modele, moramo nujno razpolagati z vrednostmi magnetne susceptibilnosti. V ta namen lahko uporabimo instrument *Kappameter KT-5* (Geofizika, Brno), s katerim merimo navidezno susceptibilnost vzorcev z natančnostjo $\times 10^{-5} \text{SI}$. Na antičnih mestih se susceptibilnost ozadja na veliki površini zaradi številnih dejavnikov spreminja in s tem vpliva na magnetno kontrastnost arheoloških ostankov. To pomeni, da lahko enaki ostanki na različnih delih najdišča na magnetogramih izgledajo nekoliko drugače. Na Sagalassosu smo opravili številne meritve navidezne magnetne susceptibilnosti na površini, pa tudi v izkopnih poljih, deponijah izkopanega materiala, vzorcih za geokemično analizo, geoloških profilih in na jedrih vrtin (sl. 3).

Interpretacija rezultatov magnetnih meritev za potrebe arheologije še vedno v glavnem temelji na preprosti tipologiji anomalij v lokalnem magnetnem polju. Ta deterministični pristop lahko najboljše ilustriramo na primeru obsežne magnetne prospekcijske na antičnem arheološkem najdišču Wroxeter v Angliji, kjer so določili tipe magnetnih anomalij, ki ustrezajo določenim vrstam arheoloških (arhitekturnih) ostankov (Gaffney, C. and V. Gaffney (ur.) 2000).

Za reševanje specifičnih problemov obdelave, prikazovanja in interpretacije kompleksnih rezultatov magnetne metode so na razpolago številni filtri, transformacije kot tudi kvantitativne metode z magnetnim modeliranjem: manipulacija s histogrami (linearne/nelinearne porazdelitve, poenotenje histogramov (histogram equalisation), (semi)logaritemski diagrami), redukcija na magnetni pol (*reduction-to-pole*, RTP), podaljševanje magnetnih anomalij navzgor/navzdol (*upward/downward continuation*), reziduali (residuals), korekcije kontrasta magnetnih anomalij s sintetičnimi vertikalnimi in horizontalnimi gradienti, določanje globin magnetnih virov, določanje deklinacije remanentne magnetizacije, direktna (forward problem) in inverzna metoda (inverse problem) interpretacije, 2D in 3D modeliranja magnetnih anomalij za predpostavljene situacije oz. na podlagi znanih fizikalnih parametrov iz arheoloških izkopavanj.

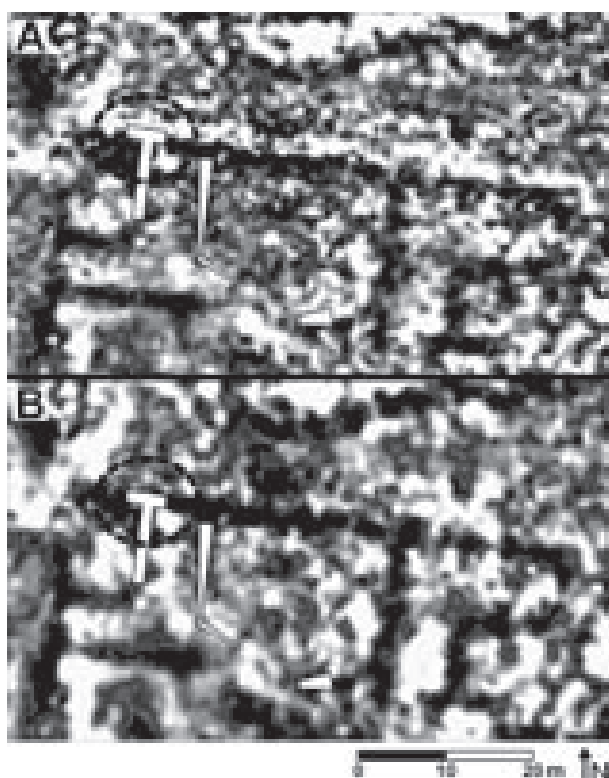
Zaradi bipolarnega značaja Zemljinega magnetnega polja so magnetne anomalije povsod razen na magnetnih polih asimetrične celo v primerih, kadar je razporeditev magnetnih dipolov simetrična. Ker je poleg tega vsaka magnetna anomalija teoretično lahko posledica neskončno veliko



Sl. 3: Digitalni model reliefa antičnega mesta narejen, na podlagi Topografske karte Sagalassosa v merilu 1:500, ki jo je sodelavci izdelal prof. Frans Depuydt (K.U.Leuven). Za izbrane lokacije so prikazane srednje vrednosti navidezne magnetne susceptibilnosti ($\times 10^{-3}$) (Kappameter KT-5), ki ilustrirajo spremenljivost magnetnega ozadja na najdišču. Označena sta tudi vzhodni stanovanjski kompleksa in lončarski kompleks na območju, ki smo ga raziskali z magnetno metodo (Geometrics G-858) (sl. 6).

kombinacij magnetnih virov, je interpretacija magnetnih anomalij praviloma zahteven postopek. Z redukcijo na magnetni pol (*reduction-to-pole*, RTP) lahko odpravimo bipolarnost magnetnih anomalij na poljubni geografski širini s transformacijo v obliko, kot bi se isti objekt nahajal na magnetnem polu, kjer je inklinacija magnetnega polja vertikalna in so anomalije simetričnih teles simetrične (Cooper & Cowan 2005). Ta transformacija korigira zamik med položajem magnetnih anomalij (bližnje relativno višje in nižje vrednosti na karti izolinij) in magnetnih

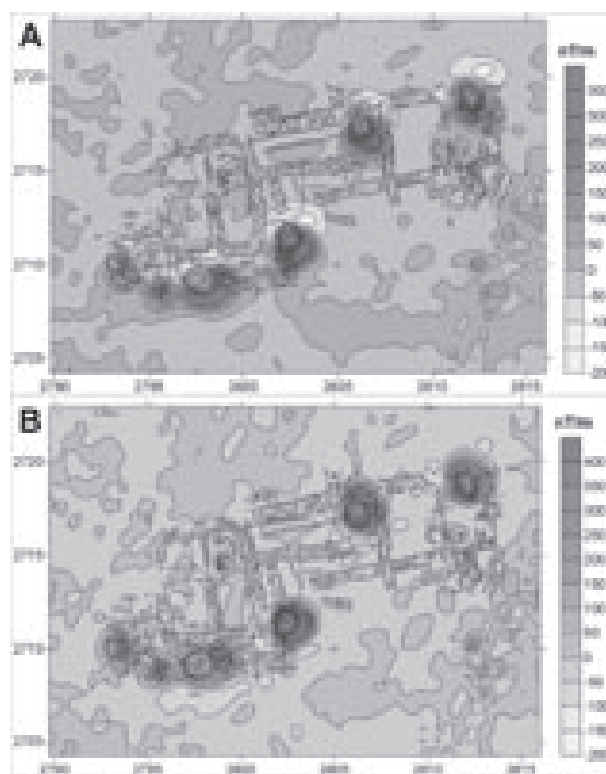
virov, kar je posledica vektorskega značaja Zemljinega magnetnega polja. Učinek RTP je prikazan na sliki 4 s »surovimi« vrednostmi in bipolarnostjo na magnetogramu (sl. 4A) in transformirane vrednosti na magnetogramu (sl. 4B). Na podlagi rezultatov geofizikalne raziskave je Peter Talloen (KULeuven) pri izkopavanjih odkril več zidov, katerih položaj je prikazan na obeh slikah za boljšo ilustracijo učinka RTP. Jasno se vidi, da se nahaja po uporabi transformacije RTP magnetna anomalija točno nad njenim virom, ki je v tem primeru zid iz apnenčevih lomljencev.



Sl. 4: »Gimnazij«. A: »surove« vrednosti z bipolarnostjo magnetnih anomalij, B: transformirane vrednosti z uporabo RTP. Primerjava z zidovi, odkritimi pri izkopavanjih P. Talloena (K.U.Leuven), ilustrira pomen odstranjevanja bipolarnosti magnetnih anomalij z RTP (detajl znotraj črtkane krožnice). Položaj obravnavanega območja je označen na sliki 6: A.

V splošnem velja, da mora biti za uspešno transformacijo usmerjenost totalne magnetizacije magnetnih virov znotraj obravnavanega območja vzporedna Zemljinemu magnetnemu polju. To pomeni, da transformacija ne deluje pravilno v primeru remanentne magnetizacije, ker je usmerjenost magnetnih dipolov praviloma drugačna od usmerjenosti Zemljinega magnetnega polja. Neustreznost RTP transformacije v takšnih primerih se vidi na slikah 8A in 8B, kjer so magnetne anomalije železnih predmetov z drugačno usmeritvijo magnetnih dipolov po transformaciji popolnoma deformirane (označeno z X).

Testi na eni od lončarskih delavnic na Sagalassosu dokazujejo, da transformacija deluje korektno za posebne primere remanentne magnetizacije manjših deklinacij. Za primerjavo smo uporabili rezultate arheoloških



Sl. 5: »Lončarski kompleks«. Prikaz delovanja RTP transformacije na arheoloških ostankih s termoremanentno magnetizacijo. Primerjava magnetogramov z rezultati izkopavanj kaže izrazito prostorsko dislociranost »surovih« bipolarnih magnetnih anomalij (A). Centri magnetnih anomalij se nahajajo natančno nad lončarskimi pečmi šele po uporabi RTP (B), ki odpravi bipolarnost. Položaj obravnavanega območja je označen na sliki 6: B.

izkopavanj, ki jih je leta 2004 vodil Jeroen Poblome (K.U.Leuven) (Poblome, J. 2006, 189-212).

Za arheološko interpretacijo je pomemben učinek RTP, da so izračunane anomalije veliko preprostejše z relativno najmočnejšim pozitivnim delom magnetne anomalije točno nad virom anomalije. Poleg reducirane kompleksnosti magnetograma, ki vsaj deloma poenostavi interpretacijo, dobimo s to transformacijo torej tudi natančen položaj magnetnih virov (=arheoloških ostankov). Poleg ostalih postopkov, ki so omenjeni v nadaljevanju, je ta ugotovitev pomembna za načrtovanje natančne upodobitve območij, ki ne bodo v doglednem času v celoti izkopana.

Podatke o lokalnem Zemljinem magnetnem polju, ki jih potrebujemo za to transformacijo, dobimo na spletni



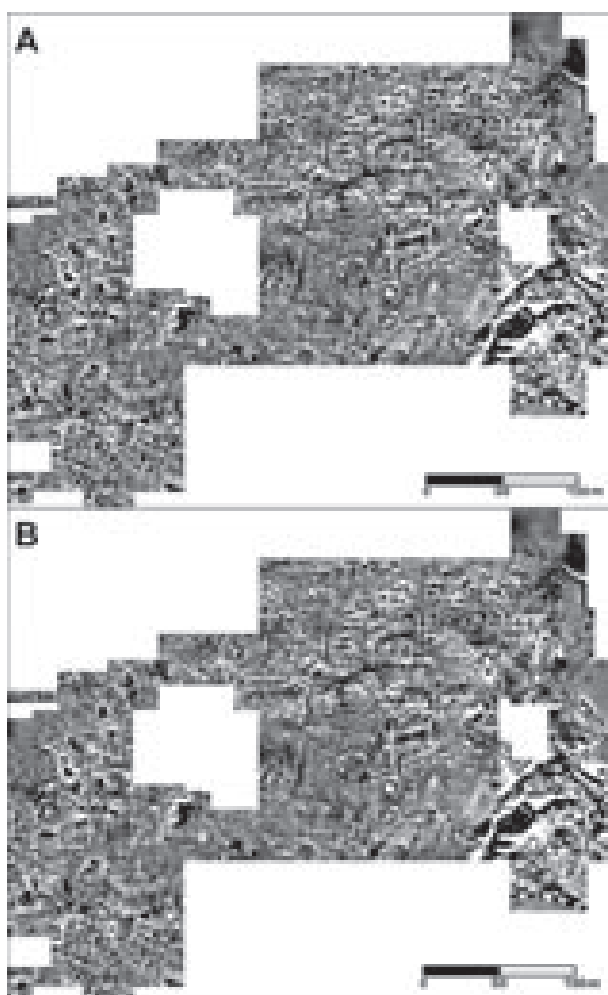
Sl. 6: Magnetogram vertikalnega gradienta gostote totalnega magnetnega pretoka. Označene so površine (A-D), ki so v članku podrobneje obravnavane. Položaj raziskane površine je označen na sliki 3.

strani International Geomagnetic Reference Field (IGRF; <http://www.ngdc.noaa.gov/AGA/vmod/igrf.html>).

Zaradi potencialnega značaja magnetnega polja lahko izračunamo vrednosti magnetnega pretoka na poljubni višini nad dejansko višino magnetnega profila. Ta postopek imenujemo podaljševanje magnetnih anomalij navzgor (*upward continuation*), ki je pravzaprav učinkovit filter visokih frekvenc (low pass filter). Njegova uporabnost je predvsem v odstranjevanju magnetnih anomalij, ki so posledica magnetnih virov na površju ali plitvo pod njim. Na ta način učinkovito odstranimo vse površinske vire magnetnega šuma, ki ga ustvarja heterogena sestava vrhnjega horizonta tal, in poudarimo magnetne anomalije z

viri na večjih globinah (sl. 7). Nadaljevanje magnetnih anomalij navzgor lahko uporabimo kot vhodne podatke za direktno in inverzno metodo, ker bistveno zmanjša šum površja in s tem izboljša zanesljivost napovedovalnega modela.

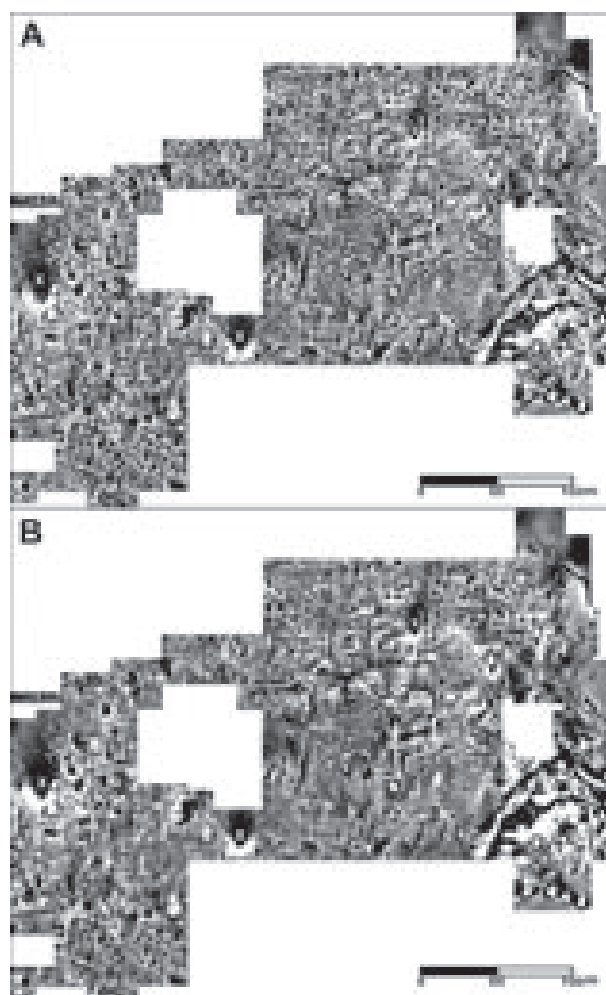
Če na ta način izračunane vrednosti magnetnega polja odštejemo od originalnih vrednosti v izmerjenem magnetnem profilu, pa nasprotno odstranimo učinek virov magnetnih anomalij na večjih globinah, s čimer zmanjšamo med drugim tudi učinek regionalnega trenda zaradi geološke podlage in poudarimo magnetne anomalije plitvih virov. Te rezidualne razumemo kot indikacijo o »kontaminaciji« površine s feromagnetnimi materiali zaradi



Sl. 7: Podaljševanje magnetnih anomalij navzgor (upward continuation), s katero odpravimo oz. zmanjšamo učinek magnetnih virov na današnji površini. A: 20 cm nad dejansko višino magnetnega profila, B: 30 cm nad dejansko višino magnetnega profila. Glej tudi slike 3 in 6.

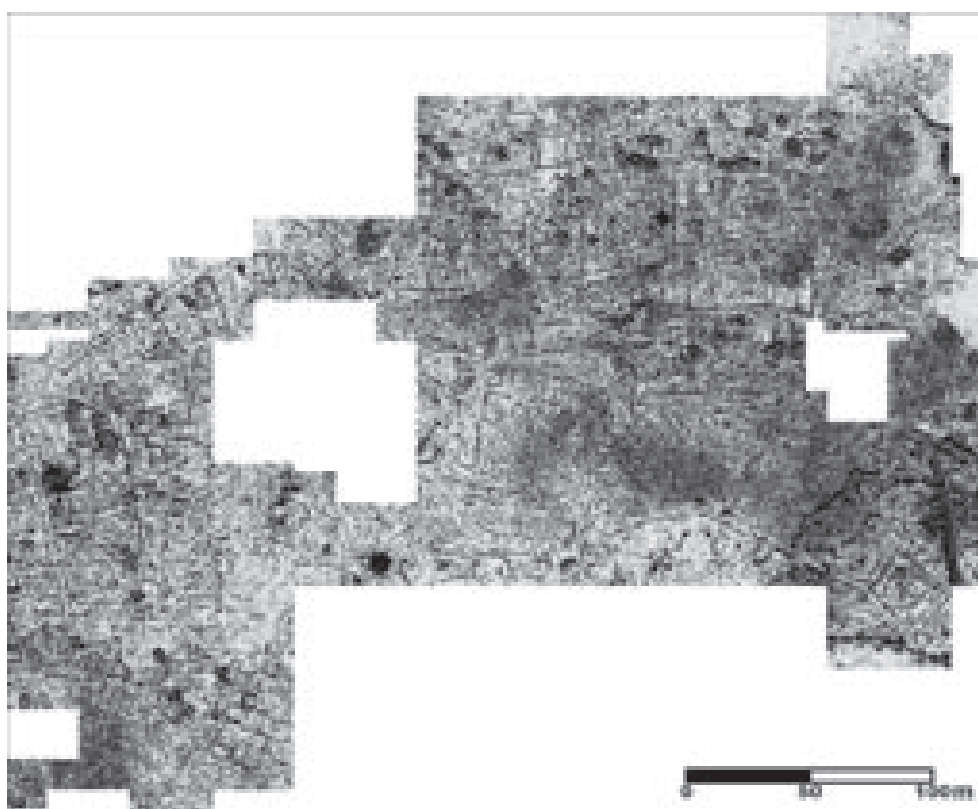
obrtnih dejavnosti lončarstva in/ali železarstva, za kar se sicer v arheologiji uporabljajo aktivne metode meritev magnetne susceptibilnosti.

Pri magnetni metodi se za določanje fizikalnih lastnosti arheoloških tarč praviloma uporabljajo teoretični 2D (sl. 10) in 3D (sl. 11) arheofizikalni modeli (glej. npr.: Desvignes, G. et al. 1999, 85-105; Marshall, A. 1999, 11-29; Tsokas, G. N. et al. 2000, 17-30; Coskun, N. et al. 2000, 179-186; Hašek, V. 1999, 25-42), ki izhajajo iz interpretacije na osnovi izmerjenih vrednosti magnetnega polja in primerjave z izračunanimi magnetnimi anomalijami za predpo-

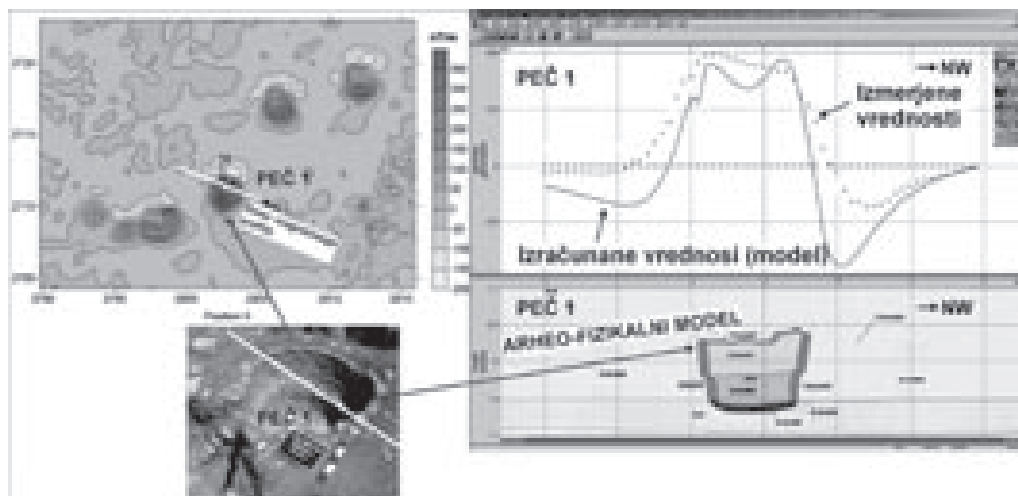


Sl. 8: Karta magnetnih anomalij po transformaciji z redukcijo na pol (reduction-to-pole, RTP) (A) in podaljševanje magnetnih anomalij navzgor (upward continuation) (B), 50 cm nad dejansko višino magnetnih profilov in redukcija na pol. Z X so označene ponesrečene transformacije, ki so posledica sodobnih železnih predmetov z bistveno različno usmeritvijo magnetnih dipolov od današnje smeri Zemljinega magnetnega polja, ki za ta algoritem ni rešljiva. Glej tudi slike 3 in 6.

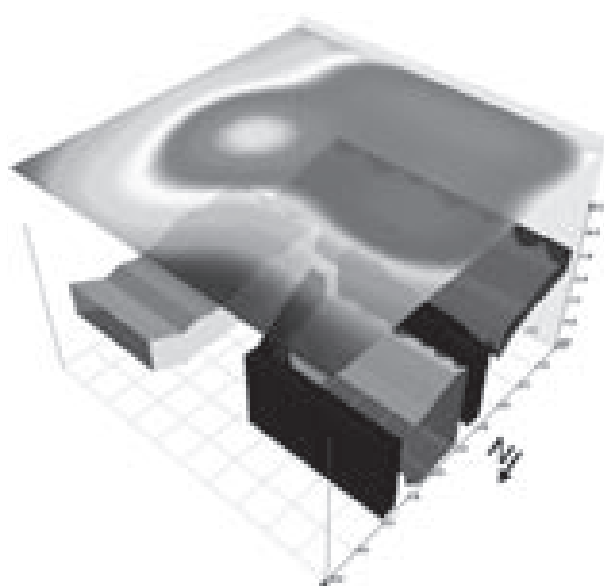
stavljene arheofizikalne modele. Najustreznejši model je tisti, pri katerem je razlika med izmerjenimi in teoretičnimi oz. izračunanimi vrednostmi najmanjša. Spremenljivke so oblika objektov, njihova velikost, globina ter njihove vrednosti magnetne susceptibilnosti. Poleg tega moramo poznati podatke o inklinaciji (I), deklinaciji (D) in gostoti magnetnega pretoka totalnega Zemljinega magnetnega polja (H). Te podatke za poljubno izbrano točko na Zemljinem površju dobimo iz internetnih naslovov geomagnetnih



Sl. 9: Reziduali magnetnih anomalij, pri čemer smo odšteli izmerjene vrednosti magnetnega pretoka totalnega magnetnega polja od izračunanih s podaljševanjem magnetnih anomalij navzgor (upward continuation). Temnejša polja na magnetogramu rezidualov so na območjih z visokim magnetnim šumom ozadja, ki je posledica drobnih magnetnih virov na današnji površini ali plitvo pod njo. Najverjetneje gre za »kontaminacijo« z ferimagnetnim materialom pri lončarstvu in morda tudi kovaštvu. Glej tudi slike 3 in 6.



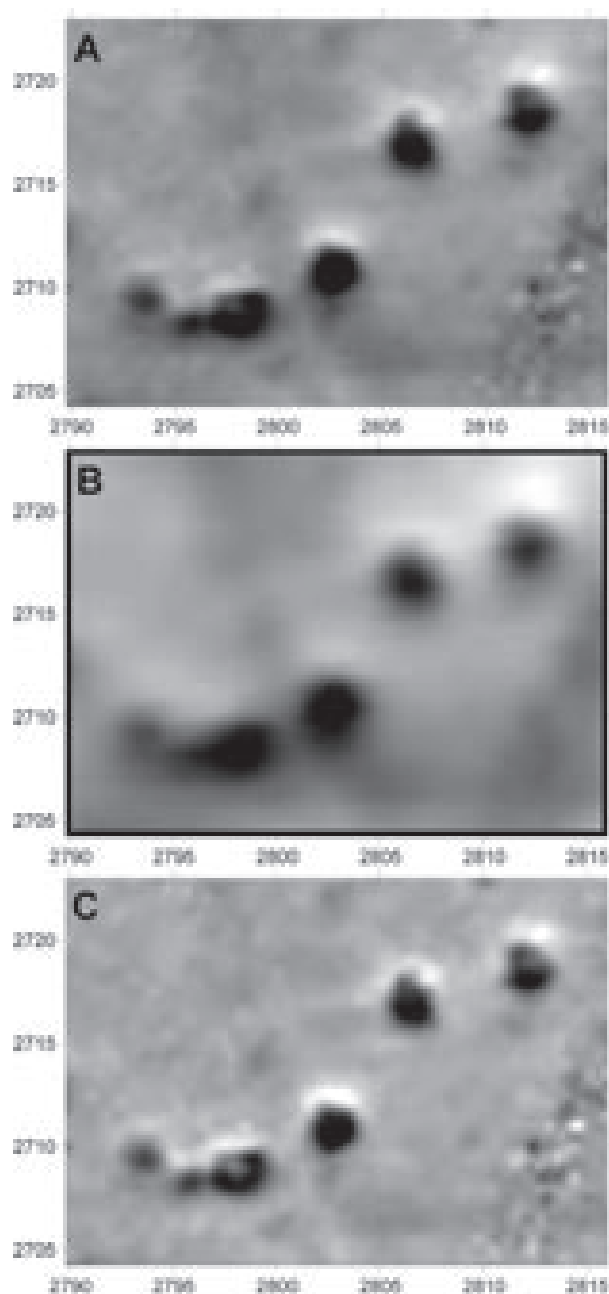
Sl. 10: Shematski prikaz postopka za ustvarjanje 2D teoretičnega magnetnega modela lončarske peči na osnovi podatkov iz izkopavanj in primerjava s predhodno izmerjenimi vrednostmi. Položaj obravnavanega območja je označen na sliki 6: B.



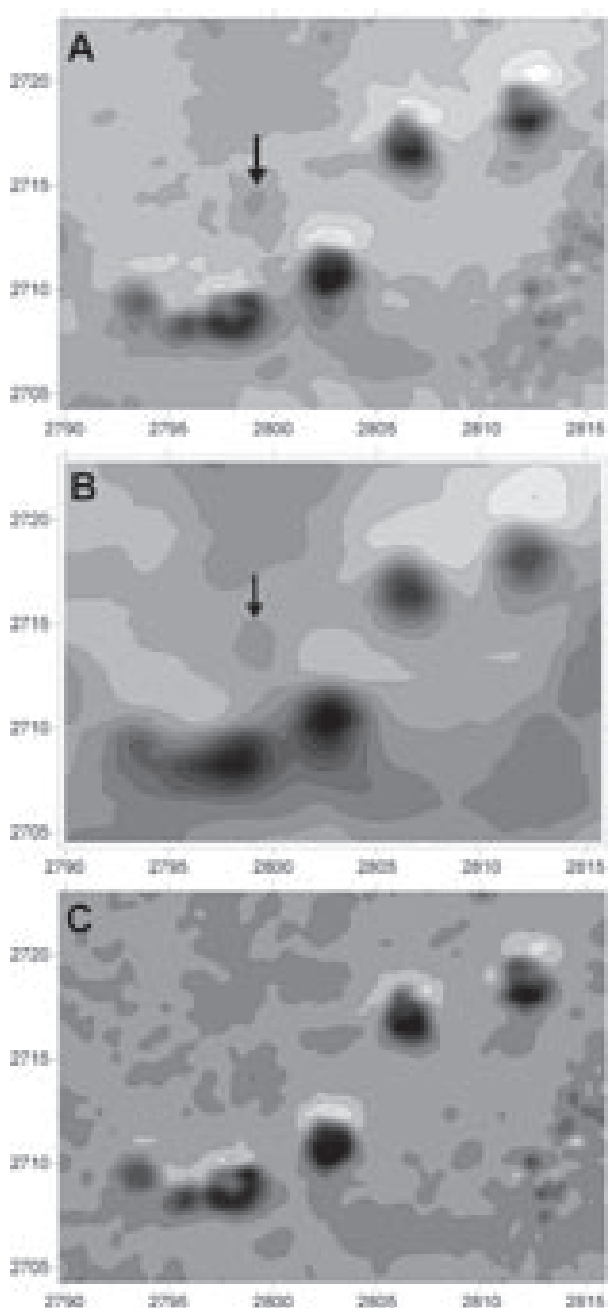
Sl. 11: Primer teoretičnega 3D modela magnetnih anomalij arhitekturnih ostankov na osnovi podatkov z arheoloških izkopavanj.

observatorijev (IGRF - International Geomagnetic Reference Field – IAGA V-MOD Division; <http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>) (glej. npr.: Mušič, B. et al. 1998, 157-286; Mušič, B. et al. 2007, 219-283).

Poleg boljše ločljivosti in hitrosti odčitavanja je pomembna prednost cezijevega magnetometra *Geometrics G-858* možnost prikazovanja izmerjenih vrednosti totalne gostote magnetnega polja za zgornji in spodnji senzor posebej, kakor tudi na (pseudo)gradientni način, kjer dobimo prirastek gostote magnetnega polja med obema senzorjema. Čeprav se gradientni način uporablja veliko pogosteje, predvsem pa na velikih površinah, ker sam po sebi eliminira učinek dnevnih sprememb v Zemljinem magnetnem polju in zato ne potrebujemo baznega senzorja, ki je pri daljših (celodnevni) meritvah z enim senzorjem za to korekcijo nujno potreben. Meritve totalne gostote magnetnega polja na gradientni način pa za razliko od instrumentov, ki merijo samo vertikalno komponento, znatno povečajo kontrastnost magnetnih anomalij. Premajhna oddaljenost senzorjev v vertikalni smeri (magnetometri s fiksnimi senzorji), pa lahko zmanjša ali celo popolnoma zaduši magnetne anomalije z viri na večjih globinah. Kakorkoli že, možnost spremljanja totalnega magnetnega polja na ločenih senzorjih je poleg



Sl. 12: Rezultati meritev magnetnega pretoka totalnega magnetnega polja na spodnjem senzorju (A), zgornjem senzorju (B) in gradient (C), prikazani s sivimi otenki. Na rezultatih meritev na spodnjem senzorju je vidnih več podrobnosti kot na gradientnem načinu. Primerjava med spodnjim in zgornjim senzorjem nam pove veliko o relativnem razmerju v ohranjenosti peči, ker so šibkejšje anomalije od slabše ohranjenih peči na zgornjem senzorju slabše vidne. Položaj obravnavanega območja je označen na sliki 6: B.



Sl. 13: Rezultati meritev magnetnega pretoka totalnega magnetnega polja na spodnjem senzorju (A), zgornjem senzorju (B) in gradientu (C), prikazani z izolinijami. S puščico je označena šibka magnetna anomalija slabše ohranjene lončarske peči, ki je vidna na obeh senzorjih, na gradientnem načinu prikazovanja rezultatov pa ni vidna. Položaj obravnavanega območja je označen na sliki 6: B.

gradientnega načina prikazovanja izmerjenih vrednosti vsekakor pomembna prednost cezijevih magnetometrov. Zaradi velike hitrosti meritev (5-10Hz) lahko premerimo razmeroma velike površine v sorazmerno kratkem času, ko se značaj izmerjenih magnetnih anomalij še ne spremeni bistveno zaradi učinka počasnih dnevnih sprememb v Zemljinem magnetnem polju. Če trajajo meritve vzdolž profila npr. manj kot 2 min, lahko privzamemo, da spremembe Zemljinega magnetnega polja odgovarjajo nizkofrekvenčnim prostorskim spremembam, ki jih lahko dovolj natančno opišemo in odpravimo že z linearno regresijo (če ne pa zanesljivo s polinomi druge stopnje), ker trend Zemljinega magnetnega polja preprosto odštejemo od izmerjenih vrednosti. Po podatkih iz literature (Tabbagh, J. 2003, 75-81) so meritve gostote magnetnega pretoka s spodnjim senzorjem, ki je bližje površini, celo boljše od gradientnega načina (sl. 12 in 13).

Rezultati raziskav z georadarjem

Z georadarjem (GPR-Ground Penetrating Radar) preko oddajne antene (*transmitter*), usmerjene v tla, pošiljamo impulze elektromagnetne energije in s sprejemno anteno (*receiver*) registriramo čase in amplitude povratnih valov. Ob poznavanju dielektrične konstante in s tem hitrosti širjenja EM valovanja v preiskovanem mediju, lahko čase povratnih odbojev (ns) pretvorimo v dolžinske enote oz. globine. Delež elektromagnetnega valovanja, ki se odbije na neki diskontinuiteti med dvema različnima materialoma (npr. tla/zid, tla/arheološka plast, ...), je odvisen od kontrasta v dielektrični konstanti (v manjši meri od konduktivnosti in magnetne permeabilnosti) in razmerja med valovno dolžino EM valovanja (določena s frekvenco oddajne antene) in debelino arheološkega objekta. Vertikalno in horizontalno ločljivost ter globino dosega georadarskega signala v praksi nadziramo z izbiro ustrezne centralne frekvence oddajne antene, ki določa valovno dolžino elektromagnetnega valovanja. Ločljivost je v splošnem določena s polmerom eliptične osnovne ploskve stožca elektromagnetnega snopa, ki je definirana kot: $A=\lambda/4$ (Leckebusch, J. et al. 2001, 32). To pomeni, da lahko v splošnem odkrijemo objekte, katerih velikost je večja ali enaka četrtini valovne dolžine elektromagnetnih valov v določenem mediju. Tudi če je temu pogoju zadoščeno, bo objekt viden na radargramu le v primeru, če so amplitude odbojev zadosti kontrastne. Amplituda odboja elektromagnetnih valov na meji dveh

materialov z različno dielektričnostjo je odvisna od refleksijskega koeficienta: $R = (\epsilon_1^{1/2} - \epsilon_2^{1/2}) / (\epsilon_1^{1/2} + \epsilon_2^{1/2})$ pri čemer je ϵ_1 dielektričnost okolja oz. medija in ϵ_2 je dielektričnost ciljnega objekta (Leckebusch, J. et al. 2001, 36).

Globina dosega je v največji meri odvisna od frekvence oddajne antene in znaša pri 200 MHz anteni, ki jo najpogosteje uporabljamo, v suhem okolju ob optimalnih pogojih največ 7 m, običajno pa do 5 m. Poleg frekvence antene namreč na globino dosega močno vpliva tudi vsebnost vode v tleh.

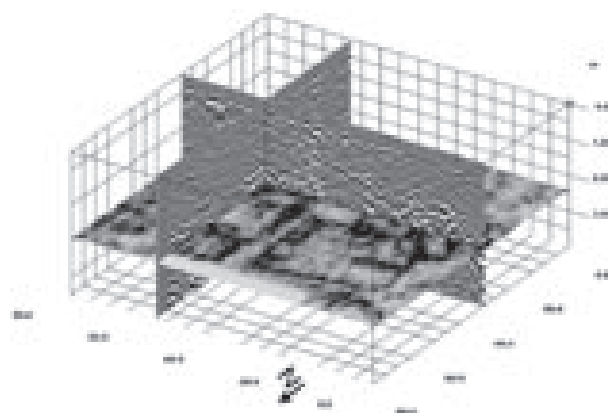
Poleg tega moramo upoštevati tudi pojemanje signala z globino zaradi dušenja. Pojemanje signala pojasni, kako se energija »izgubi« oz. »potroši«. Izguba energije se pojavlja kot transformacija iz ene vrste energije v drugo. Tako se lahko elektromagnetna energija npr. spremeni v toplotno energijo.

Najbolj razširjen je način prikazovanja rezultatov s časovnimi rezi (*time slices*) (glej npr. Neubauer, W. et al., 2002, 135-156 in Leckebusch, J. 2003, 213-240), ki pomenijo globinske (vodoravne) reze serije vzporednih in praviloma enako oddaljenih radarskih profilov. Priporočljiva razdalja med vzorednimi profili je 0,5 m in le

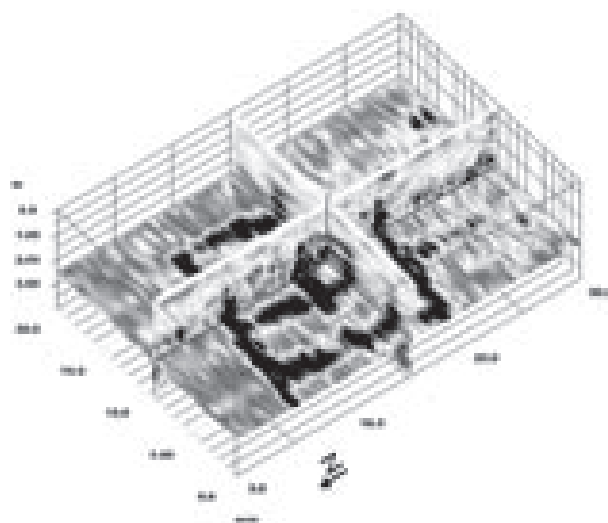


Sl. 14: Horizontalni rezi radarskih odbojev (*time slices*) na območju stanovanjskega kompleksa (sl. 6:D). Serija »tlorisov« oz. diagram enakih amplitud v določenem območju povratnih radarskih signalov (v ns) daje vpogled v spremembo položaja in smeri zidov, kar je lahko koristna indikacija faznosti gradnje že pred izkopavanji.

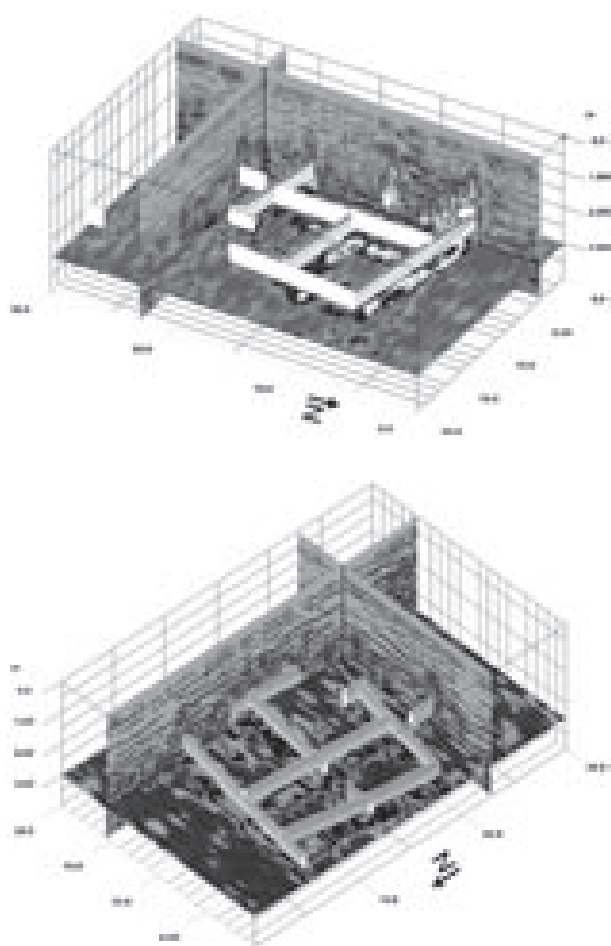
izjemoma, kjer terenske okoliščine tega ne dopuščajo, 1m. Rezultat časovnih rezov je diagram enakih amplitud odbojev v istem časovnem območju povratnih valov (v ns). V arheološki praksi to pomeni serijo »tlorisov« na poljubnih globinah. V nekaterih primerih s takšnim pri-



Sl. 15: 3D prikaz radarskih odbojev na stanovanjskem kompleksu (sl. 6: D). Negativne in pozitivne amplitude odbojev od arhitektur v tlorisu so poenotene s Hilbertovo transformacijo, v vertikalnih ravninah so prikazani nekorrigirani odboji od zidov s pozitivnimi in negativnimi amplitudami. Arhitekturne ostanke lahko prikažemo v poljubni kombinaciji horizontalnega in vertikalnih prerezov.



Sl. 16: 3D prikaz radarskih odbojev na območju »gimnazija« (sl. 6: C). Hiperbole so deloma odpravljene z migracijo, negativne in pozitivne amplitude odbojev pa poenotene s Hilbertovo transformacijo zaradi nazornejšega in bolj realističnega upodabljanja arhitekturnih ostankov.



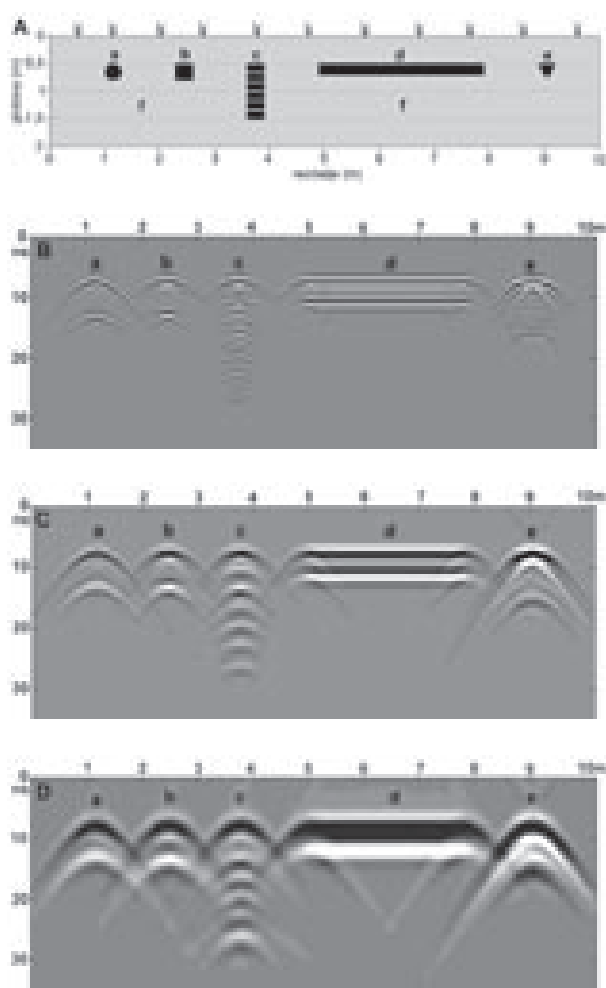
Sl. 17: Primer interaktivne interpretacije radarskih odbojev na sliki 16 v 3D okolju. Položaj raziskane površine je označen na sliki 6: C.

kazovanjem amplitud radarskih odbojev pridobimo tudi informacije o faznosti gradnje (sl. 14).

Čedalje bolj se uveljavlja tudi 3D način prikazovanja rezultatov georadarske raziskave (sl. 15 in 16) z interaktivno interpretacijo radarskih odbojev (sl. 17). Prednost tega načina je vpogled v amplitude radarskih odbojev (arheološke strukture) z istočasnim opazovanjem presekov radarskih odbojev v treh pravokotnih ravninah, kar omogoča natančne zaključke o obliki in prostorskih razsežnostih arheoloških ostankov. Na ta način hitro in zanesljivo ocenimo globino, na kateri se pojavijo arhitekturni ostanki, relativne razlike v debelini zidov in njihovi ohranjenosti, identificiramo prostore s tlakovano površino ipd. (glej npr. Neubauer, W. et al., 2002, 135-156).

Modeliranja georadarskih signalov (glej. npr. Leckebusch, J. 2003, 213-240) se poslužujemo, kadar moramo zagotoviti kvantitativne podatke o podpovršinskih fizikalnih lastnostih arheoloških ostankov in njihovi geometriji. Georadar beleži amplitudo elektromagnetnega polja kot funkcijo prostorskega položaja, orientacije in časa. Merjeno elektromagnetno polje korigiramo z obdelavo, da odstranimo nepravilnosti pri meritvah, zmanjšamo šum in morebitne interference. S tem določimo natančen, kalibriran položaj signalov v prostoru in času in lahko enačbe, ki opisujejo širjenje elektromagnetnega valovanja, uporabimo tako, da na osnovi amplitude elektromagnetnega polja dobimo fizikalne lastnosti arheoloških ostankov in ocenimo njihovo geometrijo. Če so znane električne in magnetne lastnosti materialov, lahko uporabimo značilnosti frekvenčne domene in enačbe za izpeljavo dodatnih fizikalnih veličin, kot so npr. gostota in vsebnost vode. Iz prostorske razširjenosti le-teh podamo statistično ovrednoteno heterogenost medija in sklepamo na geološko zgradbo oz. geološke procese, geometrijske parametre (velikost, oblika in orientacija) idr..

Na sliki 18 (A) so prikazani modelni radarski odboji za preproste oblike arhitekturnih elementov iz apnenčevih lomljencev (njihov premer, širina oz. debelina znaša 30 cm): manjši elementi krožnega preseka(a), manjši elementi kvadratnega preseka (b), tanek zid (c) in cesta tlakovana z apnenčevimi lomljenci (d). Dodan je še model negativne oblike oz. jarka (e) zapolnjenega z vlažnim peskom. Vse našteje oblike se nahajajo v suhem pesku (f). Odboji so izračunani za antene s centralnimi frekvencami 900 (B), 400 (C) in 200 (D) MHz. Teoretične modele uporabljamo za kvantitativno interpretacijo rezultatov georadarske raziskave in napovedovanje ustreznosti georadarske raziskave za odkrivanje določenih tipov arheoloških ostankov v specifičnih naravnih danostih. Za predpostavljeno situacijo na sliki 18A je najprimernejša 400 MHz antena, ker so radarski odboji ob ustreznem globinskem dosegu, dobri vertikalni in lateralni ločljivosti, na dielektričnih mejah kontrastni in nedvoumni. V realni situaciji, bi se zaradi večjega globinskega dosega lahko odločili tudi za anteno s centralno frekvenco 200 MHz, ki pa ima slabšo ločljivost. Podobno velja tudi za terene z nehomogeno sestavo vrhnjega sloja tal in razgibano morfologijo površja. 200 MHz antena je manj občutljiva na učinek razgibanega površja, ki onemogoča stalni kontakt antene



Sl. 18: Modeli georadarskih odbojev za predpostavljano situacijo (A) so manjše arhitekturne elemente iz apnenca krožnega preseka (a) in kvadratnega preseka (b), zid iz apnenca (c), cesta, tlakovana z apnenčevimi ploščami (d), in jarek (e). Dielektričnost za arhitekturne elemente iz apnenca (a, b, c in d) je 8, dielektričnost vlažnega peska v jarku (e) je 25 in dielektričnost okolice iz suhega peska je 5. Teoretični modeli radarskih odbojev za 900 MHz anteno (B), 400 MHz anteno (C) in 200 MHz anteno (D).

s podlago, kar poveča dušenje pri prodiranju signala v tla (*coupling effect*). V vsakem primeru pa nam pravilno načrtovani teoretični modeli pomagajo razumeti situacijo pod površjem, ker lahko za anteno poljubne centralne frekvence ustvarimo teoretični model za katerega so razlike med izmerjenimi in izračunanimi odboji najmanjše. Na ta način dobimo zelo dober približek fizikalnih lastnosti (dielektričnost) in geometrije arheoloških ostankov.

Zaključki

Na primeru obsežne geofizikalne raziskave na arheološkem najdišču Sagalassos v Turčiji (<http://www.archaeology.org/interactive/sagalassos/>) so izbrani rezultati magnetne in georadarske metode obdelani in prikazani v smislu zagotavljanja kvalitetnejših podatkov za kvantitativno interpretacijo. Z uporabo podaljševanja magnetnih anomalij navzor (*upward continuation*) smo odstranili magnetni učinek drobnih magnetnih virov na površini in s tem povečali kontrastnost globljih arheoloških ostankov. Z navidezno transformacijo izmerjenih vrednosti na magnetni pol (*reduction-to-pole*) smo odpravili izrazito bipolarnost magnetnih anomalij in dobili s tem preprostejši magnetogram, kjer se pozitivni gradienti nahajajo natančno nad arheološkimi ostanki. Širina magnetnih anomalij ustreza dejanski širini oz. premeru arheoloških objektov, ki jih lahko na ta način v tlorisu natančno zamejimo. Tretjo dimenzijo (globino) dobimo z uporabo direktne metode oz. magnetnih modelov, ki upoštevajo podatke o magnetni susceptibilnosti in geometriji podobnih objektov odkritih pri arheoloških izkopavanjih. Relativna razmerja v stopnji ohranjenosti objektov s termoremanentno magnetizacijo (lončarske peči) ugotavljamo z analizo totalnega magnetnega pretoka na spodnjem in zgornjem senzorju. Primerjava rezultatov (pseudo)gradientnega načina in spodnjega senzorja magnetometra kažejo, da za majhne površine ne potrebujemo baznega senzorja in da so rezultati meritev samo na spodnjem senzorju včasih podrobnejši in z manj šuma. Obdelava georadarskih profilov z migracijo in Hilbertovo transformacijo bistveno prispeva k zanesljivejši oceni geometrijskih parametrov, ker odpravimo hiperbolične oblike odbojev, ki navidezno povečajo oz. popačijo reflektorje in poenotimo pozitivne in negativne amplitude odbitih valov. Na horizontalnih rezih radarskih odbojev (*time slices*) in 3D prikazih lahko na ta način natančneje ocenimo geometrijske parametre, ki so pomembni npr. za oceno stopnje ohranjenosti arhitekturnih ostankov. 2D modeli radarskih odbojev nam pomagajo razumeti odnose med dielektričnimi konstantami v preiskovanem mediju in s tem sklepati na fizikalne lastnosti materialov. Radarske modele lahko uporabljamo tudi kot napovedovalne modele v situacijah, ko imamo na voljo podatke o naravnem okolju in arheoloških ostankih. V tem primeru z uporabo modelov ocenimo ustreznost georadarske metode oz. napovemo katera centralna frekvenca oddajne antene je najustreznejša glede na velikosti objektov, globino in refleksijski koeficient.

Literatura

- BARANOV, V. 1957, A new method for interpretation of aeromagnetic maps: pseudo gravimetric anomalies. - *Geophysics* 22, 359-383.
- BESCOBY, D. J., GAVIN C. C. in P. N. CHROSTON 2004, Enhanced interpretation of magnetic survey data using artificial neural networks: a case study from Butrint, southern Albania. - *Archaeological Prospection* 11 (4), 189-199.
- COOPER, G. R. J. in D. R. COWAN 2005, Differential reduction to the pole. - *Computer & Geosciences* 31.
- COSKUN, N. in J. E. SZYMANSKI 2000, A discussion on the resolution of two-dimensional resistivity modeling. - *Archaeological Prospection* 6 (4), 179-186.
- De la VEGA, M., OSELLA, A., LASCANO, E. in J. M. CARCIONE 2005, Ground-penetrating radar and geoelectrical simulations of data from the Floridablanca archaeological site. - *Archaeological Prospection* 12 (1), 19-30.
- DESVIGNES, G., TABBAGH, A. in C. BENECH 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. in A. VAFIDIS 2005, Integrated interpretation of geophysical data in the archaeological site of Europos (northern Greece). - *Archaeological Prospection* 12 (2), 79-91.
- EPPELBAUM, L. V., KHESIN, B. E. in S. E. ITKIS 2001, Prompt magnetic investigations of archaeological remains in areas of infrastructure development: Israeli Experience. - *Archaeological Prospection* 8 (2), 163-185.
- GAFFNEY, C. in V. GAFFNEY 2000, Non-invasive investigations at Wroxeter at the end of the Twentieth Century. - Special issue of *Archaeological Prospection* 7 (2).
- HAŠEK, V. 1999, Methodology of geophysical research in archaeology. - *Bar International Series* 769, 127 pp.
- KAROUSOVA, O. 1979, Dekonvoluce profilových křivek T (dipl. práce). - MS PrF UK Praha.
- LADEFOGED, T. N., MCLACHLAN, S. M., ROSS, S. C. L., SHEPPARD, P. J. in D. G. SUTTON 1995, GIS-based image enhancement of conductivity and magnetic susceptibility data from Uretururi Pa and Fort Resolution, New Zealand. - *American antiquity* 60 (3), 471-481.
- LECKEBUSCH, J. 2003, Ground-penetrating radar: A modern three-dimensional prospection method. - *Archaeological Prospection* 10, 213-240.
- LECKEBUSCH, J. in R. PEIKERT 2001, Investigating the true resolution and three-dimensional capabilities of Ground-penetrating radar data in archaeological surveys: Measurements in a sand box. - *Archaeological Prospection* 8, 29-40.
- LINFORD, N. 2004, From hypocaust to hyperbola: Ground-penetrating radar surveys over mainly Roman remains in the UK. - *Archaeological Prospection* 11, 237-246.
- MARSHALL, A. 1999, Magnetic prospection at high resolution: survey of large silo-pits in Iron age enclosures. - *Archaeological Prospection* 6, 11-29.
- MUŠIČ, B. 2005, Archaeogeophysical research. EPOCH (IST-2002-507382). Excellence in Processing Open Cultural Heritage. Network of Excellence. D3.1.1: Overview of CH related IT research, related to stake-holder needs and the position of Europe therein (<http://arheologija.ff.uni-lj.si/zaposleni/music.html>)
- MUŠIČ, B. in L. ORENGO 1998, Magnetometrične raziskave železnodobnega talilnega kompleksa na Cvingerju pri Meniški vasi. - *Arheološki vestnik* 49, 157-286.
- MUŠIČ, B. in J. HORVAT 2007, Nauportus – zgodnje-rimska trgovska postojanka na Dolgih njivah na Vrhniki. Rezultati geofizikalne raziskave z več neodvisnimi metodami. - *Arheološki vestnik* 58, 219-283.
- NEUBAUER, W., EDER-HINTERLEITNER, A., SEREN, S. in P. MELICHAR 2002, Georadar in the Roman civil town Carnuntum, Austria: An approach for archaeological interpretation of GPR data. - *Archaeological Prospection* 9, 135-156.
- PIRO, S., MAURELLO, P. in M. F. CAMMARANO 2000, Quantitative integration of geophysical methods for archaeological prospection. - *Archaeological Prospection* 7 (4), 203-213.
- POBLOME, J. 2006, Mixed feelings on Greece and Asia Minor on the third century AD, in: D. MALFITANA, J., POBLOME and J. LUND (ur.): Old pottery in a new century. Innovating perspectives on Roman pottery studies (Monografie dell'Istituto per i Beni Archeologici Monumentali-CNR 1) Catania, 189-212.

SNEIDER, R. in J. TRAMPERT 1999, Wave field Inversion (A. WIRGIN, ur). - Springer Verlag, 119-190, New York.

TABBAGH, J. 2003, Total field magnetic prospection: are vertical gradiometer meaasurements preferable to single sensor survey. - *Archaeological Prospection* 10 (2), 75-81.

TELFORD, W.M., GELDART, L.P. in R.E.SHERIFF 1990. *Applied geophysics* (second edition). Cambridge University Press, 770 pp., New York.

TSOKAS, G. N. in R. O. HANSEN 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

ZDANOVICH, G., KOCHNEV, V. in B. PUNEGOV 2003. The experience in applying 3D technologies of magnet fields interpretation got at the archaeological site "Arkaim". - *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology* (Enter the Past, Vienna conference 2003).
