

Momir Vukadinović  
PRIMENA GEOFIZIKE U ARHEOLOGIJI

Kraljevo  
2011

---

ZAVOD ZA ZAŠTITU  
SPOMENIKA KULTURE  
KRALJEVO

\*

NARODNI MUZEJ  
KRALJEVO

Biblioteka  
POSEBNA IZDANJA

Urednici  
GORDANA GAVRIĆ  
DRAGAN DRAŠKOVIĆ

# Primena

MOMIR VUKADINOVIĆ

---

# geofizike u arheologiji



ЗАВОД ЗА ЗАШТИТУ  
СПОМЕНИКА КУЛТУРЕ  
КРАЉЕВО



НАРОДНИ МУЗЕЈ  
КРАЉЕВО





- 88 Korelacija rezultata merenja po parametrima izazvane polarizacije i električne otpornosti na primerima iz Švedske
- 97 **PRIMENA GEOFIZIČKIH METODA U ARHEOMETALURGIJI  
METODE TOMOGRAFIJE U ARHEOLOGIJI**
- 98 **SEIZMIČKA TOMOGRAFIJA**
- 98 PRIMER IZ PRAKSE BR. 11:
- 100 Primena seizmičke tomografije na kuli tvrđave u Budimu – Mađarska
- 100 PRIMER IZ PRAKSE BR. 12:  
Primena seizmičke tomografije na zidu katedrale Lucca – Italija
- 103 **ELEKTRIČNA TOMOGRAFIJA**
- 104 PRIMER IZ PRAKSE BR. 13:
- 104 Primena tomografije po parametru električne otpornosti na građevini u Vikopizanu – Italija
- 107 **ELEKTROMAGNETSKE METODE**
- 112 PRIMER IZ PRAKSE BR. 14:
- 112 Dipolno elektromagnetsko kartiranje na lokalitetu Gamzigrad
- 113 PRIMER IZ PRAKSE BR. 15:
- 113 Korelacija rezultata merenja dipolnog elektromagnetskog kartiranja i električnog skeniranja na lokalitetu Gamzigrad
- 115 **METODA GEORADARA**
- 120 PRIMER IZ PRAKSE BR. 16:
- 120 Istraživanje podzemnih – plitko ukopanih instalacija metodom GEORADARA
- 123 **METODE GEOFIZIČKOG KAROTAŽA U ARHEOLOGIJI**
- 126 PRIMER IZ PRAKSE BR. 17:
- 126 Bušenje ručnom burgijom na lokalitetu Kale – Krševica
- 127 **PROSTORNA ORIJENTACIJA NA TERENU**
- 128 KOMPAS
- 132 ODREĐIVANJE VISINSKIH RAZLIKA IMPROVIZOVANIM NIVELIROM
- 134 ODREĐIVANJE NAGIBA ILI PADNOG UGLA KOMPASOM
- 135 PRAVLJENJE SKICE ILI KROKIJA TERENA POMOĆU KOMPASA  
I GEODETSKE PANTLJIKE
- 136 GPS – ODREĐIVANJE PROSTORNE POZICIJE POMOĆU SATELITA
- 139 **METAL DETEKTOR**
- 143 **NEKI POJMOVI O SEIZMOLOGIJI**
- 149 **LITERATURA**

# SADRŽAJ

## 7 UVOD

## 9 ŠTA JE TO GEOFIZIKA?

## 10 GEOFIZIČKE METODE

## 12 GEOFIZIČKA ISTRAŽIVANJA U ARHEOLOGIJI

## 15 METODE MERENJA GRAVITACIJE PLANETE ZEMLJE

### 20 PRIMER IZ PRAKSE BR. 1:

20 Mikrogravimetrijsko merenje iznad rudarske šahte

## 25 METODE MERENJA MAGNETSKOG POLJA PLANETE ZEMLJE

### 41 PRIMER IZ PRAKSE BR. 2:

41 Rezultati merenja magnetskog polja na arheološkom lokalitetu Gamzigrad

## 43 SEIZMIČKE METODE

## 55 METODA ELEKTRIČNE OTPORNOSTI – SEO

### 64 PRIMER IZ PRAKSE BR. 3:

64 2D električno skeniranje na lokalitetu Manastir Drenča

### 65 PRIMER IZ PRAKSE BR. 4:

65 2D električno skeniranje na lokalitetu Kale – Krševica

### 66 PRIMER IZ PRAKSE BR. 5:

66 3D električno skeniranje na lokalitetu Belo brdo u Vinči

### 69 PRIMER IZ PRAKSE BR. 6:

69 Korelacija električnih i seizmičkih rezultata merenja na terenu Donjeg grada beogradske tvrđave

## 75 METODA KARTIRANJA PO PARAMETRU ELEKTRIČNE OTPORNOSTI SA DVE ELEKTRODE – „TWIN” METODA

### 76 PRIMER IZ PRAKSE BR. 7:

76 Kartiranje po parametru električne otpornosti sa „TWIN” metodom na lokalitetu Svinjište

### 78 PRIMER IZ PRAKSE BR. 8:

78 Kombinacija električnih i seizmičkih metoda u cilju izbegavanja višeznačnosti rezultata merenja

## 79 METODA SOPSTVENOG POTENCIJALA

### 82 PRIMER IZ PRAKSE BR. 9:

82 Merenje sopstvenog potencijala – SP u zoni praistorijskih rudarskih okana Prljuša – Mali šturac – planina Rudnik

## 85 METODA IZAZVANE POLARIZACIJE

### 88 PRIMER IZ PRAKSE BR. 10:

## UVOD

Ova knjiga namenjena je arheolozima u cilju sagledavanja mogućnosti i primene geofizičkih metoda kod arheoloških terenskih istraživanja. Namera autora je bila da se na vrlo česta pitanja o mogućnostima i primeni pojedinih geofizičkih metoda u arheologiji daju neke od osnovnih i bitnijih informacija. To je učinjeno na osnovu dostupnih informacija iz literature, ličnog iskustva i rezultata iz sopstvene prakse. U ovoj knjizi arheolozi će upoznati osnovne principe geofizičkih metoda i njihove specifičnosti, tako da ih adekvatno mogu planirati, koristiti i doprineti uspešnom rešavanju određenih arheoloških zadataka.

Kako je svako arheološko nalazište po pitanju svoje problematike jedinstveno, tako i izbor geofizičke metode za pojedine zadatke mora biti adekvatan kako bi dobili potrebne i korisne rezultate. Pri tome se parametri i način izvođenja geofizičkih metoda moraju prilagođavati i modifikovati shodno arheološkoj problematici. Takođe je izvesno da univerzalne metode nema i ne mogu se jednom metodom različiti problemi uvek uspešno rešavati.

Primena geofizičkih metoda zasniva se na terenskim merenjima koja se izvode isključivo elektronskim instrumentima. Terenska geofizička merenja su nedestruktivna. Savremeni elektronski merni instrumenti su portabilni i zasnovani na digitalnom principu akvizicije, što obezbeđuje mogućnost prikupljanja velikog broja podataka za relativno kratko vreme. To je uglavnom omogućio nagli rast kompjuterske tehnologije, a posebno razvoj programa za obradu podataka.

Kako arheološka nauka polako i sigurno postaje multidisciplinarna, sigurno je da će neke metode primenjene geofizike u budućnosti postati standardni činilac u planiranju arheoloških istraživačkih radova. Pri tome se nadamo da će ova knjiga doprineti da se sagledaju mogućnosti i ograničenja pojedinih geofizičkih metoda u odnosu na primenu i ciljeve istraživanja. Upotrebom geofizike arheolozima se nude i nova saznanja i informacije o fizičkim parametrima materijala koji čine i okružuju arheološka nalazišta.

Na kraju, posebno treba naglasiti da će uspješna primena geofizičkih istraživanja u arheologiji, i pored toga što raspolažemo sa savremenim instrumentima, programima i najnovijom kompjuterskom tehnologijom, što pravimo razne dvodimenzionalne i trodimenzionalne prikaze, digitalne arhive i baze podataka, bojimo sličice itd., uvek i isključivo zavisiti od stručnog znanja i saradnje arheologa i geofizičara u interpretaciji terenskih podataka.

*Momir Vukadinović*

## ŠTA JE TO GEOFIZIKA?

Geofizika je relativno mlada nauka koja se bavi proučavanjem građe planete Zemlje na osnovu zakona fizike. Tačnije rečeno, geofizika svojim metodama proučava fizička polja i fizičke karakteristike geoloških tvorevina planete. Prva geofizička istraživanja uvedena su u geološku praksu u cilju istraživanja ležišta mineralnih sirovina i nafte, kod istraživanja geoloških struktura i raznih osobina stena ispod površine terena koja su vrlo važna u rudarstvu.

Osnovne sile ili prirodna fizička polja su: gravitaciona sila teže Zemlje, magnetno polje Zemlje, temperaturne pojave i razna nuklearna zračenja. Gravitaciono, magnetsko polje, temperatura i nuklearna zračenja nastala su stvaranjem planete Zemlje i konstantno su prisutna. Fizička polja su dakle prirodna, a mogu biti i veštački izazvana i uvek su u neposrednoj vezi s geološkim i drugim materijalima koji se nalaze ispod površine terena.

Pošto su prirodna fizička polja slaba, da bi dobili potrebne i odgovarajuće rezultate, u prostoru koji je interesantan uspostavljamo veštački izazvana fizička polja, kao što su električna, elektromagnetska itd. Ta veštačka polja stvaraju se na mnogo manjim prostorima u odnosu na planetu i obično obuhvataju manji deo terena koji je predmet istraživanja. Za generisanje veštačkih polja obično je potrebno dosta energije koja terenske radove čini relativno skupim a koriste se i specijalni merni instrumenti. U tlo se uvode električne struje, izazivaju se elektromagnetski impulsi, stvaraju se elastični seizmički talasi itd.

Geofizičkim metodama merimo parametre fizičkih polja kao što su: gravitaciona sila, električna otpornost, dielektrična konstanta, intenzitet magnetnog polja, brzina elastičnih seizmičkih talasa, temperatura itd.

U suštini, primenom u arheologiji, geofizičkim merenjem pojedinih parametara utvrđujemo prisustvo anomalija fizičkih polja koja su prouzrokovana prisustvom ostataka materijalne kulture ispod površine terena. Analizom anomalijских polja dolazimo do saznanja o prostornom položaju ispitivanih materijala (o dubini, debljini, broju slojeva, prostiranju itd.) i o veličini fizičkih parametara pomoću kojih ispitivane materijale možemo međusobno razliko-

vati. Na taj način utvrđujemo prisustvo onih materijala koje su u davna vremena ljudi koristili u građevinske i druge svrhe a koji se nalaze pliće ili dublje sakriveni ispod površine terena, i tako ih razlikujemo od prirodnih (geoloških) neporemećenih materijala.

## GEOFIZIČKE METODE

Kako je već rečeno, fizička polja planete Zemlje mogu biti prirodna ili veštački izazvana – pa su prema toj podeli i metode istraživanja razvrstane. Glavne metode koje se zasnivaju na merenju prirodnih sila ili prirodnih fizičkih polja su:

1. Merenje sile gravitacije,
2. Merenje magnetskog polja,
3. Merenje radiotalasnog zračenja,
4. Seizmološka merenja.

Merenje sile gravitacije se vrši pomoću više metoda koje proučavaju silu Zemljine teže odnosno njeno gravitaciono polje. Na površini planete gravitaciono polje nije homogeno, u njemu postoje mesta koja se odlikuju manjim ili većim intenzitetom sile teže. Takva mesta nazivamo anomalijama. Gravitacione anomalije su uglavnom izazvane razlikama u gustini prisutnih geoloških materijala u odnosu na svoju okolinu.

Merenje magnetskog polja se obavlja pomoću više metoda koje proučavaju magnetsko polje planete Zemlje i bave se merenjem anomalija Zemljinog magnetskog polja prouzrokovanih prisustvom različitih geoloških i drugih materijala ispod površine terena. Magnetske anomalije se uglavnom definišu kao zone koji imaju različit stepen namagnetisanja od neposredne okoline.

Merenje radiotalasnog zračenja obavlja se pomoću više metoda koje proučavaju prirodna nuklearna zračenja koja su u manjoj ili većoj meri svojstvena svim geološkim odnosno prirodnim tvorevinama nastalim rođenjem planete Zemlje. Pri tome pojedine geološke tvorevine mogu imati vrlo visok stepen zračenja koji može biti opasan po ljudski organizam, a takođe ne treba zaboraviti da postoje i nuklearna zračenja koja dolaze iz kosmosa.

Seizmološka merenja služe proučavanju uzroka nastanka i efekata zemljotresa koji nastaju unutar planete Zemlje.

Takođe se, u sklopu prirodnih fizičkih polja, proučava i raspodela temperature po površini i ispod površine planete. Raspodela temperature u funkciji dubine ispod površine izražava se geotermičkim stepenom i vezuje se za geološke i druge strukture. Proučavaju se i pojave prirodnih elektrohemijskih procesa koji nastaju ispod površine terena. Takođe se proučavaju i elektromagnetske poja-

ve koje nastaju usled kretanja prirodnih električnih struja kroz atmosferu i kroz planetu, kao i niz pojava u jonosferi odnosno u magnetosferi planete Zemlje.

Formirana je i grupa metoda koje se zasnivaju na merenjima efekata i parametara veštački izazvanih fizičkih polja. Veštačka fizička polja se uglavnom stvaraju na mnogo manjem prostoru u odnosu na prirodna. Metode koje koristimo kod proučavanja veštački izazvanih fizičkih polja su:

*Električne metode* – predstavljaju vrlo brojnu grupu u primenjenoj geofizici. Električne metode se bave proučavanjem električne otpornosti ili elektroprovodnosti raznih prirodnih tvorevina. Električnim metodama se mere i razni efekti koji nastaju prolaskom jednosmernih ili naizmeničnih električnih struja kroz materijale ispod površine terena.

*Elektromagnetske metode* – grupa metoda koja se zasniva na merenjima indukovanih elektromagnetskih polja u materijalima ispod površine terena. Kod elektromagnetskih metoda mere se parametri električnih ili magnetskih polja, njihova atenuacija ili slabljenje, fazni ugao između primarnih i sekundarnih niskofrekventnih polja itd.

*Seizmičke metode* – grupa metoda koje se zasnivaju na proučavanjima kretanja ili brzine veštački izazvanih seizmičkih (elastičnih) talasa. Seizmički talasi su nazvani po analogiji sa talasima koje stvaraju zemljotresi jer imaju iste karakteristike. Dva glavna zakona po kojima se seizmički talasi prostiru su princip prelamanja (refrakcija) i odbijanja talasa (refleksija). Na osnovu dva pomenuta fizička zakona primenjuju se dve metode: refrakciona i reflektivna seizmika. Takođe se pored ove dve koristi i metoda seizmičkog prozračivanja ili tomografije.

*Karotažne metode* – metode koje se izvode u bušotinama. Takva istraživanja su vrlo specifična zbog načina izvođenja, a metodologija se naziva geofizičkim karotažem. Primenom savremene tehnologije i instrumenata, u bušotinama je moguće primeniti merenja po skoro svim parametrima saglasno metodologijama koje se inače izvode po površini terena.

Takođe, treba napomenuti da se geofizička istraživanja osim po površini terena i u bušotinama, mogu izvoditi i sa morske i jezerske površine, iz vazduha, a naročito i iz kosmosa, što je najčešći i osnovni zadatak svake vasijske letilice.

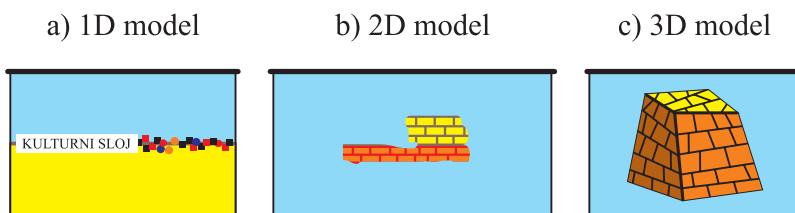
## GEOFIZIČKA ISTRAŽIVANJA U ARHEOLOGIJI

Primena i uspeh geofizičkih istraživanja u arheologiji zavisi od nekoliko faktora. Kao prvo, mora da postoji jasno definisan cilj istraživanja odnosno definisana arheološka problematika koju je potrebno rešiti nekom geofizičkom metodom. Drugo, geofizičari bi trebalo da za dati arheološki problem pronađu najoptimalnije rešenje koristeći odgovarajuće metode u prihvatljivom vremenskom i finansijskom okviru.

Pri tome se mora omogućiti uvid u sve vrste informacija koje mogu pomoći da se odabere najoptimalnija metodologija za istraživanje i da se obavezno sačini odgovarajući „plan ili program geofizičkih istraživanja” pre početka radova na terenu. Takav „program” bi trebalo da sadrži definisan cilj istraživanja, opis primenjene odnosno predložene metodologije i obrazloženje, način prikazivanja rezultata itd.

Pojednostavljeno, geofizičke metode mogu definisati prostorno prisustvo arheoloških ostataka ispod površine na jedan od tri načina (slika 1):

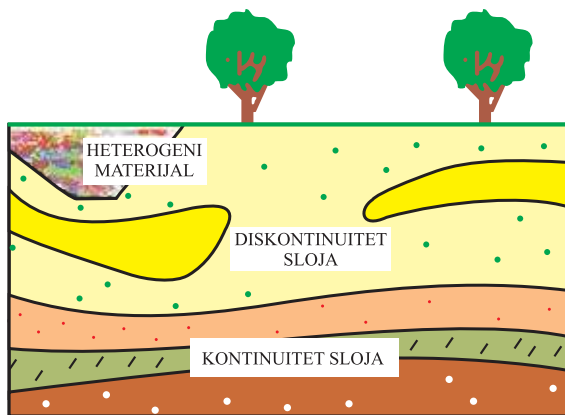
- 1 D – jednodimenzionalno, u vidu dobijanja dubine do kulturnog sloja koji je cilj detekcije,
- 2 D – dvodimenzionalno, u vidu zatvorenih kontura vertikalnih preseka arheoloških ostataka ispod površine terena i
- 3 D – trodimenzionalno, u vidu prostorno definisanih granica arheoloških ostataka ispod površine terena.



Slika 1. 1D, 2D i 3D definisanje prisustva arheoloških ostataka.

Primena geofizičkih metoda u arheologiji može, pored detekcije raznih objekata ispod površine terena, da pruži i osnovne informacije o građi i prisutnim geološkim tvorevinama u kojima su prisutni arheološki ostaci. Isto tako, geofizičkim metodama može da se utvrdi prisustvo ubačenih heterogenih materijala od strane čoveka u prirodnu, neporemećenu – homogenu sredinu, kao i postojanje kontinuiteta ili diskontinuiteta slojeva (slika 2).





Slika 2. Pružanje slojeva i prisustvo heterogenog materijala.



## METODE MERENJA GRAVITACIJE PLANETE ZEMLJE

Metode merenja gravitacije u geofizici obuhvataju merenja i izučavanja sile gravitacije, odnosno sile zemljine teže, kao jednog od prirodnih fizičkih polja. Gravitacija je pojam koji je opšte poznat i predstavlja silu privlačenja između materijalnih tela, od manjih predmeta do nebeskih tela (planeta, zvezda, galaksija). To je sila kojom planeta Zemlja privlači i drži sve materijalne stvari na svojoj površini.

Sva materijalna tela poseduju silu gravitacije, ali su sile koje poseduju manji predmeti daleko manje nego što je sila planete Zemlje, koja se oseća i na više miliona kilometara od nje. Gravitaciona sila Sunca je znatno veća, jer Sunce pomoću nje uspeva da drži na okupu sve planete sunčevog sistema.

Reč gravitacija potiče od latinske reči *gravis* koja znači težak. Zakon univerzalne gravitacije prvi je definisao Isak Njutn: „Sila privlačenja između dva tela proporcionalna je proizvodu njihovih masa i gravitacione konstante, a obrnuto proporcionalna kvadratu njihovog rastojanja”.

Po tom slavnom naučniku, jedinica sile gravitacije naziva se njutn i obeležava velikim slovom N. Gravitaciona sila Zemlje obeležava se slovom g, a iznosi 9,81 N/kg. Sila gravitacije, ili međusobnog privlačenja između dva tela, deluje duž linije koja spaja njihova težišta i ne zavisi od drugih faktora, npr. temperature tih materijala. Takođe, nije moguće poništiti silu privlačenja postavljanjem bilo kakve prepreke u međuprostor između tela koja se međusobno privlače, ili na bilo koji drugi način uticati na njene karakteristike i dejstvo. Savremena kosmička osmatranja ukazuju da gravitaciona sila dejstvuje i na rastojanjima koja sežu do ruba kosmosa (oko 14 milijardi svetlosnih godina).

Gravitaciona sila Zemlje svakom materijalnom telu određene mase na njenoj površini daje određenu težinu (koja na drugom nebeskom telu ima neku sasvim drugu veličinu), dok je masa tela konstantna veličina koja je ista u bilo kojim uslovima. Masa čoveka na Zemlji i na Mesecu je potpuno ista, međutim, usled različite jačine sile gravitacije na ovim nebeskim telima, njegova težina na Mesecu bi bila oko 6 puta manja.

Iako je međunarodna jedinica za ubrzanje metar po sekundi za sekundu ( $\text{m/s}^2$ ), i dalje se u gravimetrijskoj praksi najčešće koristi stara jedinica sile teže – miligal ( $1 \text{ mGal} = 10^{-3} \text{ Gal} = 10^{-3} \text{ cm/s}^2$ ). Inače, varijacije sile teže izazvane prisustvom različitih gustina podzemnih masa, obično su vrlo male – samo nekoliko miligala, pa i manje.

Anomalije sile gravitacije ili sile teže, koje se mogu ustanoviti po površini terena, obično su prouzrokovane prisustvom anomalne mase veće gustine od okolne sredine (pojava koja se naziva suficit mase), ili prisustvom šupljina u podzemlju (koje predstavljaju deficit mase, u odnosu na okolinu). Veća anomalijaska masa se često odlikuje i većom gustinom materije. Gustina materije je fizička veličina koja se izražava u  $\text{g/cm}^3$  ili  $\text{t/m}^3$  (gram po centimetru kubnom ili tona po metru kubnom).

Ako pretpostavimo da se ispod površine terena nalazi ruda olova čija gustina je višestruko veća od okolnih stena, tada će se iznad te mase, kao i na površini terena, formirati lokalna anomalija ili varijacija gravitacionog polja tog prostora. U slučaju prisustva olovne rude, očigledno će postojati suficit mase (zbog znatno veće gustine stene koja sadrži rudu u odnosu na okolne stene), što će usloviti pojavu pozitivne (povećane) anomalije ubrzanja sile teže u lokalnim razmerama. Ako je ispod površine terena prisutna šupljina u steni, formiraće se anomalija koja odgovara deficitu mase i rezultirati negativnom anomalijom.

Istraživanje gravitacije u primenjenoj geofizici podrazumeva izučavanje i merenje varijacija gravitacione sile, u lokalnim, regionalnim ili globalnim razmerama. Na globalnom nivou prisutne su varijacije gravitacione sile koje su nastale stvaranjem naše planete, usled nepotpune konsolidacije njene usijane unutrašnjosti, ali i usled nehomogenog rasporeda geoloških masa u Zemljinoj kori, koji su rezultat raznih geoloških aktivnosti. Metode merenja gravitacije najčešće se koriste pri istraživanju ležišta nafte, mineralnih sirovina itd.

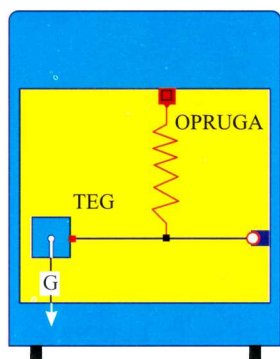
Metode merenja sile teže mogu biti dinamičke i statičke. Dinamičke metode koriste efekte kretanja mehaničkih delova u mernim uređajima koja se odvijaju pod dejstvom sile teže, kao što su oscilacije klatna ili slobodan pad tega. Statičke metode se zasnivaju na analizi ravnoteže između gravitacione sile i neke referentne veličine (lokalne sile), pri čemu se koriste instrumenti koji se zovu gravimetri.

Takođe, merenja gravitacione sile mogu da budu apsolutna i relativna. Apsolutnim merenjima se utvrđuju apsolutne vrednosti sile teže na jednoj tački, a pomoću relativnih merenja se dobija razlika između dve sukcesivne merne tačke. Gravitaciona sila se može meriti i na vodi i iz vazduha.

Za prva merenja sile teže korišćene su mehaničke aparature u vidu vrlo preciznih klatna ili tegova. Razvojem metodologije merenja sile teže ustano-

vljena su tri osnovna tipa instrumenata, a to su klatna, torzione vage i gravimetri. Najstariji instrumenti zasnovani na radu s klatnima služe za određivanje apsolutne vrednosti sile teže na mestu merenja. Klatno s tegom izvede se iz ravnotežnog položaja i pusti da se slobodno klati. Pri tome, za poznatu dužinu klatna, njegovu masu i izmerene periode oscilacija, sračunava se vrednost sile teže. Torzione vage su merile horizontalnu komponentu gravitacionog polja, a poslednja merenja s njima izvedena su negde oko II svetskog rata na istraživanjima ležišta nafte.

Gravimetri su savremeni instrumenti pomoću kojih se direktno mogu meriti relativne vrednosti sile teže, velikom brzinom i na velikom broju tačaka. Mehanizmi raznih tipova gravimetara su u suštini vrlo slični. Na jednom kraju minijature horizontalne poluge pričvršćen je teg poznate mase, a drugi kraj poluge je fiksiran za kućište instrumenta. Polugu s tegom u horizontalnom položaju održava vertikalna opruga (slika 3).

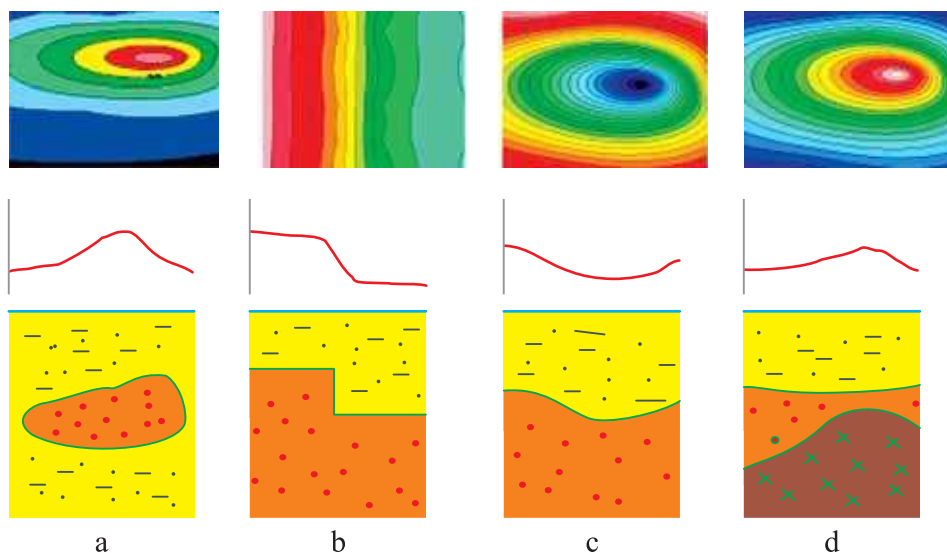


Slika 3. Gravimetar.

Princip rada je jednostavan, sila teže deluje na teg i meri se njegovo pomeranje po vertikalnoj osi. Zbog preciznosti merenja i potrebe za idealnom elastičnošću opruge, ceo mehanizam je napravljen od tankih kvarcnih niti koje nisu deblje od niti najfinije paukove mreže. Mehanizam gravimetra je smešten u termički izolovanom kućištu gde se održava konstantna temperatura. Očitavanje vertikalnih pomeranja tege vrši se preko složenih elektronsko-optičkih mehanizama. Direktno određivanje relativne vrednosti sile teže gravimetrom sastoji se praktično od merenja težine tege u instrumentu na potrebnom broju mernih tačaka razmeštenih po terenu.

Merenja pomoću osetljivih gravimetara mogu se izvoditi u cilju detekcije raznih geoloških struktura i ruda, prisustva šupljina, zakopanih rezervoara, zatrpanih i napuštenih rudarskih šahti itd. Za uspešnu detekciju potrebno je da gustina materijala od koga je sačinjen objekat istraživanja bude dosta različita od gustine materijala okolne sredine.

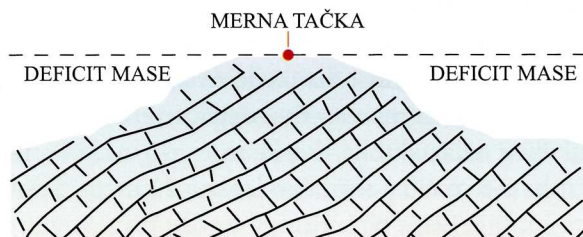
Interpretacija rezultata merenja gravitacionih anomalija omogućava dobijanje informacija o dubini i prostornom obliku uzročnika, kao što mogu biti geološka tela jednostavnijih oblika (slika 4). Na primerima su predstavljene geološke formacije, dijagrami intenziteta gravitacionog polja i anomalije na površini terena.



Slika 4. Intenzitet gravitacionog polja iznad različitih geoloških formacija:  
 a) telo jednostavnog oblika; b) razlom ili rased;  
 c) udubljenje ili sinklinalna forma druge sredine;  
 d) uzvišenje ili antiklinalna forma treće sredine.

Po okončanju terenskih merenja u dobijene rezultate uvode se korekcije u vidu takozvanih popravki. Najznačajnije su popravke za visinu, geografsku širinu, za topografiju itd. Popravka za geografsku širinu se uvodi zbog kompenzacije za promenu sile teže sa promenom geografske širine. Ta promena iznosi približno 1 miligal na 1,5 km dužine i raste od ekvatora ka polovima planete Zemlje. Ukoliko se gravimetrijska merenja ne izvode po ravnom terenu, već na brdovitom, potrebno je uvesti i topografsku popravku, jer je levo i desno prisutan deficit mase koji bi svojim uticajem zamaskirao prisustvo anomalije ukoliko ona postoji ispod merne tačke. Deficit ili suficit mase u fazi interpretacije računski se definiše do nadmorske visine merne tačke, kako bi ispod nje detektovali eventualno prisustvo anomalije zone (slika 5).

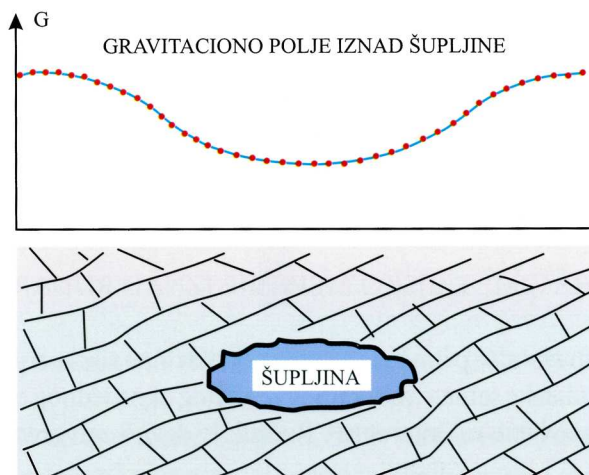
Metode merenja gravitacione sile ne koristi se baš često kod istraživanja u arheologiji. Međutim to ne sprečava entuzijaste da koriste mikrogravitaciona merenja tamo gde procene da bi to imalo smisla i da će dobiti korisne podatke.



Slika 5. Princip topografske popravke kod gravimetrijskih merenja.

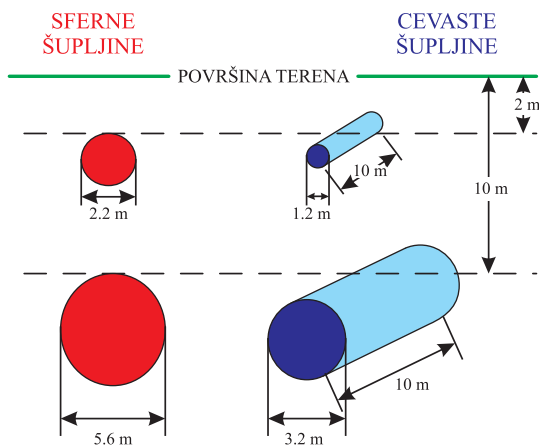
U slučaju korišćenja merenja gravitacije kod arheoloških istraživanja, cilj bi bio merenje lokalnih anomalija sile teže koje nastaju usled prisustva arheoloških ostataka ispod površine terena. Pri tome je neophodno da se ispune neophodni tehnički preduslovi kako bi arheološki ostaci mogli da se detektuju. Ti preduslovi su u osnovi jednostavni, poželjno bi bilo da se arheološki ostaci odlikuju većom ili manjom gustinom materije od gustine okolne sredine kako bi razlike u merenjima gravitacione sile bile merljive i indikativne na aparaturama sa kojima danas raspolažemo. Zbog toga je merenje gravitacione sile u arheologiji počelo da se koristi tek nakon što su konstruisani instrumenti – gravimetri visoke tačnosti. Takvi su gravimetri tipa La Costa – Romberg model D, čija je tačnost merenja reda veličine 0,001 mgal, i nešto stariji tip gravimetra tipa Worden–Master.

Kod arheoloških istraživanja, detekcija šupljina ispod površine terena može biti vrlo interesantna. Prisutna šupljina (slika 6) predstavlja deficit mase i gravitaciona sila je iznad nje smanjena, prisutna je negativna anomalija (dijagram ima minimum intenziteta gravitacionog polja iznad šupljine).



Slika 6. Gravitaciono polje iznad šupljine.

Prilikom planiranja arheoloških istraživanja, kada se očekuje detekcija podzemnih šupljina u obliku sfera ili u cilindričnom obliku, poželjno je prethodno razmotriti teoretsku mogućnost detekcije za takve slučajeve. Šupljinu u obliku sfere prečnika 2,2 m možemo uspešno detektovati do dubine od 2 m, a ako ima manji prečnik ili se nalazi dublje, detekcija je vrlo otežana. Takav princip važi i za sferu prečnika 5,6 m, čiji gornji deo leži na 10 metara dubine. Analogno tome, i za cevaste šupljine važe ograničenja u vidu njihovog prečnika i dubine njihovog položaja kako bi se mogli detektovati (slika 7). Primer mogućnosti detekcije je preuzet iz literature objavljene na Internetu, od kompanije Terradat<sup>1</sup>.



Slika 7. Slučajevi moguće detekcije šupljina, aplikacija kompanije Terradat.

U svakom slučaju, u arheologiji, u posebnim uslovima mogla bi da se primenjuju mikrogravitaciona merenja najosetljivijim instrumentima, i to na što većem broju tačaka ili profila, kako bi se anomaljske zone dobro uočile.

## PRIMER IZ PRAKSE BR. 1

### MIKROGRAVIMETRIJSKO MERENJE IZNAD RUDARSKE ŠAHTE

Interesantan slučaj je primena merenja gravitacione sile kod pronalaženja pozicije zatrpane rudarske šahte – vertikalnog izvoznog okna jednog od rudnika u Engleskoj, što je objavljeno na Internetu<sup>2</sup>. Rudnik je davno zatvoren (po okončanju

<sup>1</sup> <http://www.terradat.co.uk>.

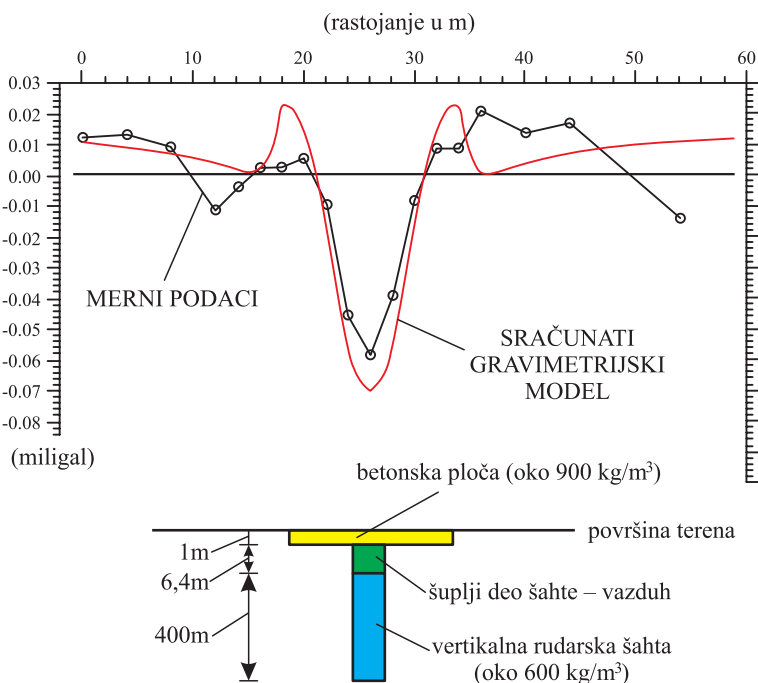
<sup>2</sup> Isto.



eksploatacije) a vertikalna šahta, kojom je eksploatisana mineralna sirovina izvožena, iz bezbednosnih razloga je pokrivena betonskom pločom. Betonska ploča je bila debljine 1 metar sa gustinom materijala oko  $900 \text{ kg/m}^3$ . Ispod betonske ploče nalazila se šuplja konstrukcija sa gustinom materijala od oko  $1400 \text{ kg/m}^3$ , dužine oko 6,4 m. Ispod te konstrukcije detektovana je rudarska šahta do 400 m dubine, kao delimično šupalj prostor, sa gustinom materijala oko  $600 \text{ kg/m}^3$ . Za merenja je korišćen gravimetar CG3-M proizvod firme SCINTREX iz Kanade.

U ovom slučaju detekcije, vertikalni šuplji prostor u vidu napuštene rudarske šahte dao je vrlo izraženu negativnu anomaliju kao deficit mase.

Poznavajući konstrukciju rudarske šahte, njene dimenzije i materijale od kojih je konstruisana, istraživači kompanije Terradat su, putem numeričkog modelovanja sa softverskim programom GM-3D (Gravity Modeling Software), dobili anomaliju u vidu modelske krive koja je skoro potpuno slična krivoj koja je dobijena merenjem gravimetrom na terenu (slika 8).



Slika 8. Detekcija zatrpane rudarske šahte, aplikacija kompanije Terradat.

Pri merenju se gravimetri postavljaju na stativ ili na specijalno podnožje, dovode se u vertikalni položaj pomoću libela i u toku merenja se ne pomeraju (slika 9 i slika 10).



Slika 9. Gravimetar La Coste – Romberg.<sup>3</sup>



Slika 10. Gravimetar Worden.

Kako je već rečeno, mogućnost primene metoda merenja sile gravitacije zavisi od postojanja merljivih razlika gustina između tela ispod površine terena i okolne sredine. Gustine materijala se izražavaju u  $\text{g/cm}^3$  (tabela 1).

Vrsta materijala	Normalni opseg u $\text{g/cm}^3$	Srednja vrednost u $\text{g/cm}^3$
<b>Dubinske stene</b>		
Gabro	2,85 – 3,12	2,95
Granit	2,52 – 2,81	2,66
<b>Izlivne stene</b>		
Bazalt	2,7 – 3,3	3,0
Lava	2,8 – 3,0	2,9
<b>Metamorfne stene</b>		
Gnajs	2,6 – 3,0	2,8
Mermer	2,6 – 2,9	2,75
<b>Sulfidni minerali</b>		
Galenit	7,4 – 7,6	7,5
Pirit	4,9 – 5,2	5,05
Sfalerit	3,5 – 4,0	3,75
<b>Samorodni elementi</b>		
Zlato	15,6 – 19,3	
Srebro	10,1 – 11,1	
Bakar	8,8 – 8,9	
Gvožđe	7,3 – 7,8	

<sup>3</sup> Isto.

<b>Razno</b>		
Ugalj	1,2 – 1,9	
Voda	1,0	
Led	0,88 – 0,92	
Nafta	0,65 – 0,9	
<b>Sedimentne stene</b>		
	U suvom stanju	U mokrom stanju
Dolomit	2,04 – 2,54	2,28 – 2,65
Peskovita glina	1,7 – 2,2	
Čvrsta glina	1,90 – 2,28	2,19 – 2,42
Krečnjaci	1,74 – 2,76	2,12 – 2,72
Peščari	1,60 – 2,68	1,99 – 2,77
Glinci	1,56 – 3,17	1,92 – 3,21
Aluvijum	1,5 – 1,6	2,0
Pesak	1,4 – 1,8	1,9 – 2,1
Šljunak	1,4 – 2,2	1,7 – 2,4
Glina	1,3 – 2,4	1,63 – 2,47
Obično tlo	1,0 – 2,0	1,5 – 2,4
Lapor	2,25 – 2,60	
Les	0,75 – 1,60	1,4 – 1,93

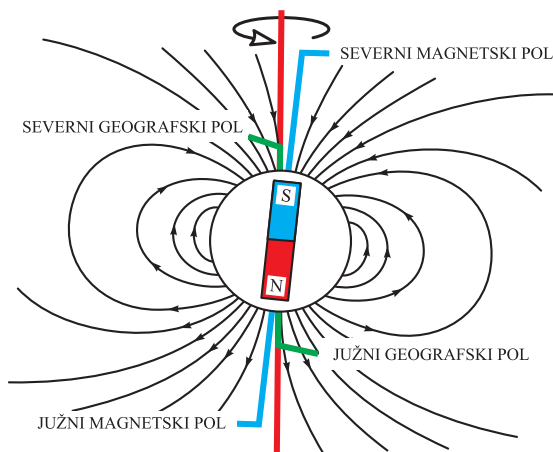
Tabela 1. Gustine nekih materijala koji se najčešće sreću.



ka Novom svetu znatno odstupala od pravca ka Severnjači (ili ka severu kako se u to vreme verovalo). Kada su moreplovci stigli u Novi svet, magnetska igla je ponovo pokazivala pravac „severa” (ka Severnjači). Na taj način postalo je jasno da zvezda Severnjača više nije merodavna za orijentaciju, jer je uzrok privlačenja očigledno bio na drugom mestu – na planeti Zemlji a ne u kosmosu. Tako je ustanovljeno da pravac pokazivanja magnetske igle kompasa može odstupati od pravca pružanja meridijana na dugim morskim putovanjima. To je prouzrokovalo veliko interesovanje u ondašnjoj stručnoj javnosti i dalo zamah intenzivnom merenju elemenata prirodnog magnetskog polja. Tako su nastali prvi začeci nauke o geomagnetizmu.

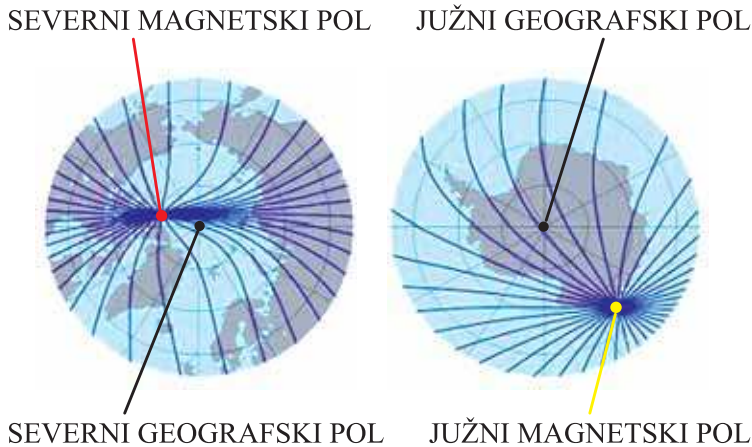
Magnetizam predstavlja nevidljivu silu koja deluje na metalne predmete i privlači ih. Za svako namagnetisano telo važi isti princip: bez obzira na oblik i veličinu, uvek ima dva različita pola od kojih svaki deluje silom istog intenziteta prema gvozdanim predmetima. Privlačna sila je najjača u polovima koji su nazvani severnim i južnim polom. Severni magnetski pol se obeležava sa N (engl. North) ili znakom + (plus), a južni magnetski pol se obeležava sa S (engl. South) ili znakom – (minus).

Planeta Zemlja ima svoju osu obrtanja i definisane položaje geografskih i magnetskih polova (slika 11). Geografski polovi, severni i južni, jesu tačke kroz koje prolazi osa oko koje se planeta Zemlja okreće, a magnetski severni i južni pol su različito udaljeni od njih. Položaji magnetskih polova kroz istoriju planete nisu bili strogo geografski fiksirani i stalno su se pomerali. Priroda i pozicija magnetskih polova inače zavise od mnogih faktora koji vladaju u unutrašnjosti planete. Pri tome, uzročnik magnetskog polja Zemlje možemo aproksimativno predstaviti kao šipkasti magnet.



Slika 11. Magnetski, geografski polovi i osa obrtanja planete Zemlje.

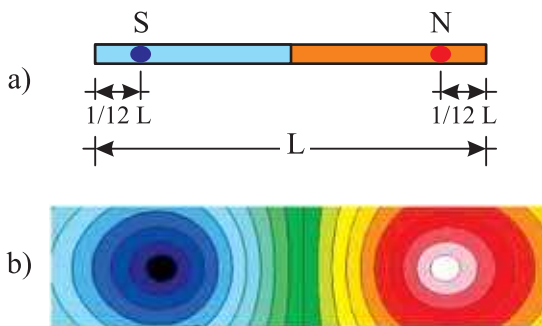
Preciznije gledano, položaji magnetskih i geografskih polova su dati na projekcijama severne i južne polulopte Zemlje (slika 12). Kako se vidi, položaji magnetskih polova su na znatnim udaljenostima od geografskih, a plave linije, koncentrisane ka magnetskim polovima, predstavljaju magnetske meridijane.



Slika 12. Pozicija magnetskih i geografskih polova na poluloptama planete.

Shodno definiciji da se raznoimeni magnetski polovi međusobno privlače, a da se istoimeni međusobno odbijaju, ka severnom magnetnom polu uvek se okreće južni pol namagnetisane igle kompasa, a ka južnom magnetnom polu okreće se njen severni deo.

Ako posmatramo najčešće prikazivani vid magneta u vidu šipke, magnetski polovi su uvek na dvanaestini ( $1/12$ ) dužine ( $L$ ) od njenih krajeva. Ako namagnetisanu šipku podelimo na dva dela, ili je izdelimo beskonačno na veći broj delova različitih dužina, svaki od njih će uvek imati po dva pola i to uvek na  $1/12$  od kraja svoje nove ukupne dužine (slika 13). Namagnetisana šipka (slika 13a) sa svojim polovima pravi dvostruko magnetsko polje (slika 13b).



Slika 13. Šipkasti magnet (a) i njegovo magnetsko polje (b).

## METODE MERENJA MAGNETSKOG POLJA PLANETE ZEMLJE

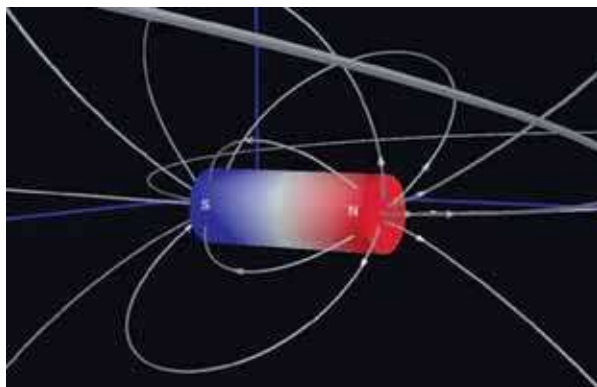
Prva saznanja o magnetizmu u Evropi javljaju se znatno pre nove ere u grčkim zapisima koji su opisivali neobična svojstva nekih „kamenčića” koji su se međusobno privlačili. Ti „kamenčići” su najverovatnije pronađeni u Maloj Aziji, blizu starog grčkog grada Magnezije, gde se nalaze rudne pojave – minerala oksida gvožđa, koji ima svojstvo privlačenja manjih gvozdениh predmeta. Smatra se da je tom mineralu – kamenčiću dato ime magnetit zbog mesta na kome je prvi put pronađen. Nije poznato koliko dugo se znalo za ovaj prirodni magnet, pre nego što ga je među prvima u istoriji, oko 600. god. p.n.e., pomenuo filozof Tales iz Mileta.

Prisustvo nevidljive sile privlačenja magnetna uvek je izazivalo strahopoštovanje ljudi, ali ih nije sprečavalo da kroz nastupajuće vekove sa magnetizmom eksperimentišu i stalno traže objašnjenje za tu neobičnu pojavu čija priroda ni dan-danas nije potpuno razjašnjena.

Takodje je rano primećeno da ako se prirodni magnet veže koncem da slobodno visi, on teži da se postavi u pravcu sever–jug. U ranom srednjem veku takav primitivni kompas su germanski ratnici nazivali „kamen-vodič”. Smatra se da upotreba ovog kamena kao prvog kompasa potiče od Kineza još pre 1 000. god. Tada počinje njegova opšta primena u pomorskoj navigaciji.

Pojam bipolarnosti magnetna postao je poznat tek u XIII veku, kada je ustanovljeno da magnet ima dva pola. Tada su i moreplovci počeli masovnije da se koriste primitivnim kompasom u vidu čelične namagnetisane igle koja se mogla slobodno okretati oko svoje vertikalne ose i pri tome je pokazivala sever. Ta prva igla – kompas, visila je o koncu prilikom određivanja severa i sigurno je bila najvrednija stvar na brodu u situaciji kada su putnici na moru bili u noći, okruženi maglom i nevremenom. Tada su verovatno prvi put upotrebljeni nazivi: severni i južni kraj magnetske igle. Takođe se verovalo da magnetsku iglu privlači zvezda Severnjača, što se održalo sve do Kolumbovog putovanja, kada je konstatovano da je magnetska igla na pojedinim mestima na trasi plovidbe

U prostoru, šipkasti magnet se predstavlja linijama sila koje deluju između polova, tj. između severnog i južnog pola. Pri tome linije polaze od severnog i ulivaju se u južni pol (slika 14).



Slika 14. Šipkasti magnet i linije sile između polova.

Dva osnovna fizička zakona kod magnetu su:

- svako namagnetisano telo uvek ima po dva pola i
- raznoimenni polovi međusobno se privlače, a istoimenni odbijaju.

U literaturi se često koristi izraz – magnetsko polje. Magnetsko polje predstavlja nevidljivu silu privlačenja i odbijanja koja deluje u prostoru – u tri dimenzije. Takođe se pod pojmom magnetnog polja (zbog činjenice da uvek sadrži dva pola) veoma često koristi uopšteni izraz – polje dipola.

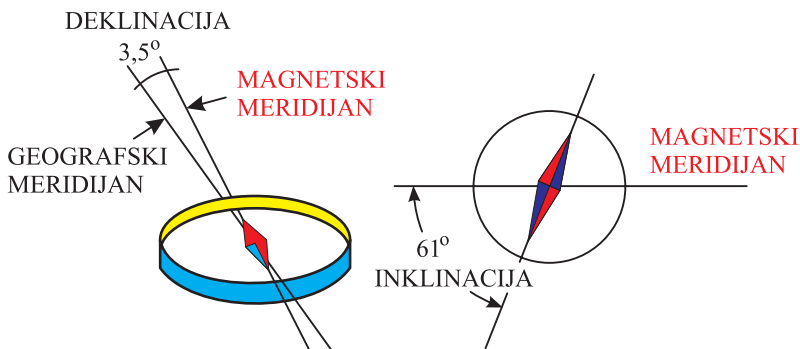
Kod merenja Zemljinog magnetizma važno je znati i šta su deklinacija i inklinacija magnetskog polja. Deklinacija i inklinacija su vrlo važni parametri Zemljinog magnetskog polja. Oba parametra mogu se jednostavno definisati pomoću namagnetisane magnetske igle – kompasu.

Na kompasu, ako ga držimo horizontalno u ruci (sa vertikalnom osom obrtanja igle), pravac koji magnetska igla pokazuje predstavlja magnetski meridijan planete (analogno geografskim meridijanima).

Magnetna deklinacija je ugao (u horizontalnoj ravni) između magnetskog meridijana i geografskog (astronomskog) meridijana u tački posmatranja na površini terena. Deklinacija na teritoriji Srbije se kreće oko  $3,5^\circ$  (slika 15) i naziva se istočnom (sa predznakom +).

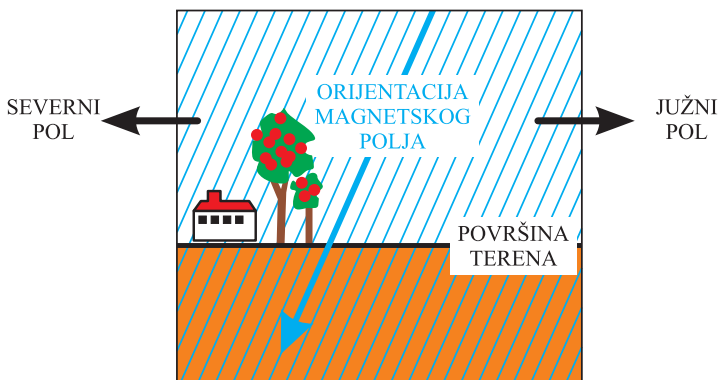
Ako kompas postavimo u vertikalni položaj (osa obrtanja magnetske igle je horizontalna), magnetna igla će moći da se obrće u vertikalnoj ravni i zauzeće određen ugao koga čine linije sile Zemljinog polja i horizonta. Taj ugao se naziva uglom inklinacije, i na teritoriji Srbije taj ugao iznosi  $61^\circ$  (slika 15). Inklinacija je pozitivna ako je ispod horizonta, a negativna ako je iznad njega.





Slika 15. Deklinacija i inklinacija magnetske igle.

Logično pitanje koje sledi jeste je kako se u kompasu magnetska igla slobodno okreće u horizontalnoj ravni i određuje pravac severa, a nema efekta inklinacije? Odgovor je u konstrukciji igle: na njoj je na suprotnoj strani (prema južnom polu) smešten mali protivteg, koji svojom težinom poništava uticaj magnetske sile i eliminiše uticaj inklinacije, tako da se magnetna igla kompasu slobodno obrće oko svoje vertikalne ose. Na osnovu izloženog, na teritoriji Srbije orijentacija magnetnog polja odnosno pravac ka magnetnom severu je pod uglom od  $61^\circ$  u odnosu na površinu terena (slika 16).



Slika 16. Orijehtacija magnetnog polja.

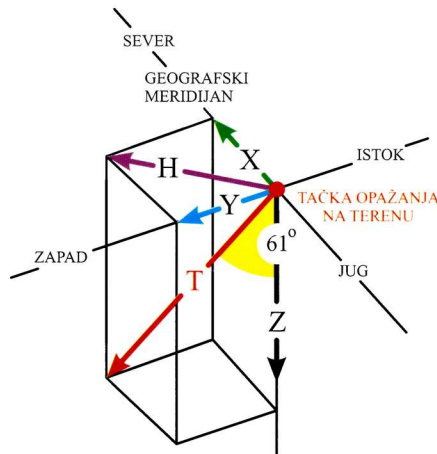
Orijentacija magnetnog polja planete na našem prostoru je jedan od bitnih faktora koje moramo poznavati da bi smo uspešno primenili magnetska merenja u arheologiji.

Magnetsko polje i anomalije zone u njemu mere se i detektuju pomoću specijalnih instrumenata – magnetometara. Najjednostavniji magnetome-

tar je magnetna igla – kompas, a drugi instrumenti su znatno složeniji i osetljiviji. Prve metode merenja bile su metoda klaćenja magneta u magnetskom polju, zatim se široko koristio indukcionni inklinator, pojavio se nakon toga i torzioni magnetometar, pa magnetska vaga, sa razvojem elektronike sledili su protonski, fluksni magnetometri i magnetometri zasnovani na principu optičkog pumpanja – cezijumski i rubidijumski, a u današnje vreme koriste se savremeni magnetometri zasnovani na Overhauserovom efektu itd.

Merna jedinica kojom se meri magnetsko polje je Gama, koja je jednaka  $10^{-5}$ Gausa. Jedinicom Gaus obeležava se intenzitet magnetskog polja. U praksi, magnetsko polje planete se meri mnogo manjom jedinicom koja se zove Tesla, koja je milijarditi deo Game,  $1\text{Gama} = 10^{-5}\text{Gausa} = 10^{-9}\text{Tesla}$ . Pri terenskim merenjima magnetsko polje i njegove varijacije se najčešće mere u delovima jedinice Tesla, u nano-Teslama – nT. Osetljivost savremenih magnetometara koji se koriste u arheologiji je visoka, reda veličine oko 0,02 nT, a često je i viša.

Magnetsko polje planete Zemlje meri se u prostoru po koordinatnom sistemu koji čine ose X, Y i Z (slika 17). Ako osu X postavimo u pravcu severa (po geografskom meridijanu), merićemo X komponentu magnetskog polja. Po pravcu istok–zapad, meriće se Y komponenta, a po vertikali, može se meriti Z komponenta magnetskog polja Zemlje.



Slika 17. Merenje magnetskog polja po koordinatnom sistemu X, Y i Z.

U praksi je teško naći i brzo odrediti prostorni položaj maksimalnog intenziteta – totalnog vektora T magnetskog polja u tački opažanja. Da bi merenja pojednostavili, pri terenskim merenjima najčešće merimo vertikalnu

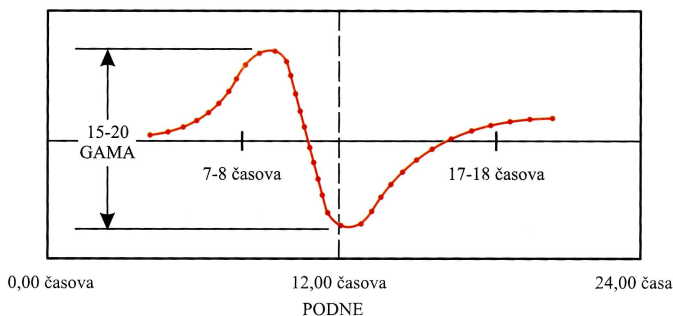
komponentu po Z osi, ponekad merimo i horizontalnu komponentu H (a istočnu Y ili severnu X prema potrebi). Na osnovu izloženog, magnetsko polje planete Zemlje ima sledeće elemente:

- deklinacija D,
- inklinacija I,
- horizontalna komponenta H,
- istočna komponenta Y,
- severna komponenta X,
- vertikalna komponenta Z,
- glavni pravac magnetizacije ili totalni vektor T.

Za dobijanje kvalitetnih podataka magnetskih merenja u arheologiji potrebno je naročito obratiti pažnju na štetne uticaje urbanih uslova, magnetskih varijacije planete Zemlje, a ponekad i na magnetske bure koje se dešavaju na Suncu.

Zemljino magnetsko polje ima tri vrste varijacija koje su poznate kao sekularne ili vekovne, godišnje ili dnevne. Sekularne varijacije važe za periode od skoro hiljadu godina, godišnje varijacije su приметne, a za terenska istraživanja su najvažnije dnevne varijacije.

Dnevne varijacije su česte i vrlo приметne, tako da je zbog njih u rezultate merenja potrebno unositi odgovarajuće korekcije. Dnevna varijacija vertikalne komponente magnetskog polja može se kretati i do 15–20 gama (slika 18).



Slika 18. Dijagram prosečne dnevne varijacije.<sup>4</sup>

Za terenska merenja potrebno je voditi računa o dnevnim varijacijama, znati u kom dobu dana bile najveće promene i preduzeti odgovarajuće korekcije jer u protivnom mogu se desiti ozbiljne greške prilikom interpretacije podataka. Može se desiti da se i manja dnevna varijacija predstavi kao anomalija i pogrešno zaključi da ispod površine terena postoje arheološki ostaci.

<sup>4</sup> J. J. Jakosky, Sc. D. Geofizička istraživanja, str. 95.

Iz pomenutih razloga, najbolje je terenska merenja tako organizovati da se koriste dva ista instrumenta. Jednim instrumentom treba meriti po terenu, a drugi instrument treba da bude nešto dalje od istraživane površine, fiksiran kao nepokretna – bazna stanica na kojoj će se uočiti, pri kraju svakog radnog dana, sve varijacije u toku neprekidne registracije magnetskog polja.

Prilikom primene magnetskih merenja u arheologiji, bitno je da se zna na koji način i kako arheološki objekti mogu prouzrokovati anomalije u magnetskom polju planete. Anomalija u magnetskom polju planete predstavlja manju zonu sa nepravilnim prostornim oblikom u kojoj je magnetsko polje drugačije po intenzitetu, a može biti i različito orijentisano (polarisano) u odnosu na okolinu.

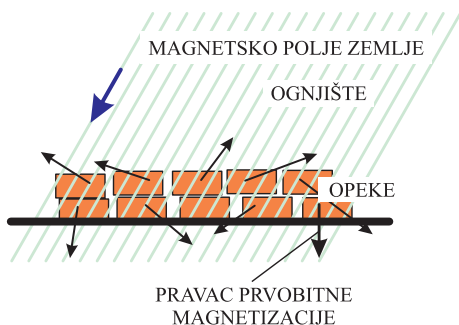
Magnetske anomalije kod arheoloških objekata su nastale na dva načina: ili potiču od indukovane magnetizacije ili od termoremanentne magnetizacije. Ove pojmove možemo objasniti na sledeći način.

Ako, na primer, uzorak stene, rude ili arheološki nalaz unesemo u magnetsko polje u laboratorijskim uslovima, uzorak stiće neku novu magnetizaciju sve dok se nalazi u magnetskom polju i tu vrstu magnetizacije nazivamo indukovanom magnetizacijom. Kada se uzorak iznese iz laboratorijskog magnetskog polja, indukovana magnetizacija će se ili smanjiti, prestati ili će se zadržati i dalje, pa tu magnetizaciju nazivamo remanentnom magnetizacijom. Ovakav princip važi i za uslove u prirodi gde vlada prirodno magnetsko polje planete Zemlje.

Termoremanentna magnetizacija je vezana za procese pečenja keramike ili za požare koji su se dešavali u naseljima minulih epoha. Ta magnetizacija je vezana za minerale magnetit i hematit, koji se nalaze u glini koja je korišćena za proizvodnju grnčarije i opeke. Reč je pojavi gubljenja magnetskog svojstva nekog materijala pri zagrevanju na visokim temperaturama i povratku magnetizacije prilikom njihovog hlađenja. Za svaki namagnetisani materijal postoji temperaturni stepen na kome se gubi magnetsko svojstvo i on se naziva Kirijevom tačkom. Za gvožđe, na primer, Kirijeva tačka je 750° C.

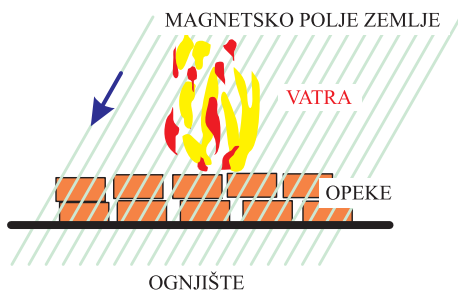
Indukovana magnetizacija je nastala u sadašnjem magnetskom polju Zemlje i predstavlja namagnetisanje materijala zahvaljujući magnetskom susceptibilitetu (susceptibilitet predstavlja sposobnost materijala da se namagnetise i zadrži to svojstvo). Indukovana magnetizacija je uglavnom vezana za materijale koji su se deponovali u jamama i jarkovima.

Na sledećim primerima prikazana je termoremanentna magnetizacija kod opeka od kojih je sagrađeno ognjište. U fazi gradnje, pre paljenja vatre, svaki komad koji je ugrađen u ognjište imao je sopstveni pravac prirodnog (prvobitnog) namagnetisanja odnosno remanentne magnetizacije (slika 19).



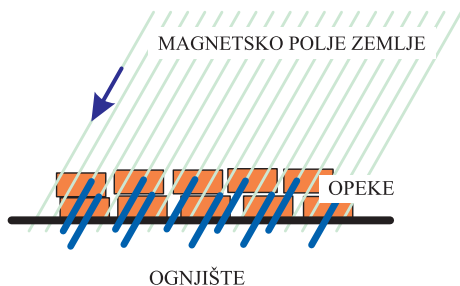
Slika 19. Ognjište pre paljenja vatre.

Nakon paljenja vatre, po porastu temperature, pojedinačni i različito orijentisani pravci magnetizacije u opekama nestaju i gube se zbog visoke temperature (slika 20), dok prirodno magnetsko polje deluje.



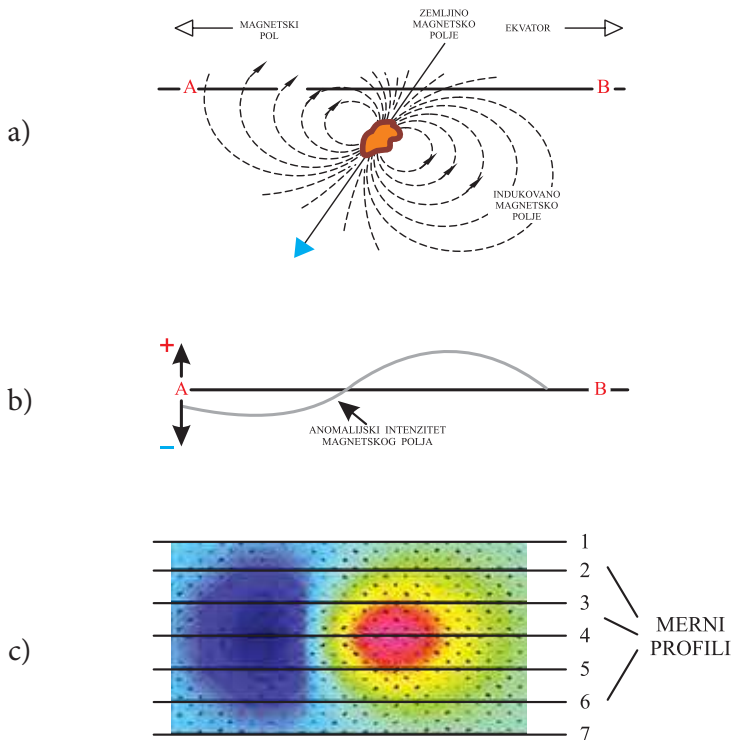
Slika 20. Ognjište sa vatrom.

Kada se vatra ugasi, u procesu hlađenja, sve opeke će ponovo primiti magnetizaciju. Pri tome nova magnetizacija će po pravcu biti ista za sve opeke, saglasno orijentaciji Zemljinog magnetskog polja na mestu ognjišta. Tako, kroz proces ponavljanja zagrevanja i hlađenja, opeka uvek gubi staru i dobija novu magnetizaciju, što čini osnovno objašnjenje pojma termoremanentne magnetizacije (slika 21).



Slika 21. Ognjište nakon gašenja vatre.

Na sledećem primeru predstavljen je model terena sa prisustvom namagnetisanog tela ispod površine terena koje je primilo magnetizaciju i koje je stvorilo svoje sopstveno magnetsko-indukovano polje. Pri tome ne treba zaboraviti da je Zemljino magnetsko polje stalno prisutno (slika 22).



Slika 22. a) namagnetisano telo kod indukovane magnetizacije, b) dijagram, c) karta anomalijskog magnetskog polja.

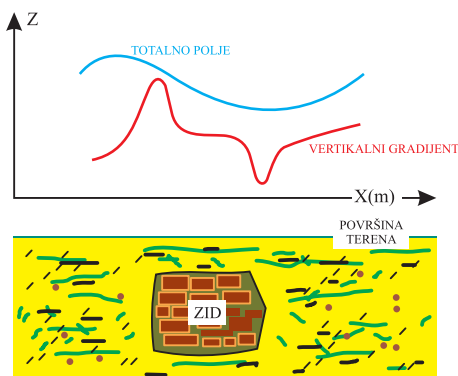
U suštini, namagnetisano telo je stvorilo svoje magnetsko polje, koje možemo nazvati sekundarnim (slika 22a). Pri tome, intenziteti prirodnog magnetskog polja Zemlje i sekundarnog magnetskog polja koje daje namagnetisano telo (ispod površine terena) sabiraju se dajući rezultujuće polje, odnosno anomalijsku vrednost. Ako iznad tog namagnetisanog tela postavimo merni profil ili niz tačaka po kojima ćemo izmeriti intenzitet (rezultujućeg) polja, i ako je merni profil orijentisan po pravcu sever–jug, dobićemo rezultat u vidu dijagrama koja ima negativne vrednosti u pravcu ka severu, a pozitivne ka jugu odnosno ka ekvatoru (slika 22b).

Ukoliko merenje izvedemo na više paralelnih profila, možemo dobiti kartu sa položajem anomalije magnetskog sekundarnog polja koje je stvorilo na-

magnetisano telo ispod Zemljine površine (slika 22c). Pri tome anomalijiska zona namagnetisanog tela ima negativne (od svetloplave do tamnoplave boje) i pozitivne vrednosti (od žute do crvene boje).

Metoda merenja magnetskog polja na arheološkim lokalitetima, po pravilu, izvodi se dosta brzo u odnosu na neke druge geofizičke metode. Magnetska merenja za potrebe lociranja lokalnih anomalija (kao posledica prisustva zidova, temelja, grobnica itd.), u principu se obavljaju u pokretu i tokom neprekidnog kretanja operatera koji nosi magnetometar a merenja se vrše npr. svake sekunde ili u izabranom intervalu. Na ovaj način se može ostvariti željena prostorna rezolucija – snimanje se može vršiti na tačkama na svakih 1 m duž mernog profila pri normalnom kretanju operatera koji nosi magnetometar. Pri tome merni profili mogu biti proizvoljne dužine.

Metodologija merenja se sastoji u merenju intenziteta magnetskog polja i njegovog gradijenta po profilima uz istovremeno merenje pozicije GPS prijemnikom. Za merenje intenziteta vertikalne komponente magnetskog polja primenjuje se jedan senzor koji se nosi na istoj visini iznad tla. Ako se pri merenjima totalnog intenziteta uočavaju relativno slabe anomalijiske zone, tada se koristi takozvano merenje gradijenta magnetskog polja, s dva senzora (slika 23)<sup>5</sup>.



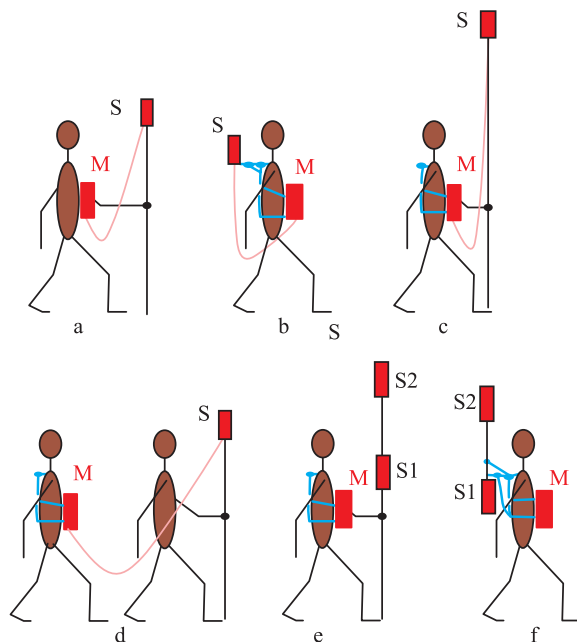
Slika 23. Merenje totalnog polja i gradijenta polja iznad ostataka zida.

Pozicije senzora koje koristimo kod terenskih merenja sa magnetometri- ma date su na slici 24, gde se magnetometar (M) obično nosi na grudima, a senzor ili senzori (S) na nemagnetičnom štapu, koji može biti različitih dužina ili na leđima operatera na specijalnoj konzoli.

Princip merenja gradijenta magnetskog polja sastoji se u korišćenju dva senzora koji su postavljeni jedan iznad drugog po vertikali (slika 24e i slika 24f).

<sup>5</sup> Breiner, S., Application manual for portable magnetometers, 18134–01 REV.A, Geometrics, 1973.

Pri tome se vrši merenje na dve visine, tako da se dobija razlika intenziteta vertikalne komponente magnetnog polja. Ovakav način merenja daje jasnije i kvalitetnije indikacije o prisustvu uzročnika od arheološkog značaja.



Slika 24. Pozicije senzora (S) pri radu sa magnetometrom (M).

U vertikalnoj osi jednog ili oba senzora smešten je i GPS prijemnik koji je sinhronizovan sa radom magnetometra i beleži njegovu poziciju na terenu u momentu merenja polja. Ovom metodologijom može se ostvariti od 100 do 120 merenja u pokretu na profilima dužine do 100 m, ako se izabere da se merenja obavljaju svake sekunde. Rezultati merenja se snimaju u obliku datoteka u sistemu za akviziciju magnetometra.

Analiza rezultata zabeleženih savremenim magnetometrima pokazuje da se može meriti totalni intenzitet magnetnog polja sa rezolucijom od 0,01 nT i sa tačnošću do 0,1 nT. Ova tačnost je dovoljna za lokalna merenja slabih anomalija, koje prouzrokuju arheološki ostaci.

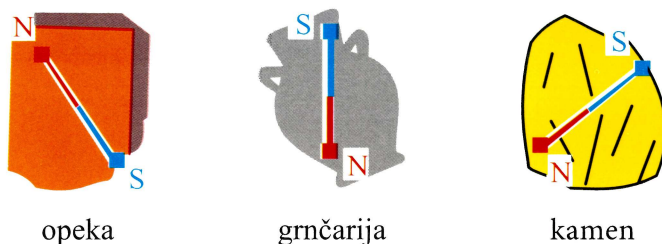
Rezultati merenja pozicije magnetometra sa GPS prijemnikom obično se transformišu iz koordinata sistema WGS-84 u lokalnu koordinatnu mrežu pomoću nekoliko poznatih geodetskih tačaka državne mreže, koje se dobijaju iz opštinskog geodetskog katastra koji pokriva istraživani teren.

Arheološki ostaci, po pravilu, prouzrokuju manje anomalijске vrednosti magnetnog polja a njihova veličina ne mora prelaziti nekoliko desetina nT. U



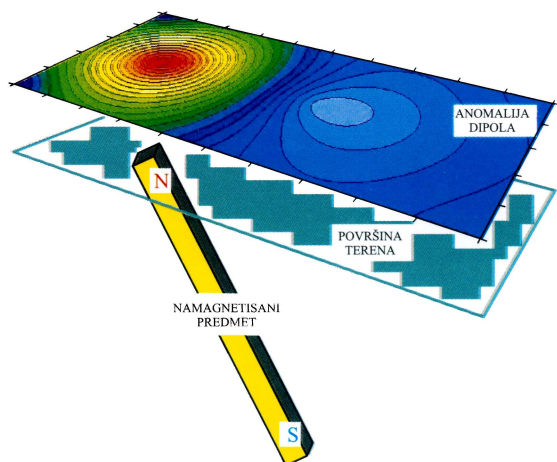
slučaju da su anomalije totalnog magnetskog polja i gradijenta sličnih vrednosti odnosno sličnog oblika, može se izvući zaključak da je prostorni položaj uzročnika anomalije vrlo blizu površine terena.

Kako je već rečeno, namagnetisani predmeti mogu imati svoje sopstvene ose magnetizacije odnosno dipole, koje detektujemo magnetometrima. Na sledećoj slici su predstavljeni komad opeke, sud od pečene gline i komad kamena (slika 25).



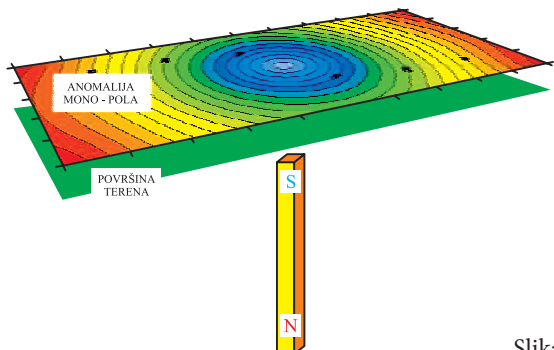
Slika 25. Namagnetisani predmeti sa dipolima.

Važno je reći da oblik magnetske anomalije zavisi uglavnom od prostorne pozicije namagnetisanog uzročnika ispod površine terena. Zbog jednostavnijeg objašnjenja, možemo svaki namagnetisani predmet (bez obzira na njegovu veličinu, dimenzije i oblik) zameniti dipolom. Pri tome, ako je osa dipola nagnuta, na površini terena ili na karti, različitim intenzitetom će se projektovati pozitivni i negativni deo anomalije magnetskog polja (slika 26). U ovom slučaju, jačina severnog magnetskog polja uzročnika biće veća od južnog, jer je severni pol bliži površini terena zbog prostornog položaja uzročnika.



Slika 26. Anomalija dobijena usled prisustva kosog dipola.

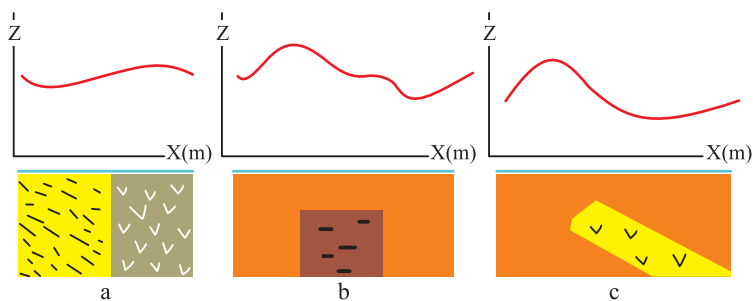
U slučaju kada je magnetska osa na kojoj se nalaze polovi u vertikalnom položaju, na karti će se uočiti prisustvo samo jednog pola. To je slučaj monopola, koji je dominantan, jer će drugi pol biti zamaskiran (slika 27).



Slika 27. Slučaj anomalije monopola.

U geofizičkoj praksi ipak nije baš jednostavno interpretirati dobijene terenske podatke magnetskih merenja. Anomalijske zone su u stvarnosti znatno komplikovanije, tako da se pored nekog od računarskih programa moramo koristiti i odgovarajućim matematičkim aparatom u cilju dobijanja prostorne pozicije (dubine) uzročnika magnetskih anomalija ispod površine terena.

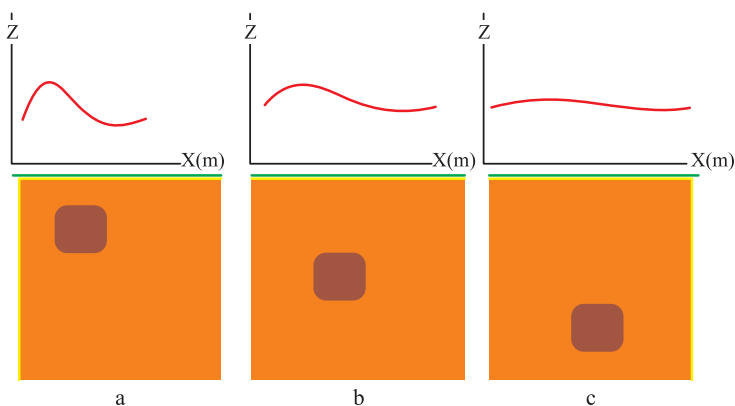
Pošto je već ranije objašnjeno da pojedinačni predmeti od arheološkog značaja mogu da se detektuju na osnovu indukovane ili termoremanentne magnetizacije, potrebno je navesti da se i prirodne geološke tvorevine na osnovu svoje magnetizacije takođe lako mogu detektovati, pogotovu jednostavniji geološki oblici (slika 28).



Slika 28. Anomalije magnetnog polja iznad jednostavnih geoloških formi: a) vertikalna geološka granica; b) vertikalno utisnuta formacija; c) kosi sloj.

Prvi slučaj (a) predstavlja vertikalnu geološku granicu između dve različite sredine. Drugi slučaj (b) predstavlja prisustvo vertikalne utisnute formacije, a treći slučaj (c) prisustvo kosog sloja.

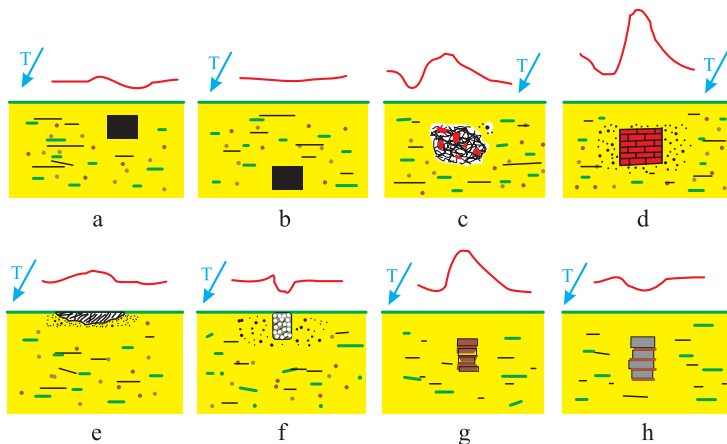
Takođe se kod magnetskih merenja primećuje i uticaj dubine uzročnika koji prouzrokuju pojavu anomalije magnetskog polja. Što je uzročnik na manjoj dubini, anomalija ima oštrij oblik i veći intenzitet, a ako se uzročnik nalazi na većoj dubini, anomalija je razvučena i šira, ili se ne može skoro ništa detektovati (slika 29).



Slika 29. Uticaj dubine na anomaliju magnetnog polja:

a) uzročnik na manjoj dubini; b) uzročnik na većoj dubini; c) uzročnik na velikoj dubini.

Na slici 30 predstavljene su neke od tipičnih magnetskih anomalija koje se mogu dobiti od raznih uzročnika na arheološkim lokalitetima, sa naznačenim pravcima maksimalnog intenziteta magnetnog polja planete Zemlje T.



Slika 30. Magnetske anomalije od uzročnika na arheološkim lokalitetima:

a) plitko zakopan grob; b) duboko zakopan grob; c) rasute opeke;  
d) ozidana jama gde je gorela vatra; e) humus sa otpacima oko kuća;  
f) plitak sloj ili staza od šljunka; g) zid od opeke; h) zid od komada pešcara.

Da bismo mogli planirati magnetska merenja u arheologiji, moramo obratiti naročitu pažnju na prirodnu namagnetisanost stena u okruženju. Kako se u tabeli 2 vidi, u nekim slučajevima mogu postojati velike razlike u vrednostima susceptibiliteta, tako da se paralelno merenjima na terenu prikupljaju i uzorci na terenu koji će se analizirati i imeriti u laboratoriji. Takva merenja bi bilo poželjno obaviti na što većem broju uzoraka kako bi se anomalije zone što preciznije definisale.

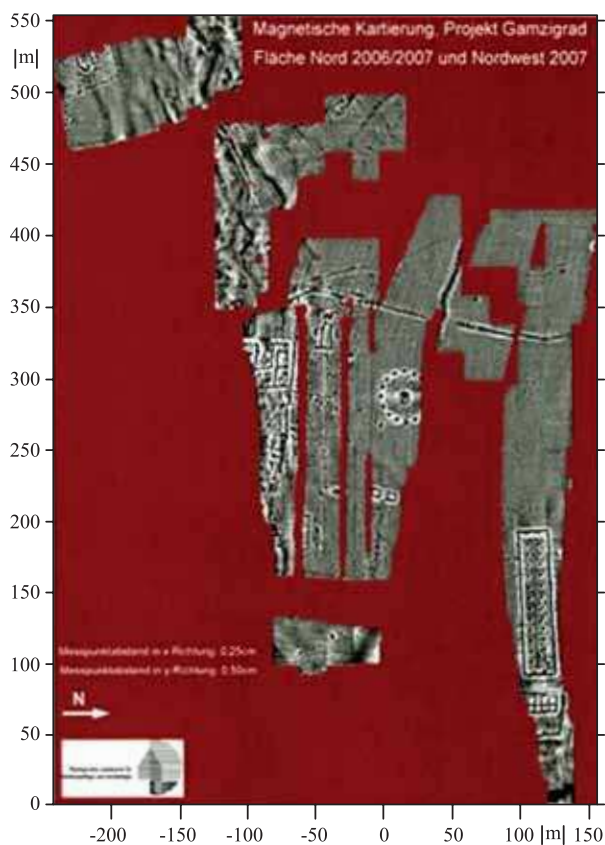
Vrsta stene	Susceptibilnost x 10 <sup>6</sup>
Magmatske stene	
Andezit	100 – 6 000
Bazalt	500 – 5 000
Dacit	500 – 2 000
Dijabaz	100 – 40 000
Diorit	50 – 5 000
Dioritporfirit	2 500 – 4 000
Gabro	1 000 – 5 000
Granit	100 – 500
Granodiorit	500 – 7 000
Kvarcdioritporfiriti	do 50
Latiti	1 500 – 4 000
Peridotiti	500 – 70 000
Pirokseniti	500 – 15 000
Porfiriti	100 – 25 000
Sijeniti	50 – 6 000
Trahiti	1 500 – 3 000
Sedimentne stene	
Gline	5 – 500
Krečnjaci	-1 – 20
Peščari	10 – 500
Peščari (Istočna Srbija)	1 000 – 5 000
Peliti (Istočna Srbija)	100 – 4 000
Tuf	500 – 5 000
Metamorfne stene	
Amfiboliti	50 – 35 000
Kvarciti – gvožđeviti	20 – 400 000
Gnajs	10 – 10 000
Serpentiniti	200 – 30 000
Škriljci	20 – 5 000
Škriljci – magnetični	100 – 200 000

Tabela 2. Magnetska susceptibilnost nekih stena.

## PRIMER IZ PRAKSE BR. 2

### REZULTATI MERENJA MAGNETSKOG POLJA NA ARHEOLOŠKOM LOKALITETU GAMZIGRAD

Tokom 2006. godine na arheološkom lokalitetu Gamzigrad, van bedema carske palate Felix Romuliana imperatora Galerija, izvršena su merenja magnetskog polja od strane Zavoda za geofiziku Lorenc iz Berlina (Büro für Geophysik Lorenz, Berlin), a radovima je rukovodio i rezultate interpretirao prof. dr Tim Schüler, sa univerziteta u Jeni. Merenja su obavljena fluksnim magnetometrom FM 36 po mreži tačaka 0,5 x 0,25 odnosno 0,25 x 0,25m. Na bazi rezultata merenja dobijena je karta sa anomalijama magnetskog polja koje indiciraju ostatke građevina (slika 31).<sup>6</sup>



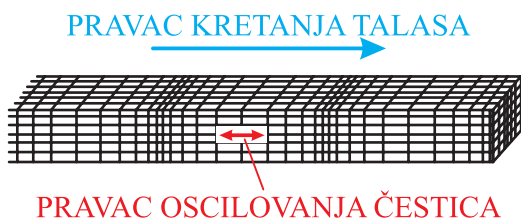
Slika 31. Magnetska karta sa anomalijama magnetskog polja na lokalitetu Felix Romuliana, Gamzigrad.<sup>6</sup>

<sup>6</sup> Bülow, G. v., Schüler, T., Geophysical and archaeological research at Gamzigrad – Report of the 2004–2007 campaigns, *Сйаринар* LVII (2007), Beograd 2009, 231–249.

U centralnom delu magnetske karte dobijena je pozicija 11 manjih anomalija poređanih u krug (prečnika oko 40 m) i centralna veća anomalija. Na bazi rezultata dobijenih sa iskopavanja konstatovano je da su manje anomalije prouzrokovane ostacima temelja stubova od kamena vezanog malterom, a centralna anomalija predstavlja ostatke temelja kružne građevine sa kriptom od istog materijala.

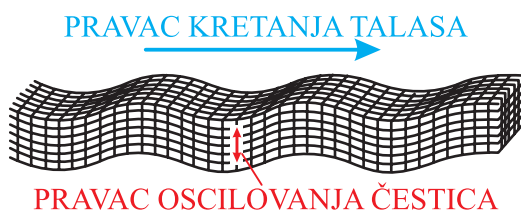
## SEIZMIČKE METODE

Seizmičke metode istraživanja razvijene su iz seizmologije – nauke koja proučava prostiranje i dejstvo seizmičkih talasa nastalih usled prirodnih uzroka – zemljotresa. Zemljotres predstavlja prirodnu pojavu na površini Zemlje, a posledica je geomehaničkih razaranja i sukobljavanja stenskih formacija koja se dešavaju duboko ispod površine. Prostorni talasi koji iz dubina nailaze na površinu terena nazivaju se seizmičkim i imaju male frekvencije oscilovanja i vrlo veliku energiju. Seizmički talasi imaju kompleksnu prirodu: sastoje se, po pravilu, od više vrsta talasa, od kojih su dve vrste najvažnije uzdužni i poprečni. Uzdužne često nazivaju longitudinalnim, a poprečne transversalnim. Uzdužni talas se pri svom prostiranju skuplja i rasteže duž pravca kretanja talasa. Za ove talase se, prema njihovoj fizičkoj prirodi, može reći da pripadaju akustičnim talasima (slika 32).



Slika 32. Uzdužni – longitudinalni talasi.

Poprečni talasi su karakteristični po oscilovanju čestica u pravcu upravnom na pravac kretanja talasa i imaju mnogostruko veću energiju od uzdužnih (slika 33).

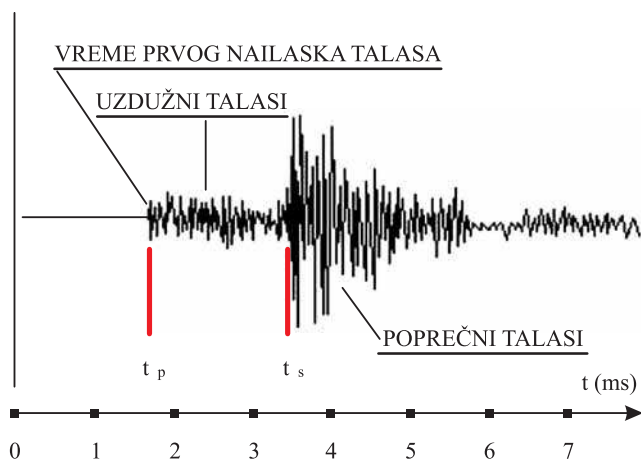


Slika 33. Poprečni – transversalni talasi.

Seizmičke metode vrlo često se koriste jer seizmički talasi imaju takve karakteristike da mogu prodirati duboko i daleko kroz geološke materijale. Prilikom seizmičkih metoda, pobuda ili stvaranje talasa vrši se na površini terena, i to pomoću raznih mehaničkih sprava ili upotrebom eksplozivnih sredstava. Za istraživanje na malim prostorima i kod manjih dubinskih zahvata, za pobudu talasa najčešće se koristi običan čekić mase do 10 kg.

U geofizičkoj praksi seizmička istraživanja nalazišta nafte i gasa izvode se na dubini od 1 do 5 km, kod mineralnih i vodenih resursa istraživanja se izvode i na dubini do 1,5 km, a kod arheoloških lokaliteta istraživane dubine ne prelaze 10–15 metara.

Prostiranje seizmičkih talasa opažamo i pratimo osetljivim sensorima koji se nazivaju geofonima. Geofon je vrlo sličan mikrofону, kojim se snima zvuk, prilagođen je registrovanju vrlo slabih mehaničkih oscilacija, ima robusno kućište i šiljak od metala koji se zabije u tlo. Geofon se priključuje na aparaturu – seizmograf, koja pojačava i snima oscilacije (slika 34). Oznake  $t_p$  i  $t_s$ , kod zapisa oscilacije, označavaju vremena nailazaka uzdužnih i poprečnih talasa u odnosu na početak merenja 0 (ms). Oznaka ms predstavlja hiljaditi deo sekunde – milisekundu.

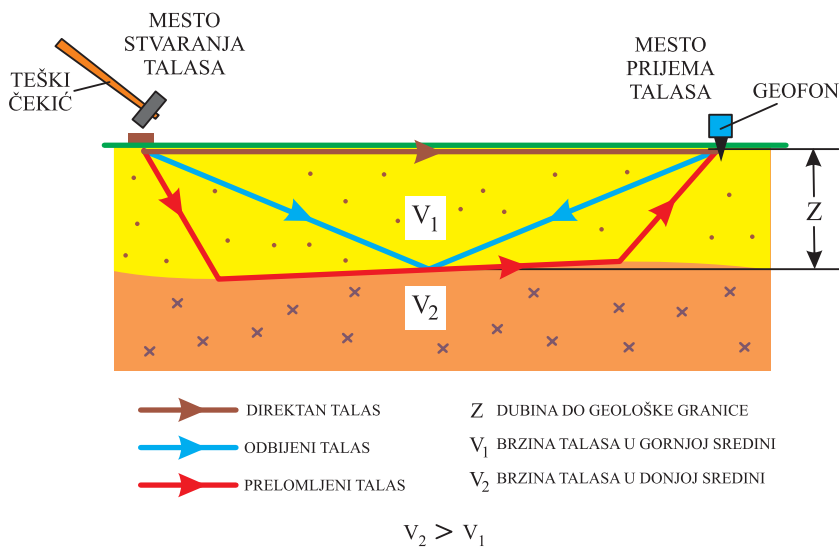


Slika 34. Izgled seizmičkog talasa sa uzdužnim i poprečnim oscilacija.

Pri seizmičkim metodama, prilikom udara čekića u tlo, stvaraju se seizmički talasi koji se šire na sve strane.

Po površini terena putuju direktni talasi, a u podzemlju se dešavaju dva talasna procesa: prelamanje (refrakcija) i odbijanje (refleksija). Prelamanje i odbijanje seizmičkih talasa nastaje na granici između različitih geoloških sredina kroz koje talasi putuju (slika 35).





Slika 35. Stvaranje seizmičkih talasa.

Prilikom korišćenja seizmičkih metoda, jedan od najvažnijih parametara je brzina prostiranja talasa koja zavisi najviše od fizičkih parametara: elastičnosti i gustine materijala. Što je geološka ili neka druga materijalna sredina čvršća, brzine talasa su veće i obrnuto.

Brzine seizmičkih talasa uzdužnog ili longitudinalnog tipa u km/s (kilometar u sekundi) date su u tabeli 3.

Geološka formacija – materijal	Brzina u km/s
Površinski rastresit materijal	0,2 – 0,6
Šljunak, drobina, suvi pesak	0,12 – 0,98
Vlažni šljunak i pesak	1,50 – 1,6
Les	0,38 – 0,4
Obična voda	1,43 – 1,68
Morska voda	1,43 – 1,53
Peščar	2,6 – 5,3
Laporac	2,0 – 3,5
Kompaktan krečnjak	5,2 – 7,0
Oštećen krečnjak	1,6 – 3,0
Dolomit	5,9 – 6,4
Škriljac	2,8 – 4,2

Tabela 3. Geološke formacije – materijali i brzine seizmičkih talasa.

Fizički osnov prelamanja i odbijanja talasa objašnjen je Snelijusovim zakonom, dobro poznatim iz optike. Kod refrakcije, talasi se prelamaju samo u slučaju prolaska kroz granicu između različitih elastičnih sredina ako je upadni ugao manji od  $90^\circ$ . Takođe, da bi se ostvarilo prelamanje, brzina talasa u donjoj sredini mora da bude veća nego u gornjoj ( $V_2 > V_1$ ).

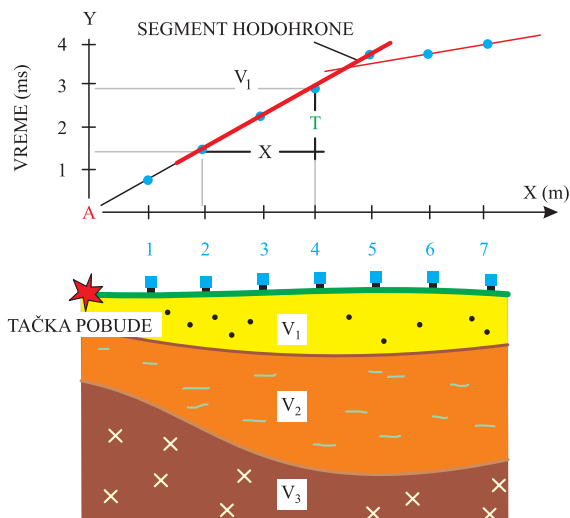
Na osnovu fizičkih zakonitosti, prelomljeni talas stigne pre do tačke prijema nego direktni, koji se prostire po samoj površini terena. Ukoliko se gornja sredina odlikuje većom brzinom od donje, proces prelamanja se ne može ostvariti.

I prilikom odbijanja ili refleksije talasa od geološke granice između dve sredine, neophodno je da postoje razlike u za gustini materijala i njegovim elastičnim osobinama. Reflektovani talas je onaj koji se praktično odbio od skupa materijalnih tačaka – granice između dve različite sredine.

U praksi se metoda prelamanja najčešće naziva refrakcionom, a metoda odbijanja reflektivnom seizmikom. Kod refrakcione metode služimo se uglavnom talasima uzdužnog tipa, a osnovni podaci koje prikupljamo su: vreme nailaska talasa od trenutka pobude do mesta prijema na geofonu i njegova brzina prostiranja.

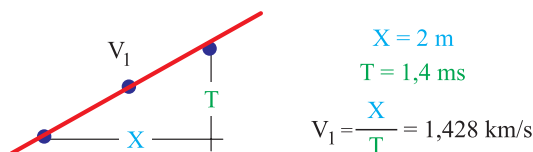
Vreme prvog nailaska seizmičkog talasa u suštini predstavlja vreme koje je potrebno da talasna oscilacija stigne od mesta pobude do mesta opažanja kroz razne materijale ispod površine terena. U suštini, prvi nailazak je početak oscilovanja na zapisu koji počinje da teče od trenutka pobude talasa a njegovo vreme kretanja se obično beleži u milisekundama.

Princip dobijanja brzina za svaku sredinu je jednostavan jer za poznato rastojanje i poznato vreme lako je sračunati brzinu. Za svaki geofon i njegovo rastojanje, na Y osu koordinatnog sistema nanose se vremena nailazaka talasa. Pri tome se dobija specifičan dijagram koji se sastoji od lučnog niza kraćih pravolinijskih segmenata. Ovako dobijeni dijagrami se nazivaju hodohronama. Svaki pravolinijski segment na hodohroni odgovara jednoj od prisutnih sredina i ima svoju brzinu. Na primer (slika 36), za rastojanje od drugog do četvrtog geofona koje iznosi 2 metra (jer je rastojanje između geofona 1 metar), vreme prolaska talasa iznosi 1,4 milisekunda. Vreme prolaska se dobija kada od vremena nailaska talasa na geofon 4, koje iznosi 2,8 m/s oduzmemo vreme nailaska na geofon 2, koje iznosi 1,4 m/s.



Slika 36. Hodohrona sa pravolinijskim segmentom.

Nakon dobijanja vremena prolaska talasa od geofona 2 do geofona 4, sračunava se brzina na jednostavni način. Rastojanje od 2 metra seizmički talas je prešao za 1,4 milisekunde. Koristeći formulu  $V = X / T$ , dobijamo brzinu od 1,428 km u sekundi, što realno odgovara površinskom sloju na terenu (slika 37).

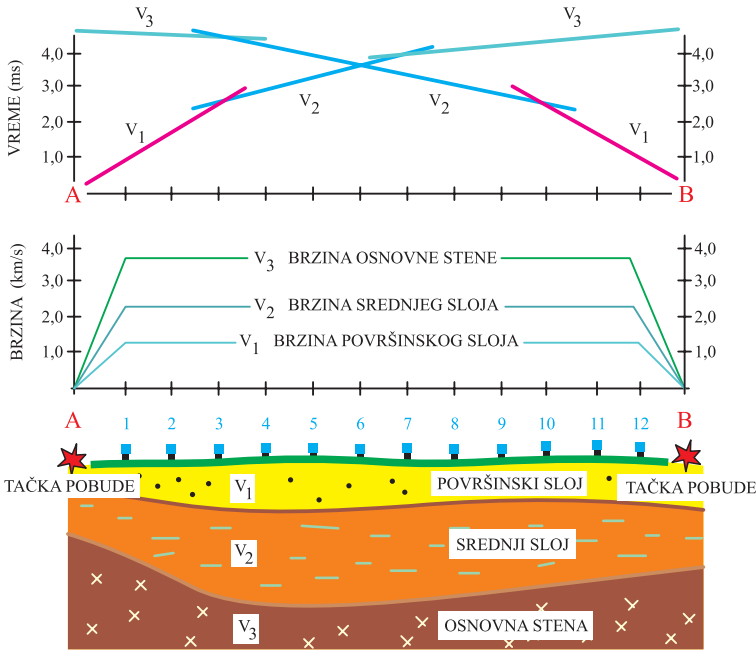


Slika 37. Računanje brzine na osnovu podataka sa hodohrone.

Na takav način mogu se sračunati brzine elastičnih talasa za svaki segment hodohrone, i praktično definisati broj slojeva ili sredina koje se nalaze ispod površine terena.

Refrakciona seizmika na terenu izvodi se šematski i jednostavno. Preko dela terena na kome se vrši istraživanje postavi se pravolinijski profil sa geofonima kojih ima 12, 24 ili po potrebi. Geofoni su na jednakim rastojanjima i povezani sa višekanalnim seizmografom. Na krajevima linijskog rasporeda geofona postavljaju se tačke na kojima će se vršiti pobuda A i B, kako bi se pro-

stor ispod površine maksimalno pokrio seizmičkim talasima. Merenjem vremena nailazaka na svakom geofonu dobijaju se hodohrone sa segmentima koji se označavaju sa  $V_1$ ,  $V_2$  i  $V_3$ , za teren sa tri sredine. Segment s brzinom  $V_1$  (ljubičasta boja) odgovara površinskom sloju, segment  $V_2$  (plava boja) odgovara srednjem sloju a osnovna stena je definisana brzinom trećeg segmenta  $V_3$  (tirkizna boja), što sve zajedno predstavlja seizmički model terena (slika 38).



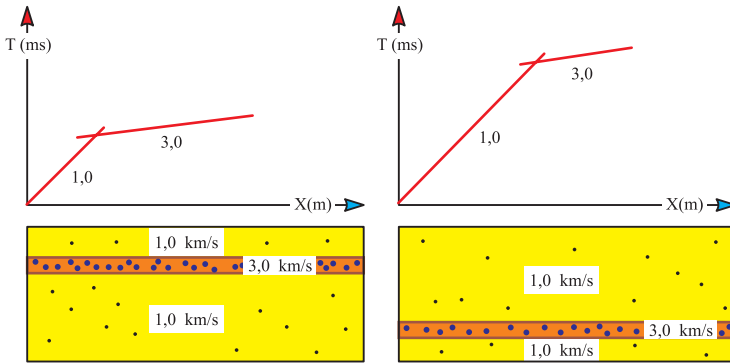
Slika 38. Seizmički model terena.

Nakon dobijanja brzina prostiranja seizmičkih talasa za sve tri sredine, može se sračunati i njihova dubina. Kako se radi o složenijim matematičkim operacijama, ovde neće biti prikazan način na koji se dobijaju dubine.

Za primenu refrakcione seizmike u arheologiji, važno je znati da se svaka geološka sredina, odnosno svaki prisutni materijal odlikuje svojom brzinom seizmičkih talasa. Konstruisanjem hodohrona dobijamo brzine i broj izdvojenih slojeva prirodnog ili veštačkog porekla. Ovo je naročito važno prilikom detekcije objekata od arheološkog značaja. U cilju planiranja korišćenja seizmičke metode i razumevanja dobijenih rezultata, predstavice nekoliko jednostavnih i idealizovanih slučajeva detekcije.

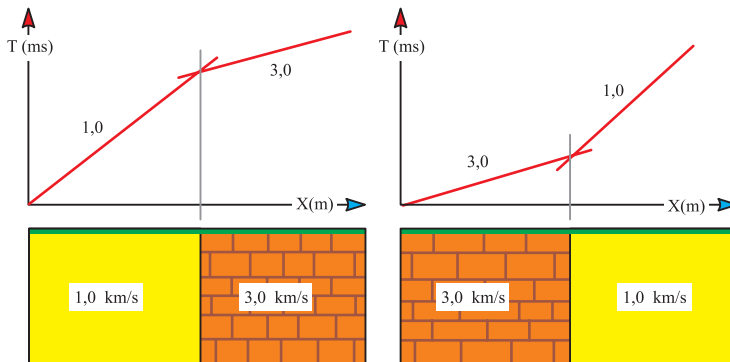
U slučaju prisustva ostataka zapečene zemlje, komada keramike i ostataka zidova (kao čvršćeg materijala) u vidu tanjeg sloja, brzina elastičnih talasa u njima može biti znatno veća (npr. 3,0 km/s) od brzina talasa u okolnim geološkim

formacijama (1,0 km/s). Na bazi pomenutih razlika u brzinama elastičnih talasa, može se obaviti detekcija položaja plićeg i dubljeg kulturnog sloja (slika 39).



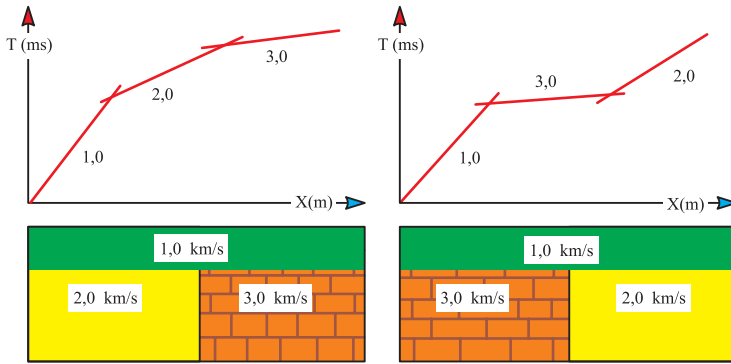
Slika 39. Detekcija slojeva sa većim brzinama na manjoj i većoj dubini.

Takođe, oblik i položaj hodohrona zavise od položaja istražnog seizmičkog profila u odnosu na ostatke građevinskog objekta – zida pri površini terena. U slučaju da prvo nailazimo na obično tlo pa onda na zid, dobićemo hodohrone sa dva segmenta. Prvi segment ima brzinu od 1,0 km/s, dok drugi ima 3,0 km/s. Drugi slučaj je za obrnutu situaciju, početak je na objektu a kraj profila van objekta, na običnom tlu (slika 40). Obično tlo, ili zemlja, može imati brzinu oko 1,0 km/s, dok materijali kao što su opeke sa malterom ili kamen mogu imati brzine i do 3,0 km/s.



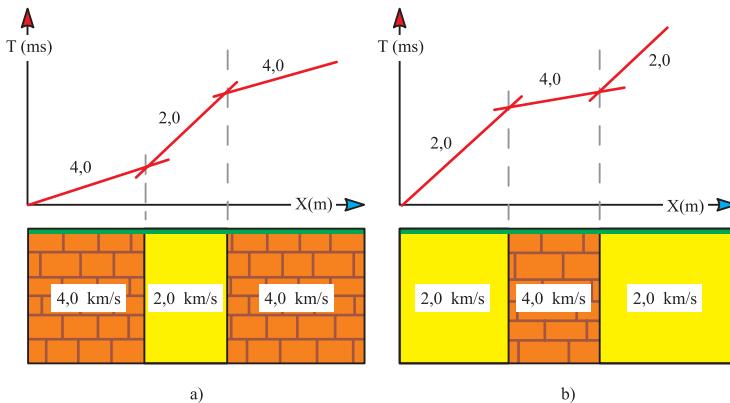
Slika 40. Detekcija zida pri površini terena.

Ukoliko je građevinski objekat (zid) pokriven debljim slojem površinskog i rastresitog materijala, dobićemo nešto složeniji položaj hodohrona (slika 41).



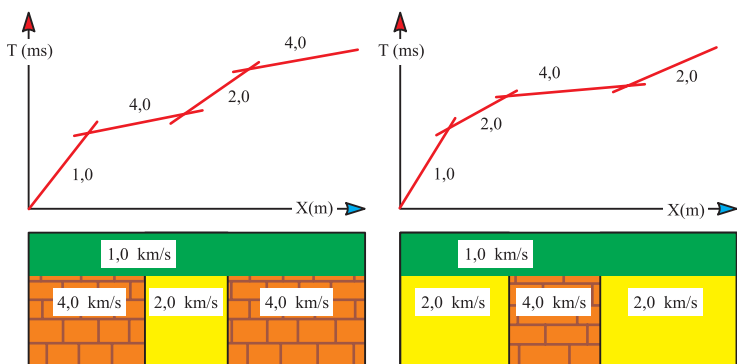
Slika 41. Detekcija pokrivenog zida.

Često je potrebno detektovati i vertikalne strukture kod ostataka građevina koji se nalaze neposredno ispod površine terena. Predstavljena su dva bliška zida (slika 42a) i jedan zid (slika 42b). Zidovi imaju brzine seizmičkih talasa do 4,0 km/s a između njih su materijali sa manjim brzinama, oko 2,0 km/s. Položaji hodohrona u oba slučaja ukazuju na jasnu detekciju građevine u odnosu na okolnu geološku sredinu.



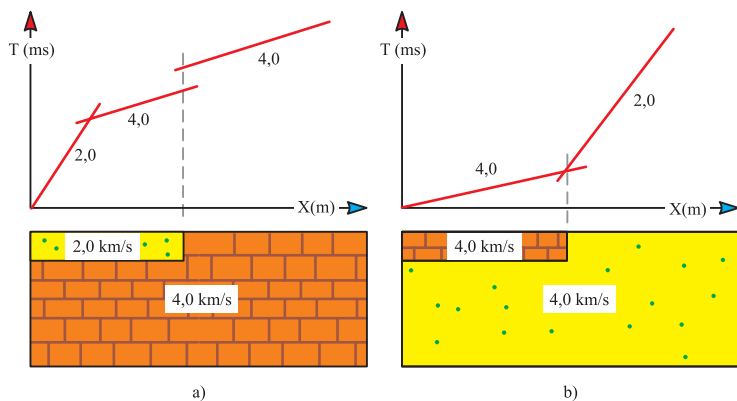
Slika 42. Detekcija ostataka građevina.

U praksi je često potrebno detektovati ostatke građevina kao u prethodnom slučaju ali koji se nalaze dublje ispod površine terena i koji su pokriveni površinskim materijalima sa manjim brzinama seizmičkih talasa (slika 43). Iako hodohrone imaju složeniji oblik, jasno je da prisustvo segmenata sa brzinama od 4,0 km/s ukazuje na postojanje ostataka građevina dublje ispod površine terena.



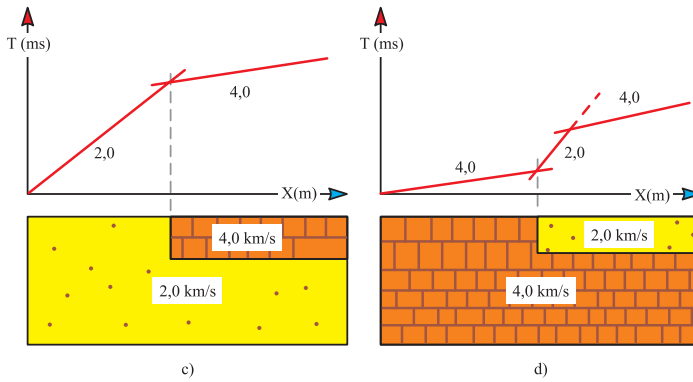
Slika 43. Detekcija pokrivenih ostataka građevina.

Često se prilikom terenskih istraživanja javlja potreba i za detekcijom slojeva neposredno pri površini terena koji mogu imati manje ili veće brzine seizmičkih talasa (slika 44). U slučaju da, po seizmičkom profilu, prvo nailazimo na sloj sa manjom ili većom brzinom, u odnosu na okolnu geološku sredinu, dobićemo hodohrone koje to jasno definišu (slika 44a i slika 44b).



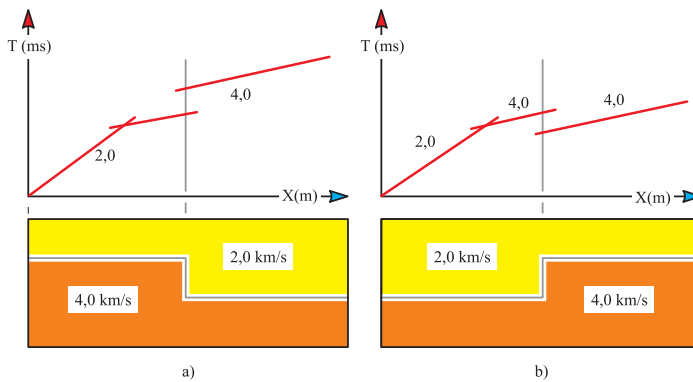
Slika 44. a) Detekcija plitkog sloja sa manjom brzinom;  
b) Detekcija plitkog sloja sa većom brzinom.

U slučaju da, po seizmičkom profilu, prvo nailazimo na slojeve sa većom ili manjom brzinom koji se nalaze odmah ispod površine terena, oblik hodohrona će u odnosu na prethodni slučaj biti dosta različit (slika 44c i slika 44d).



Slika 44. c) Detekcija okolne sredine i sloja sa većom brzinom;  
d) Detekcija okolne sredine i sloja sa manjom brzinom.

Sledeći primer predstavlja prisustvo takozvane pokrivenih stepenica (slika 45). Položaj hodohrona kod oba primera je vrlo sličan, razlika je samo kod segmenta koji ima veću brzinu seizmičkih talasa i čiji skok nagore ili nadole indicira vertikalni deo stepeničaste strukture (slika 45a i slika 45b). Inače su oba seizmička modela identična po parametru brzina seizmičkih talasa. Ovakvi seizmički modeli bi mogli da indiciraju prisustvo ukopa.

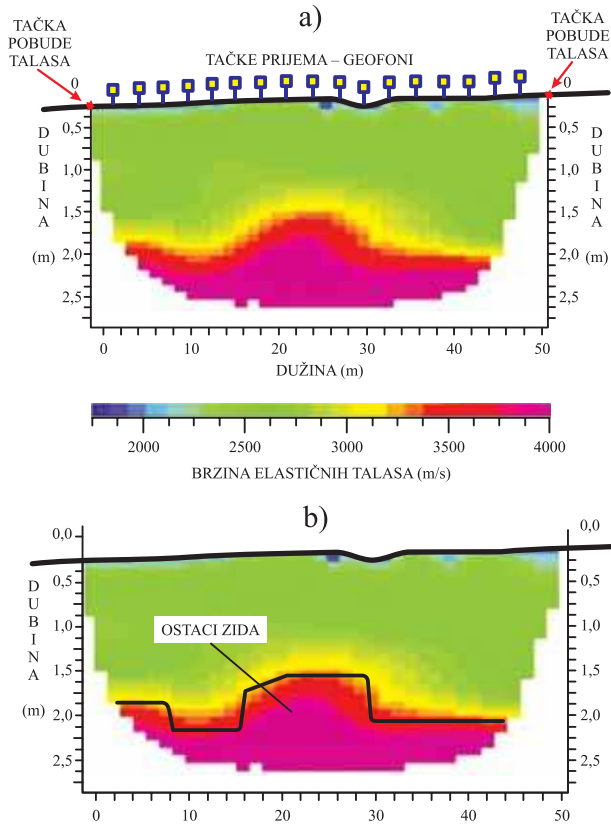


Slika 45. Detekcija pokrivenih stepenica – ukopa.

Takođe je važno napomenuti da se u praksi danas koriste savremeni računarski programi koji omogućavaju softversko dobijanje seizmičkih modela po parametru brzina elastičnih talasa. Koristeći takve programe možemo dobiti 2D ili 3D modele ispitivanog terena (slika 46)<sup>7</sup>.

<sup>7</sup> Eksperimentalni 2D model brzina, dokumentacija M. Vukadinovića.





Slika 46. a) 2D seizmički model terena; b) Položaj ostataka zida ispod površine terena, eksperimentalni 2D model brzina, dokumentacija M.Vukadinovića.

Na kraju poglavlja o primeni seizmičkih metoda u arheologiji, moglo bi se zaključiti da bi glavni zadatak bio određivanja dubine i prostornog položaja ostataka građevinskih objekata. Pri rešavanju arheološke problematike seizmičke metode se mogu izvoditi samostalno ali i paralelno sa drugim geofizičkim metodama.

Za izvođenje seizmičkih merenja metodom refrakcije potrebno je voditi računa i o ostvarivanju horizontalne i vertikalne rezolucije prilikom detekcije arheoloških ostataka. To praktično znači da rastojanje između tačaka po profilu gde postavljamo geofone mora da bude nekoliko puta kraće nego dužina arheološkog objekta koji je cilj detekcije. Takođe i merni profil mora da ima potrebnu dužinu kako bi se ostvario siguran i neophodan dubinski zahvat.

Seizmičke metode je inače dosta teško koristiti u urbanim uslovima zbog prisustva stalnih štetnih vibracija usled saobraćaja i drugih uzročnika.



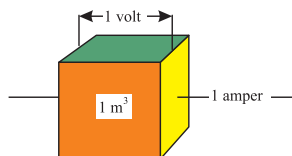
## METODA ELEKTRIČNE OTPORNOSTI – SEO

U primenjenoj geofizici električne metode su među najbrojnijim. Bave se proučavanjem fizičkih parametara geoloških i drugih materijala koji se nalaze ispod površine terena, kao što su električna otpornost ili električna provodnost, prirodni elektrohemijski potencijali itd. Električne metode se uglavnom zasnivaju na efektima prolaska prirodnih ili kontrolisanih električnih struja koje uvodimo u prostor ispod površine terena. Električne metode se u praksi najčešće nazivaju geoelektričnim.

Najpopularnije metode u ovoj oblasti su one koje se zasnivaju na parametru električne otpornosti. Električna otpornost u nekom materijalu predstavlja unutrašnji otpor koji se suprotstavlja proticanju električne struje. Fizički parametar koji određuje ovo svojstvo naziva se specifična električna otpornost – **SEO**.

Stene provode električnu struju uglavnom zahvaljujući vodi koja u različitoj meri ispunjava njihovu unutrašnjost – sitne šupljine (porni prostor). Voda u porama stena dobro provodi električnu struju zbog prisutnih rastvorenih minerala. Inače, konstitutivni minerali od kojih su stene sačinjene, po svojim fizičkim osobinama, jesu električni izolatori i ne provode električnu struju.

Električna otpornost se označava grčkim slovom  $\rho$  (ro) i ekvivalentna je električnom otporu koji daje  $1 \text{ m}^3$  (jedinični volumen) materijala pri potencijalnoj razlici od 1V (volt) pri proticanju struje od 1A (amper). Na osnovu izmerene struje, napona i površine kroz koju struja prolazi  $S$ , a to je  $1 \text{ m}^2$  kod jediničnog volumena, po Omovom zakonu poznatom iz fizike ( $R = V/I \times S$ ) sračunava se specifična električna otpornost (slika 47). Merna jedinica električne otpornosti se naziva Ohmm (om-metar) ili  $\Omega \text{m}$ .

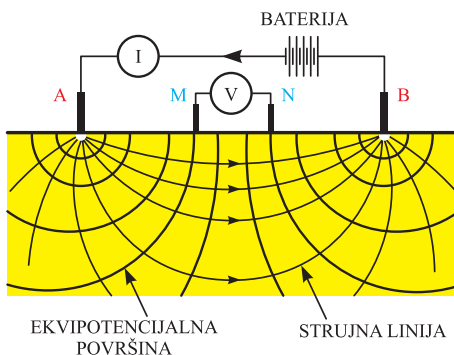


Slika 47. Jedinični volumen specifične električne otpornosti.

Recipročna vrednost električne otpornosti je električna provodnost  $\sigma = 1/\rho$  i označava se kao S/m (simens po metru).

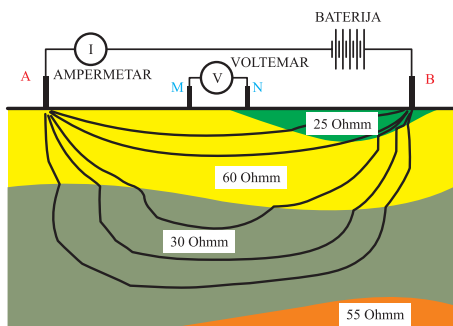
Osnovni princip terenskih merenja metodom električne otpornosti se zasniva na sledećem. Ako u tlo zakucamo četiri metalne elektrode u linijskom nizu (slika 48), pa spoljašnje A i B priključimo na izvor električne jednosmerne struje (baterija), između dve unutrašnje elektrode M i N pojavice se neki potencijal ili električni napon. Pri tome struju merimo ampermetrom (I), a električni napon merimo voltmetrom (V). Na taj način je kroz materijal ispod površine terena uspostavljen strujni tok koji se obično predstavlja strujnim linijama od A do B. Zbog uloge koju imaju, elektrode A i B se nazivaju strujnim, a elektrode M i N potencijalnim.

U slučaju prisustva idealno homogenog materijala ispod površine terena, uspostavljanjem strujnog toka, upravno na linije struje formiraće se i pravilne ekvipotencijalne površi – odnosno koncentrične polusfere sa centrom u strujnim elektrodama. Svaka polusfera ima isti potencijal na celoj svojoj površini.



Slika 48. Osnovni princip merenja električne otpornosti.

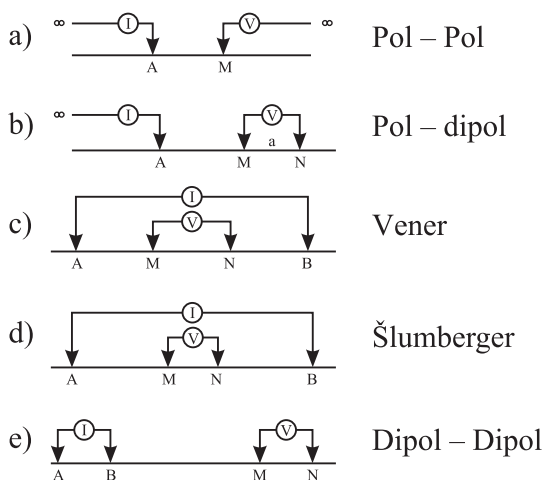
U slučaju prisustva više sredina sa različitim električnim otpornostima, struja će teći različitom gustinom, strujne linije će se koncentrisati u oblastima sa manjom otpornošću, a i prelamaće se pri prelasku iz jedne u drugu sredinu (slika 49).



Slika 49. Prolaz električne struje kroz prostor sa više sredina.

Prilikom merenja na terenu sprovodimo niz jednostavnih tehničkih postupaka. U tlo, prema definisanom elektrodnom rasporedu po mernom profilu, prvo ukucavamo strujne i potencijalne elektrode. Zatim se strujne elektrode A i B povežu sa mernom aparaturom, odnosno portabilnim izvorom električne struje preko izolovanih žica koje su namotane na kalemове. Sledi potom povezivanje prijemnih elektroda M i N takođe sa mernom aparaturom. U trenutku uključivanja strujnog toka, na mernim instrumentima se očitavaju vrednosti struje i potencijala i beleže se u zapisnik ili memorišu u digitalnom obliku.

Kako je već pomenuto, geometrijski određen elektrodni raspored u praksi se često naziva elektrodnom dispozitivom. Na osnovu povećanja rastojanja između strujnih elektroda A i B ostvaruje se i povećanje dubinskog zahvata. Postoji više vrsta elektrodnih dispozitiva koji se koriste po potrebi i shodno terenskoj problematici (slika 50).

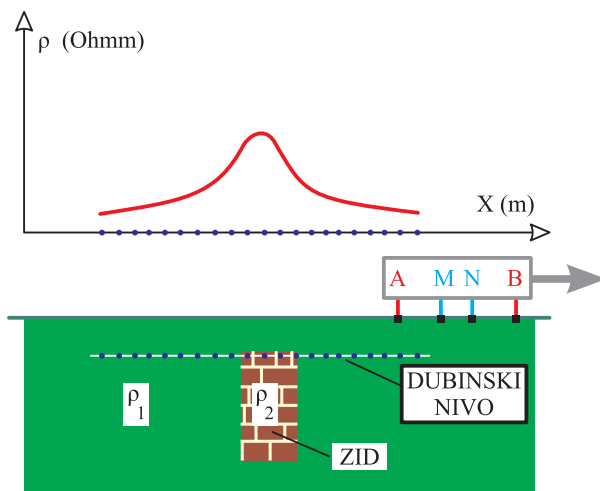


Slika 50. Vrste elektrodnih rasporeda – dispozitiva.

U praksi se koristi nekoliko načina merenja električne otpornosti. Najčešće se koriste metode električnog kartiranja, sondiranja i skeniranja.

Metoda električnog kartiranja se koristi u cilju dobijanja podataka o bočnim (lateralnim) promenama električne otpornosti geoloških sredina. Na terenu se izabrani merni dispozitiv kreće sa fiksiranim međuelektrodnim rastojanjem po unapred određenoj trasi ili profilu. Zbog toga se električno kartiranje obavlja na konstantnoj dubini shodno arheološkoj problematici. Dobijeni rezultati predstavljaju se kvalitativno u vidu dijagrama. Zapažaju se promene električne otpornosti ali bez preciznijeg tumačenja dubine i geometrije uzročnika. Metodom električnog kartiranja mogu se, na relativno manjim

dubinama, odrediti pozicije pokrivenih zidova, rovova, jaraka, grobnica, kanala itd. U slučaju prisustva arheoloških ostataka – zida ispod površine terena (slika 51), ako je njegova otpornost  $\rho_2$  znatno veća ( $\rho_2 \gg \rho_1$ ) od otpornosti okolne sredine  $\rho_1$ , na dijagramu iznad zida dobićemo indicaciju sa povećanom otpornošću.

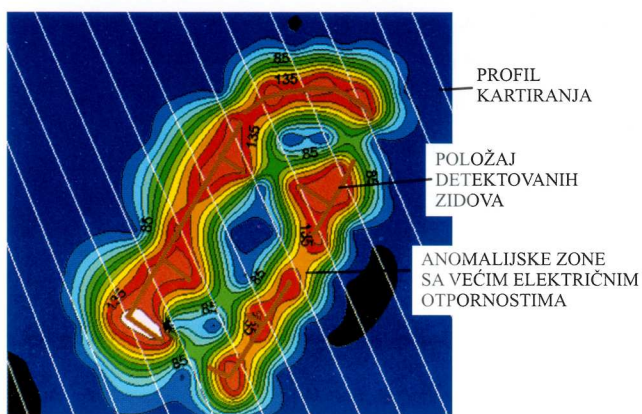


Slika 51. Princip električnog kartiranja iznad zida na jednom dubinskom nivou.

Električno kartiranje po parametru električne otpornosti se prema potrebi može izvoditi na jednom, dva, tri ili više dubinskih nivoa. A ako se primeni pogrešno izabran elektrodni dispozitiv, ili su rastojanja između strujnih i prijemnih elektroda neadekvatna, zid neće biti detektovan.

Ukoliko se izvrši merenje električnim kartiranjem na jednom ili više dubinskih nivoa po mreži profila koja pokriva istraživani teren, moguće je sačiniti kartu ili karte na kojima će se dobiti anomalije zone koje su nastale usled prisustva opeke i ostataka maltera, odnosno zidova građevinskog objekta. Na primeru iz prakse autora ove knjige (slika 52), na terenu gde je bila montažna građevina, u cilju pripreme za novu gradnju<sup>8</sup>, izvršeno je kartiranje na dubinskom nivou od 1 metra. Plava boja odgovara geološkim materijalima sa nižim električnim otpornostima a crvena boja odgovara prisustvu građevinskih materijala koji imaju veće otpornosti. Duž zona sa većim otpornostima moguće je pratiti koncentraciju izolinija (izo-oma) i ustanoviti položaj zidova ispod površine terena. Bele linije su profili duž kojih je vršeno merenje.

<sup>8</sup> Karta sa anomalijama-ostacima zidova, faza pripreme za novu gradnju, dokumentacija M. Vukadinovića.



Slika 52. Karta sa anomalijskim zonama usled prisustva ostataka zidova, faza pripreme terena za novu gradnju.

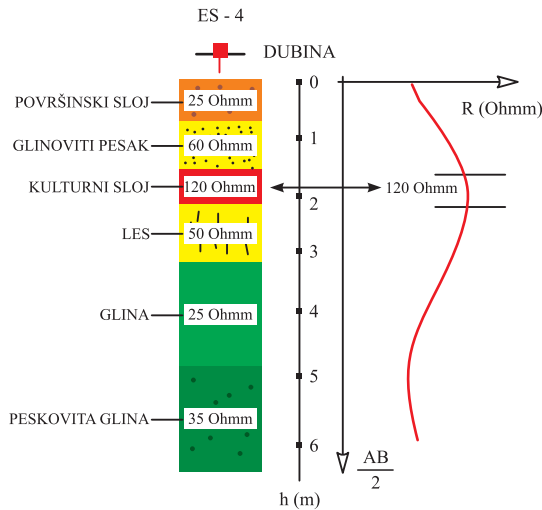
Metoda električnog sondiranja predstavlja merenje električnih otpornosti ispod površine terena sa postepenim povećavanjem dubinskog zahvata do željene dubine. Pri tome se sve elektrode moraju nalaziti na pravoj liniji. Za razliku od kartiranja, metoda sondiranja se uglavnom koristi kod detekcije slojeva na većim dubinama.

Terenska procedura prilikom sondiranja sastoji se u sledećem. Na terenu se izabere mesto koje predstavlja centralnu tačku elektrodnog dispozitiva (0) jer ispod nje po vertikali utvrđujemo građu istraživanog terena. Zatim se postavljaju prijemne elektrode M i N koje su nepokretne, a merenja se izvode simetričnim udaljavanjem strujnih elektroda A i B od centralne tačke (slika 53). Širenjem rastojanja između strujnih elektroda A i B povećava se dubinski zahvat.



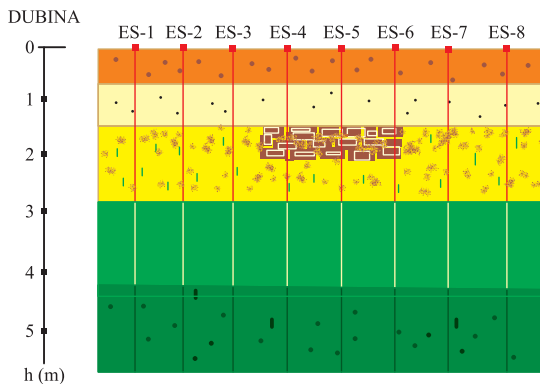
Slika 53. Princip merenja kod električnog sondiranja.

Zatim se konstruiše dijagram električne otpornosti u funkciji dubine. Analizom dijagrama dobijaju se podaci o broju detektovanih slojeva, njihovim debljinama ili dubinama zaleganja i vrednostima električnih otpornosti za svaku sredinu. Metoda sondiranja se često naziva i metodom vertikalnog električnog sondiranja – VES (slika 54).



Slika 54. Rezultat sondiranja i dijagram otpornosti.

Sondiranjem na više tačaka (ES-1, 2, 3... 8) postavljenim po profilu na površini terena, može se dobiti vertikalni električni presek i locirati prisustvo kulturnog sloja sa većom električnom otpornošću (slika 55).



Slika 55. Vertikalni presek terena sa kulturnim slojem.

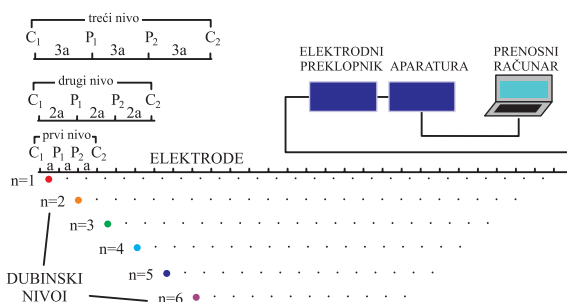
Dobijanje prostorne pozicije kulturnog sloja vrši se postupkom interpretacije podataka dobijenih sa svih tačaka sondiranja koje se nalaze na profilu. Pri tome se samo na tačkama sondiranja ES-4, ES-5 i ES-6 uočava da na određenim dubinama postoje indicacije o većim vrednostima električne otpornosti, dok kod drugih tačaka toga nema.



Vertikalno električno sondiranje predstavlja 1D, odnosno jednodimenzionalno istraživanje prostora ispod površine terena – po vertikali, sa dobijanjem dubina zaleganja i električnih otpornosti prisutnih slojeva ili materijala. Interpretacija podataka se može vršiti ručno, putem nomograma ili na računaru pomoću nekog od brojnih programa.

Savremena varijanta električnog istraživanja predstavlja metodu skeniranja. Električnim skeniranjem se služimo u cilju dobijanja 2D (dvodimenzionalnog) modela terena po parametru specifične električne otpornosti. 2D model istraživanog terena se dobija merenjem po profilu izabrane dužine i dubine. Električno skeniranje je kombinacija kartiranja i sondiranja i predstavlja metodu višestrukog prekrivanja ispitivanog prostora na više dubinskih nivoa. Pri tome se mogu koristiti razne vrste elektrodnih dispozitiva, shodno cilju istraživanja.

Istraživanja metodom skeniranja izvode se na taj način što se veći broj elektroda postavljenih u linijskom nizu, na istom međusobnom rastojanju, povežu višezilnim kablovima, a potom se u postupku prikupljanja podataka tim elektrodama menjaju uloge (ili postaju strujne ili potencijalne). Kod elektrodnog dispozitiva tipa Vener, za prvi nivo istraživanja, rastojanje elektroda je najmanje i jednako je minimalnom rastojanju elektroda u mernom dispozitivu  $a$ . Prilikom početka merenja, na prvom dubinskom nivou, aktiviraju se prve četiri elektrode 1, 2, 3 i 4, pri čemu su elektrode 1 i 4 strujne a 2 i 3 potencijalne. Za drugo merenje, na takođe prvom dubinskom nivou, aktiviraju se elektrode 2, 3, 4 i 5, pri čemu trenutno elektrode 2 i 5 imaju ulogu strujnih, a 3 i 4 potencijalnih. Izmerene vrednosti električne otpornosti se pripisuju sredini trenutno aktivnog dispozitiva – tačkice na dubinskim nivoima. Postupak se na sličan način ponavlja aktiviranjem svakog sledećeg kvarteta elektroda sve dok se ne izvrše sva merenja na prvom dubinskom nivou. Merenja na drugom dubinskom nivou, čime se postiže veći dubinski zahvat, započinju aktiviranjem elektroda 1, 3, 5 i 7, koje su na međusobnom rastojanju  $2a$ . Na taj način merenja će se obaviti na svim dubinskim nivoima. Korak ispitivanja, ili pomeranje aktivnog kvarteta elektroda, na svim nivoima jednak je minimalnom rastojanju elektroda  $a$  (slika 56).

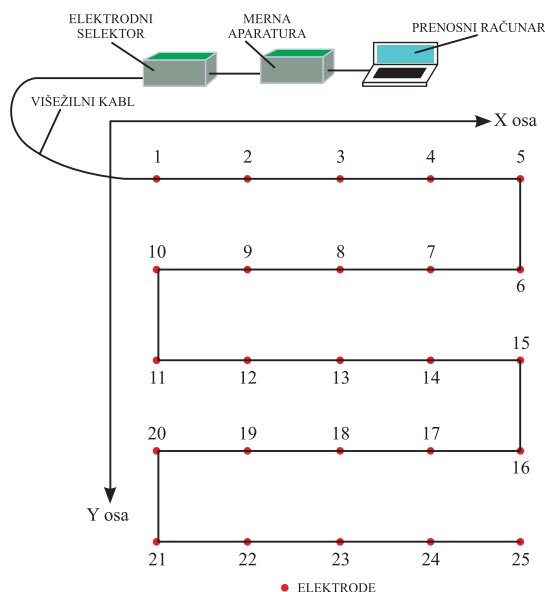


Slika 56. Princip izvođenja električnog skeniranja sa dispozitivom Vener.

Zbog povećanja dimenzija mernog dispozitiva sa povećavanjem dubine nivoa ispitivanja, smanjuje se i broj izmerenih podataka električne otpornosti. Dubinski nivoi su sve kraći sa povećavanjem dubine i zbog toga prostorna pozicija prikupljenih podataka ima trapezoidni izgled.

Da bismo došli do informacija o prisutnim geološkim i drugim materijalima i njihovim električnim otpornostima, kao i o njihovoj građi, dobijeni podaci se analiziraju specijalnim postupkom, takozvanom inverzijom preko nekog od 2D programa na računaru.

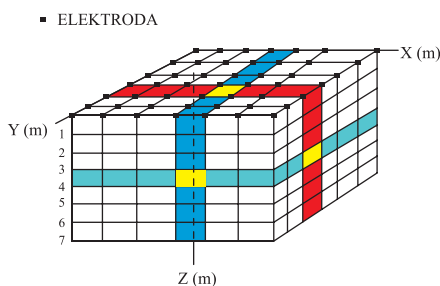
Koristeći princip skeniranja u 2D varijanti istraživanja se mogu organizovati i izvoditi kao 3D (trodimenzionalno). Osnovni princip predstavlja merenje otpornosti po mreži tačaka odnosno elektroda koje pokrivaju izabranu površinu na terenu. Mreža elektroda ima svoje koordinate po X i Y osi, a elektrode se povezuju sa mernom aparturom preko višezilnog kabla, kao i kod 2D skeniranja (slika 57).



Slika 57. Mreža elektroda kod 3D skeniranja.

3D skeniranjem dobijamo vrlo detaljne rezultate u vidu više vertikalnih i horizontalnih 2D preseka (slojeva) definisanih u sklopu X, Y i Z koordinatnih osa. U zavisnosti od minimalnog rastojanja elektroda po X i Y osi, dobija se i odgovarajući dubinski zahvat po Z osi. Vertikalni preseki (slojevi) po ravni XZ poredani su duž Z ose, a vertikalni preseki (slojevi) po ravni YZ poredani su po X osi. Horizontalni preseki (slojevi) poredani su po Z osi nadole.

Kako bi bilo jasnije, na 3D modelu skeniranja (slika 58) kao primer, tri preseka (slojeva) koji se međusobno seku, obojena su plavom, crvenom i tirkiznom bojom.



Slika 58. 3D model skeniranja.

Vertikalni plavi presek dobijen je po YZ ravni i nalazi se od 3. do 4. metra po X osi. Vertikalni crveni presek dobijen je po XZ ravni i nalazi se od 3. do 4. metra po Y osi. Horizontalni tirkizni presek dobijen je po XY ravni i nalazi se od 3. do 4. metra po Z osi.

Da bismo mogli efikasno da planiramo primenu električnih metoda u arheologiji (koje se zasnivaju na merenju električne otpornosti), potrebno je da znamo koje su orijentacione vrednosti otpornosti za neke geološke sredine i materijale koji se inače najčešće sreću u praksi (Tabela 5).

Geološka sredina	Električna otpornost (Om)
Granit	1 000 – 10 000
Škriljci	200 – 3 000
Peščar	300 – 10 000
Krečnjak	300 – 1 000
Laporoviti krečnjak	30 – 60
Lapori i laporci	20 – 100
Glinoviti peščari	50 – 300
Glina	10 – 25
Pesak suv	100 – 200
Pesak mokar	40 – 60
Šljunak suv	800 – 1 000
Šljunak sa vodom	80 – 120
Šumski humus	50 – 60
Rečna čista vodaoko	45
Rečni nanos	30 – 100

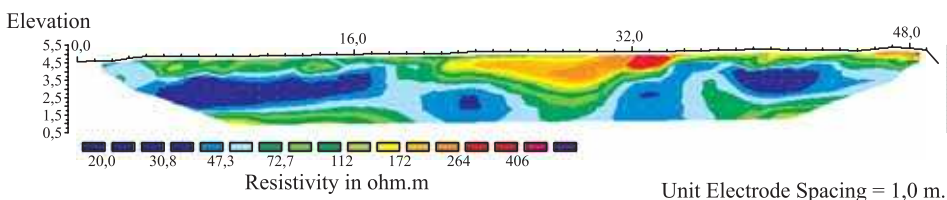
Tabela 5. Električne otpornosti nekih geoloških sredina.

## PRIMER IZ PRAKSE BR. 3

### 2D ELEKTRIČNO SKENIRANJE NA LOKALITETU MANASTIR DRENČA

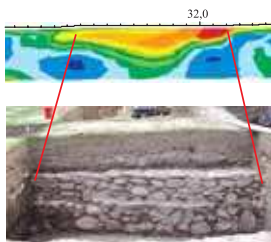
Na arheološkom lokalitetu Manastir Drenča pored Župskog Aleksandrova, krajem juna 2005. god. izvršena su geofizička istraživanja metodom električnog skeniranja zasnovanom na merenju specifične električne otpornosti u cilju detekcije mogućeg prisustva ostataka zidova koji su bili sagrađeni oko crkve i konaka manastirskog kompleksa. Profili skeniranja su bili postavljeni na platou oko crkve iz XIV veka koja je posvećena Vavedenju Presvete Bogorodice.<sup>9</sup>

Kao primer predstavljamo rezultate skeniranja po profilu 2. Profil 2 je bio dugačak 50 metara, a minimalno elektrodno rastojanje je bilo 1 metar. Kao što se vidi, na središnjem delu (slika 59) uočena je anomalijaska zona sa električnom otpornošću većom od 250 Ohmm, od 21. do 34. metra po dužini i dubinom za-  
leganja do 2 metra. Ova anomalijaska zona je bila osnovni razlog za otvaranje arheološke sonde u cilju nalaženja ostataka temelja manastirskog konaka.



Slika 59. 2D električni presek skeniranja po profilu 2, lokalitet Manastir Drenča.<sup>9</sup>

Postavljanjem arheološke sonde i iskopavanjem ustanovljeno je prisustvo ostataka temelja manastirskog kompleksa (slika 60). Crvenim linijama je označena veza između anomalijaska zone na 2D električnom preseku i otkopanog temelja koji je fotografisan.



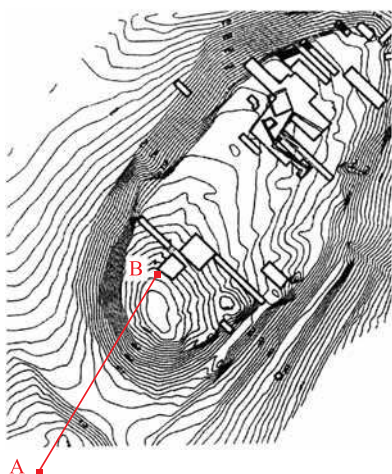
Slika 60. Korelacija geofizičke anomalije i rezultata iskopavanja, fotografija arh. sonde, ljubaznošću G. Tošić, Zavod za zaštitu spomenika kulture u Kraljevu.

<sup>9</sup> Vukadinović, M., Izveštaj o geofizičkim merenjima, fond Zavoda za zaštitu spomenika kulture u Kraljevu, 2005.

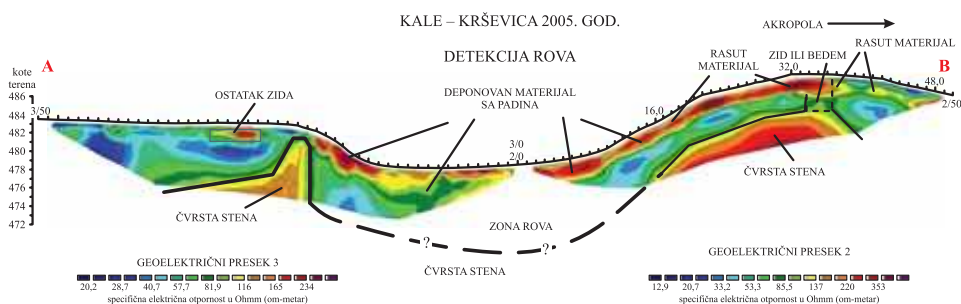
## PRIMER IZ PRAKSE BR. 4

### 2D ELEKTRIČNO SKENIRANJE NA LOKALITETU KALE – KRŠEVICA

Arheološki lokalitet Kale – Krševica kod Bujanovca predstavlja helenističko antičko naselje i utvrđenje – akropolu iz perioda VI–III veka p.n.e. (slika 61). Na lokalitetu je izvedeno merenje metodom geoelektričnog skeniranja na više profila a ovde su prikazani rezultati skeniranja u domenu akropole, na njenom jugozapadnom delu, gde je očekivano prisustvo odbrambenog rova pored bedema (slika 62)<sup>10</sup>.



Slika 61. Akropola i položaj profila skeniranja preko „rova“, ljubaznošću dr. P. Popovića, rukovodioca projekta Kale – Krševica.



Slika 62. Rov, 2D električni preseki po profilima 2 i 3, Kale – Krševica.<sup>10</sup>

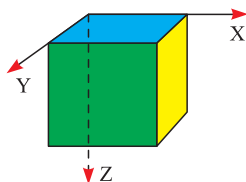
<sup>10</sup> Vukadinović, M., 2005, Rezultati geofizičkih istraživanja metodom geoelektričnog skeniranja i geoelektričnog sondiranja na arheološkom nalazištu Kale – Krševica, *Zbornik Narodnog muzeja XVIII–1*, Beograd, 291–307.

## PRIMER IZ PRAKSE BR. 5

### 3D ELEKTRIČNO SKENIRANJE NA LOKALITETU BELO BRDO

Na arheološkom lokalitetu Belo Brdo u Vinči u februaru 2004. god. obavljeno je prvo 3D skeniranje u cilju detekcije neolitske kuće.<sup>11</sup>

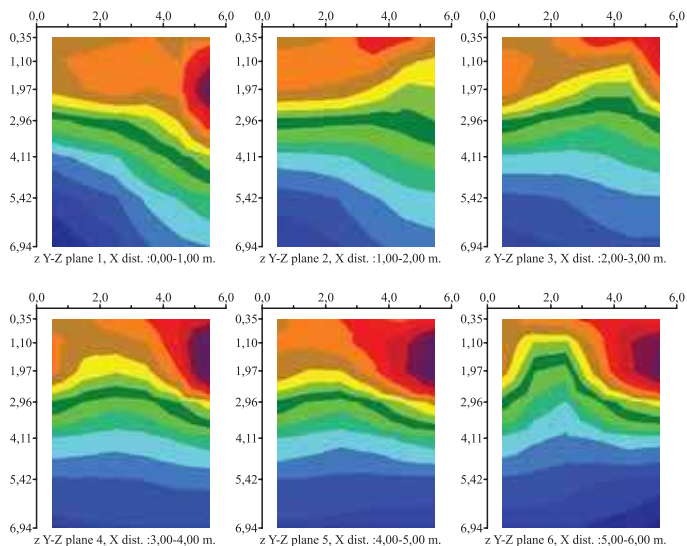
Tumačenje pozicije električnih preseka u 3D formi, kako je već navedeno, vezuje se za troosni koordinatni sistem (slika 63).



Slika 63. Orijentacija osa X, Y i Z kod 3D modela Belo brdo u Vinči.

Merenje je obavljeno po mreži elektroda 7 x 7 metara sa ukupno 49 elektroda koje su bile na međusobnom razmaku od 1 metra. Interpretacijom su dobijene vertikalne 2D sekcije po parametru električne otpornosti: po vertikalnim presecima YZ, XZ i horizontalne sekcije po XY (slika 64, slika 65 i slika 66).

### PRESECI YZ



Slika 64. Rezultati skeniranja po YZ presecima.

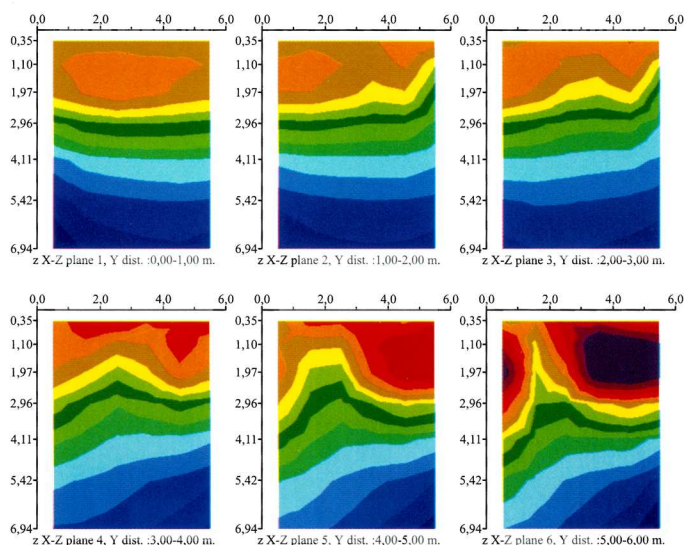
<sup>11</sup> Nepublikovano, električno 3D skeniranje obavio M. Vukadinović.



Rezultat skeniranja po YZ preseccima ukazuje na pojavu većih električnih otpornosti preko 100 Ohmm (braon do crvena boja na legendi), koje su posledica prisustva ostataka neolitske kuće. Anomalijske vrednosti preko 100 Ohmm su indicirane na sledećim preseccima, po X osi od 0 do 1 m, od 3 do 4 m, od 4 do 5 m i od 5 do 6 metara, do dubine oko 2,5 metara (slika 65).

Ostaci neolitske kuće leže na lesoidnim materijalima koji imaju otpornost ispod 50–60 Ohmm (svetlozelena, tamnozeleno do žute boje na legendi preseka). Lesoidne materijale smenjuju gline, ispod 4 metra dubine, sa otpornostima ispod 25 Ohmm (svetloplava boja na legendi preseka).

## PRESECI XZ

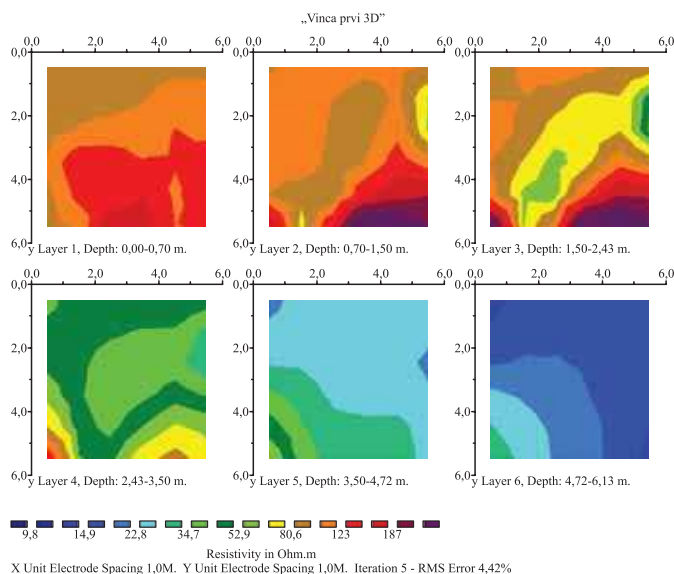


Slika 65. Rezultati skeniranja po XZ preseccima.

Rezultat skeniranja po XZ preseccima ukazuje na pojavu većih električnih otpornosti preko 100 Ohmm (braon do crvena boja na legendi), koje su posledica prisustva ostataka neolitske kuće (slika 66). Anomalijske vrednosti preko 100 Ohmm su indicirane na tri preseka po Y osi, od 3 do 4 m, od 4 do 5 m i od 5 do 6 metara (takođe kao i na YZ preseccima), sa prostiranjem do dubine oko 2,5 metara. Ostaci neolitske kuće leže na lesoidnim materijalima koji imaju otpornost ispod 50–60 Ohmm (svetlozelena, tamnozeleno do žute boje na legendi preseka). Lesoidne materijale smenjuju gline, ispod 4 metra dubine, sa otpornostima ispod 25 Ohmm (svetloplava boja na legendi).

Međusobni vertikalni presecci po YZ i po XZ saglasni su po prostornoj poziciji detektovane anomalije zone koju su prouzrokovali ostaci neolitske kuće.

## HORIZONTALNI PRESECI XY



Slika 66. Rezultati skeniranja po XY preseccima – slojevima.

Rezultati dobijeni skeniranjem po vertikalnim preseccima XZ i YZ potvrđeni su horizontalnim preseccima po XY. Anomalijska zona nastala usled prisustva ostataka neolitske kuće jasno je izražena na samo dva horizontalna preseca (sloja): od 0,7 do 1,5 m, i od 1,5 do 2,43 m, sa otpornostima iznad 100 Ohmm (od braon do tamnocrvene boje).

Na osnovu horizontalnih preseca konstatovano je da se ostaci kuće nalaze stratigrafski od 0,7 do 2,43 metra dubine. Takođe je zaključeno, na osnovu horizontalnih preseca, da su u donjim delovima istraživanog prostora prisutni prirodni sedimenti – gline ili peskovite gline, sa otpornostima ispod 25 Ohmm (svetloplava boja na legendi preseca) ispod 4 m dubine. Glinoviti materijali nalaze se ispod lesoidnih materijala na kojima leže kulturni slojevi.

Na ovaj način, posmatrajući vertikalne i horizontalne preseke i njihove međusobne odnose, možemo zaključiti da smo sa dosta preciznosti, u tri dimenzije – 3D, odredili prisustvo arheoloških ostataka neolitske kuće.

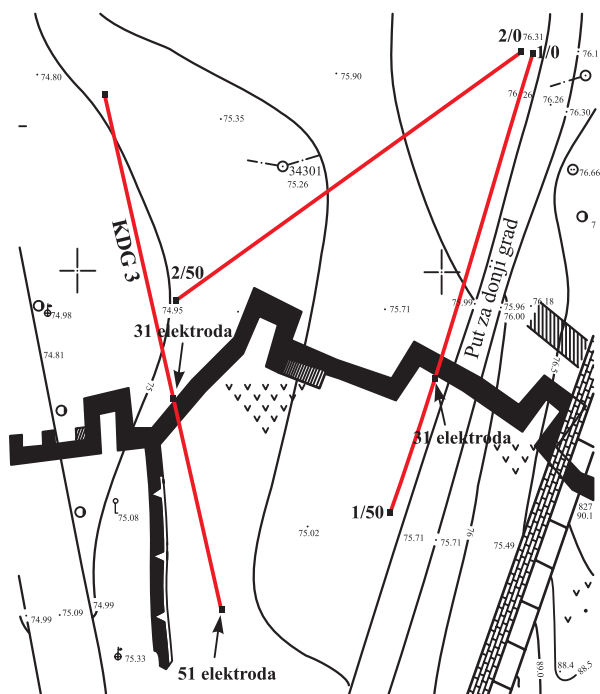


## PRIMER IZ PRAKSE BR. 6

### KORELACIJA ELEKTRIČNIH I SEIZMIČKIH MERENJA NA TERENU DONJEG GRADA BEOGRADSKE TVRĐAVE

#### *Električna merenja metodom skeniranja na terenu Donjeg grada*

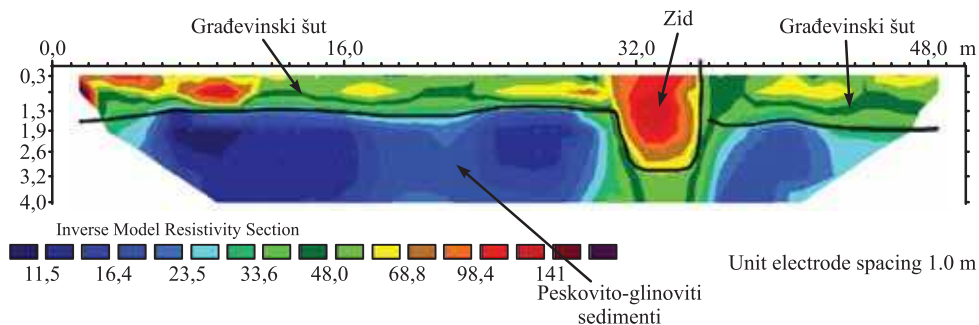
Na prostoru Donjeg grada Beogradske tvrđave, tokom 2004. god. izvedena su geofizička istraživanja metodom električnog skeniranja po parametru električne otpornosti na tri profila čija je pozicija data na situaciji u razmeri 1:500 na listu detalja br. 5, situacioni plan – Beogradska tvrđava 1:500 (slika 67)<sup>12</sup>. Osnovni cilj istraživanja bilo je lociranje prisustva i pravca pružanja podzemnog objekta – zida čije je prisustvo utvrđeno arheološkom sondom. Očekivani zid je trebalo da se detektuje par desetina metara severnije od postojećeg, koji je debelom crnom linijom ucrtan na situaciji. Pri tome traženi zid nije otkriven.



Slika 67. Situacija i položaj profila skeniranja, Donji grad, Beogradska tvrđava.

<sup>12</sup> Nepublikovano, električno 2D skeniranje obavili M. Vukadinović i A. Kapuran, dokumentacija u Arheološkom institutu.

Po profilu KDG-3, metodom električnog skeniranja (po parametru električne otpornosti) dobijen je 2D električni model terena (slika 68), na kome je evidentirano prisustvo već poznatog i prisutnog fortifikacionog zida kao anomalijiska zona većih otpornosti (preko 100 Ohmm) sa dubinom do oko 2,5 m. Levo i desno od navedene anomalijiske zone, do dubine od 1,3 do 1,5 metra, nalaze se ostaci heterogenog materijala koji predstavlja poravnat i nivelisan građevinski šut. Ispod pomenutog sloja heterogenog materijala sa šutom, nalaze se pretežno glinoviti do glinovito-peskoviti materijali sa otpornostima manjim od 30 Ohmm. Dubinski zahvat električnog skeniranja je iznosio do 4 metra.



Slika 68. Električni 2D model po profilu KDG-3, Donji grad, Beogradska tvrđava.

### *Refrakciona seizmička merenja na terenu Donjeg grada*

Početak juna 2005. god., na terenu u Donjem gradu Beogradske tvrđave izvršena su eksperimentalna merenja metodom seizmičke refrakcije duž profila REF-1, koji je bio postavljen po istoj liniji ranije izvedenog električnog profila skeniranja KDG-3, preko fortifikacionog zida<sup>13</sup>.

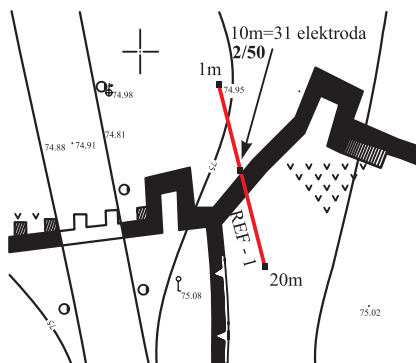
Cilj geofizičkih terenskih merenja bio je u tome da se sagledaju rezultati detekcije građevinskog objekta – fortifikacionog zida po profilu REF-1 metodom refrakcije i time doprinese saznanjima o mogućnostima njene primene prilikom arheoloških istraživanja.

Položaj profila REF-1, duž kojeg je izvedeno merenje metodom refrakcije predstavljen je na situaciji (slika 69), na listu detalja br. 5 (situacioni plan – Beogradska tvrđava).

Pobuđivanje elastičnih oscilacija obavljeno je na dve krajnje tačke profila REF-1 pomoću teškog čekića (8 kg). Profil je bio dugačak 20 metara. Položaj i dužina seizmičkog profila bili su uslovljeni zadatkom da se obezbedi neopho-

<sup>13</sup> Nepublikovano, seizmička merenja obavili M. Vukadinović, P. Špehar, V. Ljuština i D. Rauba, dokumentacija u Arheološkom institutu.

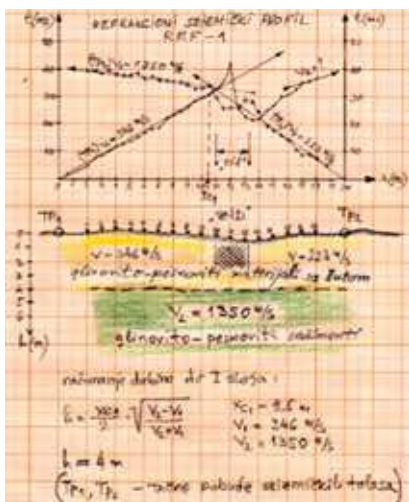
dan dubinski zahvat i dobra rezolucija prostora gde je očekivano prisustvo neotkopanog zida, tako da su tačke prijema (geofonska mesta) postavljene na međusobnom rastojanju od 0,5 metara.



Slika 69. Profil REF-1 preko fortifikacionog zida, Donji grad, Beogradska tvrđava.

Obrada rezultata merenja obavljena je klasičnim postupkom interpretacije, sa osnovnim formulama metodom refrakcije za dobijanje brzina i dubina do prisutnih slojeva, ne upuštajući se u složenije postupke obrade podataka kako bi se ova metoda predstavila što jasnije i jednostavnije.

Rezultati merenja, odnosno dobijene hodohrone ukazuju na prisutnost zida kao nehomogene građevine koja nije kompletno izgrađena od čvrstog materijala, sa pretpostavkom da u svojoj unutrašnjosti ima nepravilno izmešan čvrsti i raspadnuti materijal. Nagli skokovi hodohrona u domenu zida ukazuju i na slab mehanički kontakt detektovanog zida i okolne sredine. Rezultati merenja su prikazani na milimetarskom papiru u originalnoj radnoj verziji (slika 70).

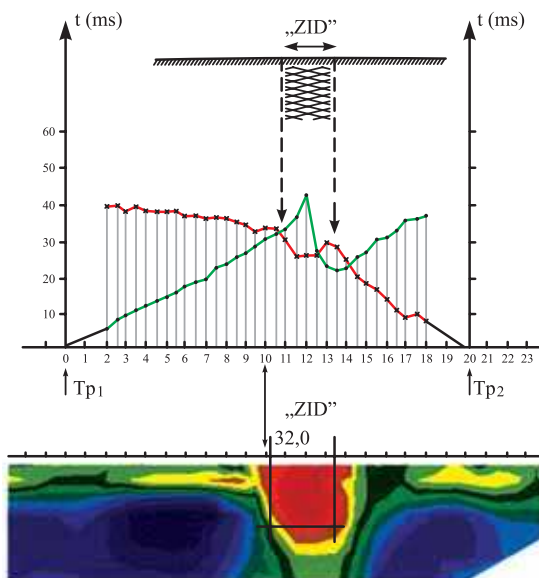


Slika 70. Radna verzija postupka interpretacije rezultata po profilu REF-1, Donji grad, Beogradska tvrđava.

Prema dobijenim rezultatima metodom refrakcije, do dubine od 4 metra (u zoni refrakcionog profila), nalazi se rastresiti materijal (i nešto građevinskog šuta) pretežno glinovitog sastava sa brzinama talasa od 0,22 do 0,35 km/s. Ispod pomenutog (gornjeg) sloja nalazi se sredina sa pretežno glinovito-peskovitim sedimentima karakteristične brzine od 1,350 km/s. Pri tome je zajmlučeno da je gornji sloj veštački nasut i nivelisan, a da donja sredina pripada prirodno uslojenim sedimentnim tvorevinama.

#### *Uporedni rezultati seizmičkih i električnih merenja*

Prostorna veza električnog 2D modela dobijenog po profilu KDG-3 i refrakcionog profila REF-1 bila je ostvarena tako da je deseti metar dužine seizmičkog profila postavljen tačno na mesto trideset i prvog metra dužine električnog profila. Pri tome, duž seizmičkog profila geofoni su postavljeni na svakih 0,5 metara a kod profila skeniranja elektrode su bile na 1 metar međusobnog rastojanja (slika 71).



Slika 71. Uporedni rezultati seizmičke refrakcije po profilu REF-1 i 2D električnog skeniranja po profilu KDG-3, Donji grad, Beogradska tvrđava.

Na osnovu dobijenih pojedinačnih rezultata metoda koje su primenjene i njihovog neposrednog poređenja, može se zaključiti da se primenjene metode međusobno dopunjuju i da su u visokoj meri saglasne po pitanju određivanja prisustva zida u tlu.

Na osnovu izloženog, električna metoda je dala šire dimenzije u odnosu na seizmičku koja je bila preciznija u određivanju bočnih dimenzija, iako pomoću nje nije određena dubina zaleganja zida.

Na osnovu analize dobijenih rezultata merenja pomoću dve pomenute metode, može se zaključiti da je širina zida oko 1,5 metara i da se prostire do oko 2 metra dubine<sup>14</sup>.

Takođe, nedostatak ovog poređenja je i činjenica da je interpretacija podataka dobijenih električnim skeniranjem izvršena softverski u 2D varijanti pomoću komercijalnog programa, a prilikom seizmičkih merenja metodom refrakcije nije korišćen softver već takozvana „pešačka” interpretacija (olovkom i digitronom), koja je izvedena odmah na terenu.

---

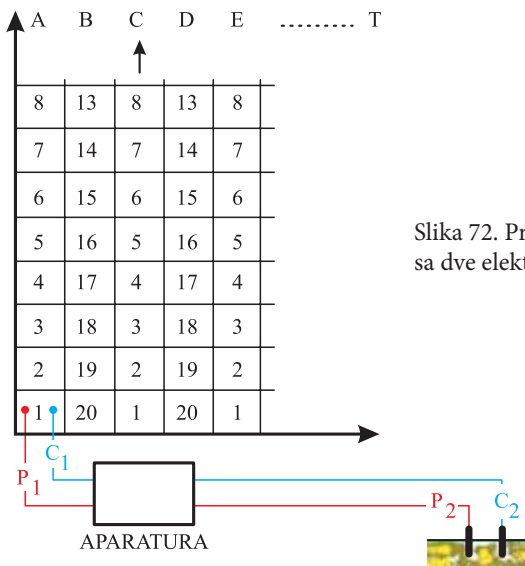
<sup>14</sup> Nepublikovano, uradio M. Vukadinović, dokumentacija u fondu Arheološkog instituta.



# METODA KARTIRANJA PO PARAMETRU ELEKTRIČNE OTPORNOSTI SA DVE ELEKTRODE – „TWIN” METODA

Primena ove metode je odavno poznata, na terenu se po postavljenim profilima ili mreži tačaka vrši merenje sa dve pokretne elektrode  $C_1$  i  $P_1$ , dok su druge dve  $C_2$  i  $P_2$  fiksirane jedna pored druge van istraživane površine. Pokretne elektrode  $C_1$  i  $P_1$  nalaze se na prenosnom nosaču i sa njima se vrši merenje električne otpornosti na mernim poljima.  $C_1$  i  $C_2$  su strujne, a  $P_1$  i  $P_2$  su potencijalne elektrode.

Ova metoda koristi se u cilju dobijanja podataka o lateralnim promenama električnih otpornosti na konstantnoj dubini. Ako se merenja vrše po pojedinim profilima, rezultati se predstavljaju u vidu dijagrama, a ako se merenja vrše po mreži tačaka, dobijeni rezultati se predstavljaju u vidu karata za ostvareni dubinski nivo. Istraživana površina (slika 72) najčešće ima dimenzije 20x20 metara sa mernim poljima 1x1 metar (400 mernih polja).



Slika 72. Princip merenja sa dve elektrode.

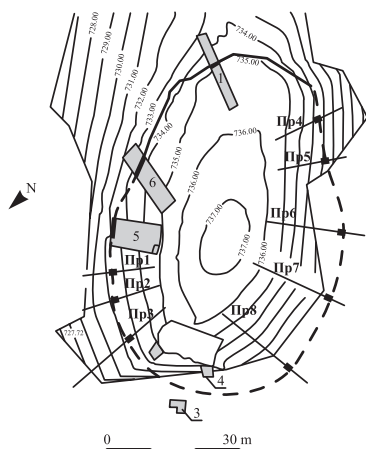
Pomoću aparature sa dve pokretne i dve fiksirane elektrode (negde na terenu), moguće je ostvariti vrlo brzo istraživanje terena i detekciju prisustva arheoloških ostataka relativno plitko ispod površine terena, od 1 do 1,5 metara dubine. Za terenska merenja najpopularniji su elektrodni sistemi takozvani „Twin” ili „Pole-Pole”<sup>15</sup>, uz mogućnost aktiviranja i drugih tipova elektrodnih rasporeda<sup>16</sup>.

## PRIMER IZ PRAKSE BR. 7

### KARTIRANJE PO PARAMETRU ELEKTRIČNE OTPORNOSTI SA „TWIN” METODOM

U okolini sela Svinjište, na praistorijskom naselju – gvozdenuodopskoj gradini koja pripada halštatskom periodu, izvršeno je geofizičko istraživanje 2006. god. „Twin” metodom električnog kartiranja sa dve elektrode, u cilju utvrđivanja trase odbrambenog bedema oko praistorijskog naselja<sup>17</sup>.

Da bi se merenja obavila shodno cilju istraživanja, postavljeno je 8 radialno usmerenih profila pomoću pantljičke i kompasa u odnosu na poznatu – referentnu geodetsku tačku na najvišoj koti unutar naselja. Dužine profila su bile od 18 do 27 metara. Pri tome početne tačke svakog profila su bile unutar naselja a pravci su bili upravni na očekivano pružanje bedema (slika 73).



Slika 73. Situacija praistorijskog naselja sa geofizickim profilima i trasom odbrambenog bedema na lokalitetu Svinjište, ljubaznošću A. Kapurana i S. Bulatovića.

<sup>15</sup> Bruce W. Bevan, Geosight, Geosight Technical Report No. 6, February 2000.

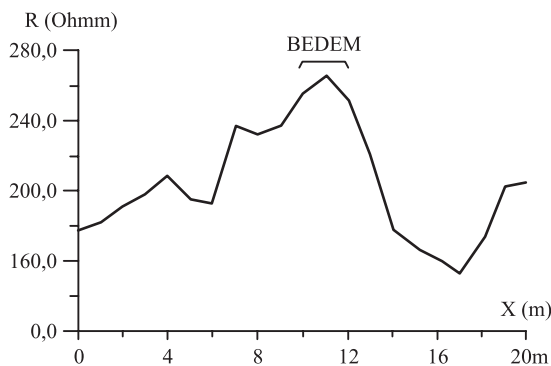
<sup>16</sup> D. Simpson and R. Peterson, Archaeo-geophysical investigation the Emmanuel Church and former Glasgow Street location of the Church Portsmouth, Virginia, may 18, 2004.

<sup>17</sup> M. Vukadinović, A. Kapuran i S. Bulatović, u pripremi.



Merenje električne otpornosti je vršeno na svaki metar dužine i sačinjeni su dijagrami električnih otpornosti za svaki profil sa identifikovanom pozicijom bedema.

Na prisustvo zidova – bedema ukazali su položaji anomalijских zona sa električnim otpornostima od 200 do 400 Ohmm (slika 74). Nakon dobijenih informacija sa geofizičke prospekcije po parametru električne otpornosti rekonstruisana je gotovo cela trasa odbrambenog bedema.



Slika 74. Dijagram električne otpornosti po profilu 2.

Korišćena aparatura na lokalitetu Svinjište je „TWIN” – RPM-8 Geophysical Digital Resistivity Meter (slika 75).



Slika 75. „TWIN” aparatura sa dve elektrode u radu na terenu.

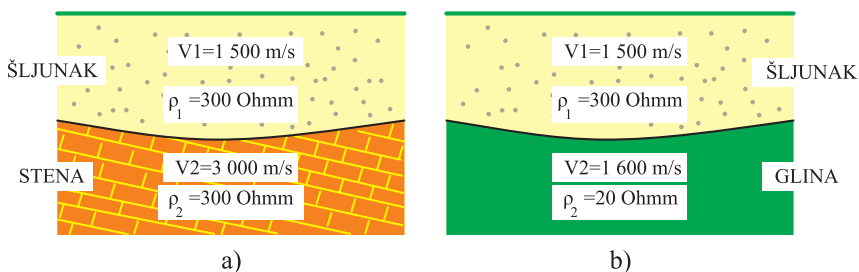
## PRIMER IZ PRAKSE BR. 8

### KOMBINOVANJE ELEKTRIČNIH I SEIZMIČKIH METODA U CILJU IZBEGAVANJA VIŠEZNAČNOSTI REZULTATA MERENJA

Prilikom istraživanja na terenu može se desiti da u nekim slučajevima merenjem električne otpornosti ili refrakcione seizmike ne možemo razdvojiti dve u suštini različite sredine jer imaju skoro iste vrednosti po korišćenim parametrima merenja.

Prvi slučaj je da šljunak i stena mogu imati skoro istu električnu otpornost od oko 300 Ohmm (slika 76a). Zbog toga je potrebno izvesti dopunska merenja metodom refrakcione seizmike, koja će šljunak identifikovati sa dobijenim brzinama od oko 1 500 m/s, a stenu brzinom od preko 3 000 m/s, što je dovoljno za određivanje njihove međusobne granice.

U drugom slučaju, kada šljunak leži na glinovitoj podlozi, refrakciona seizmika je ta koja može dati višeznačne rezultate. Brzine kod šljunkovitih i glinovitih sedimenata se obično kreću oko 1 500 – 1 600 m/s. U tom slučaju potrebno je izvesti dopunska merenja po parametru električne otpornosti. Šljunak će imati oko 300 Ohmm pa i više, a glinoviti sedimenti će imati otpornost oko 20 Ohmm, što je više nego dovoljno za njihovo prostorno definisanje (slika 76b).



Slika 76. Korelacija električne i seizmičke metode.

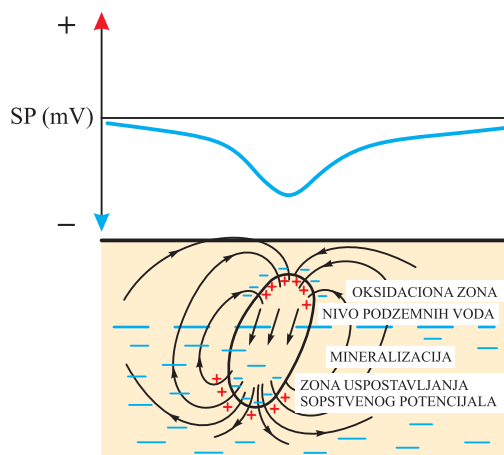
## METODA SOPSTVENOG POTENCIJALA

Metoda sopstvenog potencijala (SP) zasnovana je na proučavanju prirodnih jednosmernih električnih struja koje se spontano pojavljuju u materijalima ispod površine terena. Ove struje imaju lokalni karakter i njihovo poreklo može imati različite uzroke. Najčešća pojava sopstvenog potencijala vezana je za filtraciju podzemnih voda, koja se dešava kroz pore i pukotine stena ispod površine terena. Pri tome pravac pružanja anomalijских zona sopstvenog potencijala po pravilu je uvek u vezi sa pravcem tokova podzemnih voda.

Na ležištima mineralnih sirovina metaličnog tipa, sopstveni potencijali su izuzetno visoki, a nastaju kao posledica oksidaciono-redukcionih procesa u interakciji rudno telo – podzemna voda. U ovakvim slučajevima pravci pružanja anomalija sopstvenog potencijala odgovaraju pravcima pružanja orudnjenja.

U arheologiji merenje sopstvenog potencijala može biti interesantno u arheometalurgiji prilikom prostorne detekcije rudarskih radova iz prošlosti, kao što su komore odakle je izvađena ruda. Pojavu sopstvenog potencijala, u tim slučajevima, obično stvara mineralizacija utisnuta u zidove rudarskih radova koja u fazi eksploatacije nije potpuno izvađena. A iz literature i prakse je poznato da sopstveni potencijal kod masivnih sulfidnih ruda metala može upaliti malu sijalicu iz baterijske lampe. Merenje sopstvenog potencijala može dobro poslužiti i prilikom detekcije ostataka starih vodovodnih instalacija i zakopanih metalnih predmeta ispod površine terena.

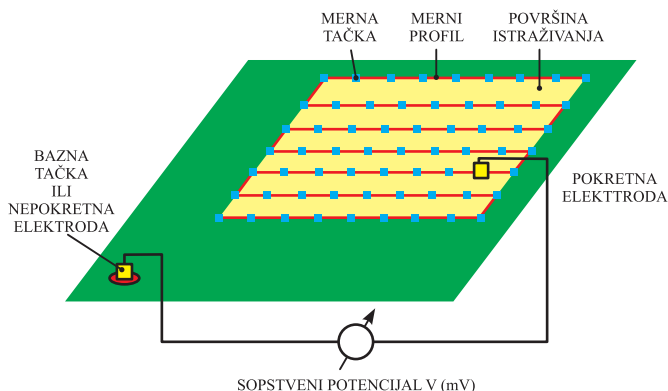
U slučaju da se rudna mineralizacija nalazi delom ispod nivoa podzemne vode, stvara se prirodna galvanska ćelija odnosno baterija koja generiše električnu struju (slika 77). Stvaranje električne struje se obavlja usled dvojnog procesa – oksidacionog i redukcionog. U tom procesu, metalna supstanca se oksiduje u površinskom sloju uz pomoć atmosferskog kiseonika i čini anodni deo, dok se kiseonik redukuje na spoju vode i metala ispod nivoa podzemne vode i čini katodni deo prirodne galvanske ćelije.



Slika 77. Sopstveni potencijal iznad mineralizacije.

U tom prirodnom galvanском procesu elektroni se transportuju sa anode na katodu kroz metal, dok se protok jona ostvaruje kroz vodu. Na taj način prirodna hemijska energija pretvara se u električnu. Mineralizacija, odnosno ruda ili neko telo od metala u prisustvu podzemnih voda konstantno oko sebe generiše električno polje, koje možemo osetiti i izmeriti po površini terena.

Merenje polja SP-a nije teško organizovati i za to nisu potrebni skupi instrumenti. Za merenja po površini terena koriste se nepolarizovane elektrode specijalnih konstrukcija koje se povezuju za precizni voltmetar. Pri merenjima se koriste dve elektrode, jedna se kao bazna i nepokretna tačka postavlja na izvesnom rastojanju od površine na kojoj se vrše merenja, a druga je pokretna i njom se meri po mreži profila. Pri merenjima se teži da pravci istražnih profila seku pretpostavljene pravce prostiranja istraživanih struktura (slika 78).



Slika 78. Princip merenja sopstvenog potencijala.

Interpretacija izmerenih podataka sopstvenog potencijala je kvalitativna i jednostavna. Na osnovu podataka mogu se konstruisati dijagrami potencijala ili karte izolinijska, na kojima se mogu uočiti anomalijске zone. Na osnovu oblika, intenziteta i polariteta dobijenih anomalija mogu se locirati prisustvo podzemnih struktura, njihova središta, približni oblik i prostorno prostiranje. Nažalost, dubinu uzročnika ovom metodom je dosta teško odrediti.

Teorijom i primenom metode merenja sopstvenog potencijala bavio se i čuveni ruski geofizičar A.S. Semenov, koji je dao interesantne primere u svojoj knjizi *Elektrorazvedka metodom estestvennogo električeskog polja* (slika 79).

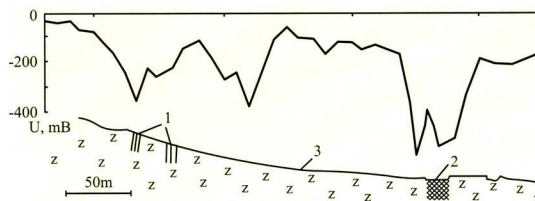
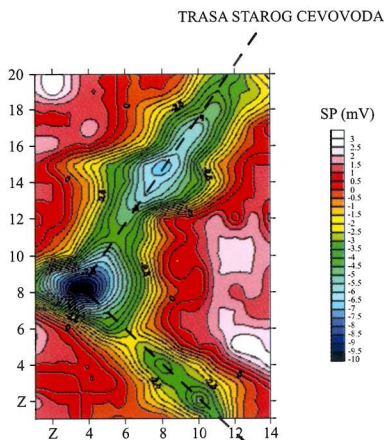


Рис. 125. Кривая потенциала естественного поля над сульфидным и магнетитовым рудными телами (по С. С. Шкорбатову).  
1 – сульфидные жилы; 2 – магнетитовое рудное тело; 3 – диориты.

Slika 79. Primer merenja sopstvenog potencijala (prema A. S. Semenev, 1968).

Merenjem sopstvenog potencijala može se lako detektovati i trasa starih vodovodnih instalacija gde je transport vode i dalje delimično aktivan, tako da postoji i konstantno vlaženje okolnog prostora. Takođe je ustanovljeno da najveće gubljenje vode nastaje na mestu gde cevovod menja pravac (-10 mV) pod skoro pravim uglom. Dobijeni rezultati merenja sopstvenog potencijala su iz prakse autora ove knjige i provereni su kroz proces obnove vodovoda (slika 80).



Slika 80. Trasa stare vodovodne instalacije, dokumentacija M. Vukadinovića.

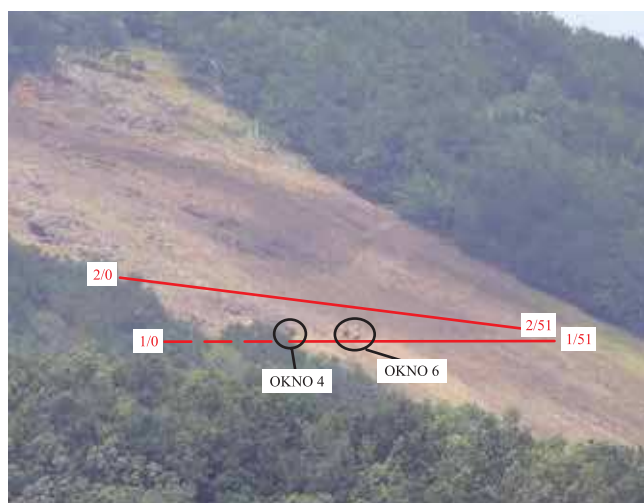
## PRIMER IZ PRAKSE BR. 9

### MERENJE SOPSTVENOG POTENCIJALA – SP

U fazi obnavljanja arheoloških istraživanja praistorijskog rudnika bakra na Malom šturcu na planini Rudnik, sredinom 2010. god. izvedena su i geofizička merenja manjeg obima metodom sopstvenog potencijala (SP), koja su imala za cilj detekciju prostornog položaja praistorijskih okana odnosno rudnih pojava.<sup>18</sup>

Teren na kome su izvršena merenja metodom sopstvenog potencijala je ogoljen i bez vegetacije i nosi adekvatan naziv – Prljuša. Pored praistorijskih okana vidljivi su tragovi sekundarnih minerala bakra – malahita i azurita. Sekundarni minerali bakra nastali su u uslovima površinskih oksidaciono-redukcionih procesa i raspadom primarnog minerala bakra halkopirita, čime su ispunjeni osnovni uslovi za primenu metode sopstvenog potencijala.

Merenja metodom sopstvenog potencijala izvedena su na dva profila pojedinačne dužine od 50 metara u neposrednoj blizini okana 4 i 6 (slika 81). Merenja su obavljena na unapred pripremljenim tačkama, na međusobnom rastojanju od 3 metra. Pri tome je merena razlika potencijala između svake tačke duž profila i jedne zajedničke – bazne (nepokretne), koja je bila udaljena oko 100 metara. Merni profili su postavljeni tako da svojim položajima seku pretpostavljene pravce pružanja rudnih pojava koje su praistorijski rudari eksploatisali.

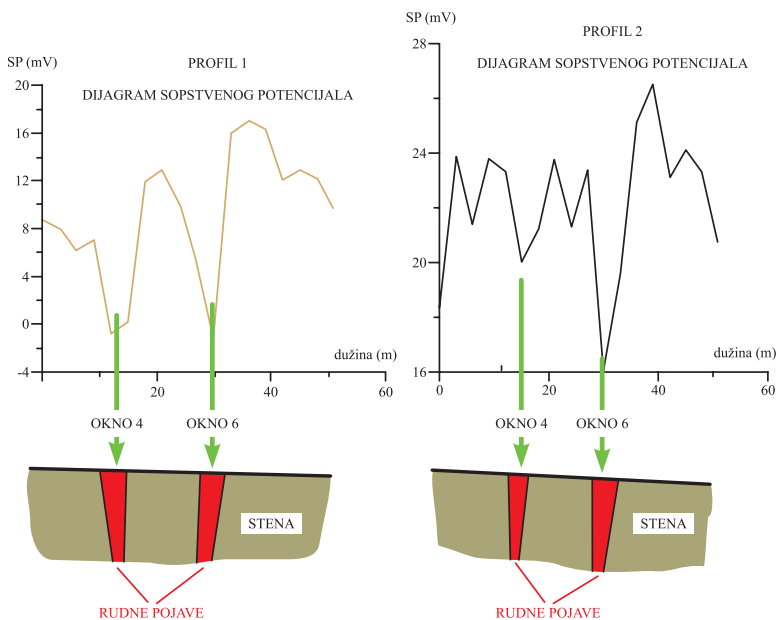


Slika 81. Položaj okana 4 i 6 i merni profili SP-a, Prljuša, Mali šturac (Rudnik).

<sup>18</sup> Merenja obavili M. Vukadinović i D. Antonović.

Pri merenjima korišćene su nepolarizovane elektrode sa vodenim rastvorom bakar-sulfata ( $\text{CuSO}_4$ ) kanadske firme SCINTREX i visoko precizni milivoltmetar sa ulaznom impedansom od  $10 \text{ M}\Omega$ .

Prema izmerenim podacima SP-a na terenu, sačinjeni su dijagrami sopstvenog potencijala (slika 82). Na oba dijagrama karakteristični „minimumi” označavaju prisustvo vrlo elektroprovodnih zona – rudnih pojava (žica), koje su u prošlosti bile eksploatisane. Rudne pojave, na osnovu ovih merenja, pružaju se po pravcu SI-JZ i najverovatnije su vrlo strmo nagnute od površine terena naniže.



Slika 82. Dijagrami SP-a i položaj mineralizacije na profilima 1 i 2, Prljuša, Mali šturac (Rudnik).

Na osnovu rezultata merenja sopstvenog potencijala i detekcije rudnih pojava u neposrednoj blizini okana 4 i 6, mogu se doneti dva zaključka. Prvi je da indikacije sopstvenog potencijala prouzrokuje mineralizacija zaostala na zidovima okana nakon praistorijske eksploatacije rude, što posredno može da ukaže na pozicije praistorijskih jama. Drugi mogući zaključak je da praistorijski rudari na Prljuši nisu preduzeli eksploataciju većeg obima, te su prisutne rudne pojave pri površini terena ostale netaknute do danas.

Primenjujući metodu sopstvenog potencijala u arheologiji možemo sa sigurnošću detektovati prostorni položaj rudnih pojava odnosno okana koja su potpuno pokrivena (zatrpana) i time znatno pomoći prilikom terenskih istraživanja.

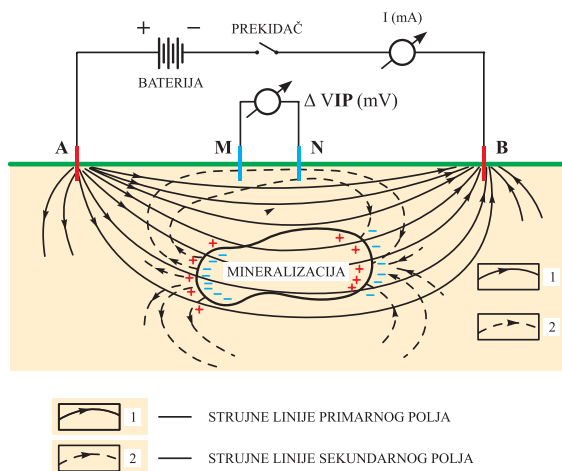




## METODA IZAZVANE POLARIZACIJE

Metoda izazvane polarizacije (IP) proučava zaostala odnosno sekundarna električna polja koja nastaju nakon prekida napajanja električnom strujom prilikom električnih istraživanja sulfidnih i nekih drugih mineralnih sirovina. Sekundarna električna polja imaju elektrohemijski karakter i nastaju na granicama između rudnih materija koje poseduju elektronsku provodljivost (metali) i vlažnih sredina koje ih okružuju i kroz koje se može odvijati samojonska provodljivost.

U arheologiji metoda izazvane polarizacije može se koristiti u cilju određivanja mesta ukopa metalnih predmeta, a naročito u arheometalurgiji. U arheometalurgiji ova metoda može značajno pomoći prilikom otkrivanja prisustva objekata rudarenja iz prošlosti na osnovu efekata izazvane polarizacije koju zaostala mineralizacija može prouzrokovati i nakon vađenja bogatijih delova rude. Metoda izazvane polarizacije se obavezno koristi prilikom detekcije sulfidnih ruda obojenih metala, u sklopu ostalih metoda rudne geofizike (slika 83).



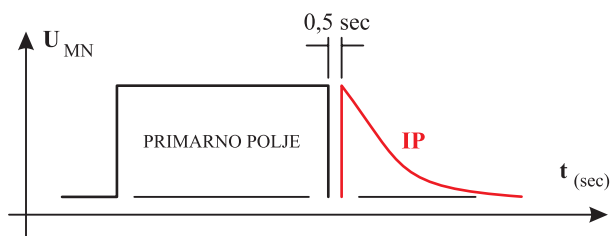
Slika 83. Princip izazvane polarizacije.

Rudne pojave koje poseduju elektronsku provodnost uglavnom su minerali obojenih metala sulfidnog tipa, kao što su pirit, pirhotin, arsenopirit, halkopirit, galenit itd. A od rudnih pojava oksidnog tipa to svojstvo imaju magnetit, piroluzit, hematit itd. Prirodno visoku elektronsku provodnost imaju i grafit, antracit, šungit, kao i neki drugi retki minerali.

Kako su u prirodnim uslovima minerali metala okruženi provlaženim sredinama, na njihovim granicama pojavljuje se efekat elektrolize prilikom prolaska jednosmerne struje koja se koristi kod istraživanja. Elektroliza je elektrohemijski proces suprotan spontanom procesu sopstvenog potencijala. Da bi se procesi oksido-redukcije, koji nisu spontani mogli odvijati, dovodi se električna energija koja se pretvara u hemijsku. Tu se s jedne strane nagomilava pozitivni, a na drugoj strani negativni jonski potencijal čineći dvostruki elektrolitički sloj, čija polarizacija zavisi od smera toka struje primarnog polja. Drugim rečima, stvara se zona jonske polarizacije između elektronskog i jonskog provodnika električne struje.

Na taj način akumulira se električni potencijal, kao da smo napunili neku prirodnu bateriju.

Po isključenju primarnog električnog polja (struja između A i B)<sup>19</sup> nagomilani jonski potencijal, kao prirodna baterija, počinje da se prazni formirajući opadajuće sekundarno električno polje (slika 84) koje traje neko vreme – od nekoliko milisekundi do desetine minuta, tako da na kraju iščezne. Taj izazvani potencijal (IP) meri se na prijemnim elektrodama M i N.



Slika 84. Merenje izazvanog potencijala nakon isključenja primarnog polja.

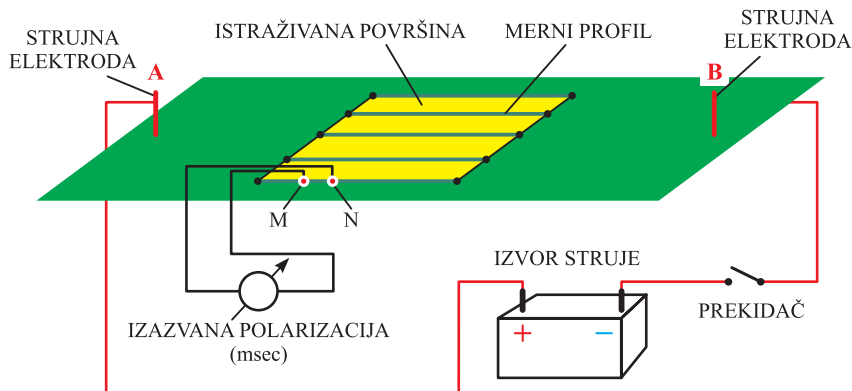
Merenje izazvane polarizacije može se izvoditi paralelno sa merenjem metodama sondiranja, kartiranja ili skeniranja<sup>20</sup>. Prvo se u tlo uvede struja i izmeri električna otpornost a onda, po isključenju struje, posle npr. 0,5 sekundi, meri se odziv sekundarnog polja ili izazvani potencijal. Odnos potencijala  $\Delta V_{IP} / \Delta V_P$  u procentima naziva se polarizovanost  $\eta$  i predstavlja osnovni pa-

<sup>19</sup> Videti poglavlje o električnim metodama.

<sup>20</sup> Isto.

rametar proučavanja metodom IP. U suštini, pri svim geofizičkim merenjima koja podrazumevaju uvođenje struje u tlo, uvek se pojavljuju efekti izazvanog potencijala, ali on se ne meri ukoliko za tim nema potrebe.

Merenje na terenu, u cilju detekcije struktura koje mogu dati efekte IP-a, obično se obavlja po profilima koji su međusobno paralelni. Po profilima se kreće pokretni par prijemnih elektroda M i N, a efekat polarizacije se izaziva kratkim impulsima jednosmerne struje (2, 4, 6, 8... sekundi), preko strujnih elektroda A i B koje su ukopane u tlo na dovoljnom rastojanju od istraživanog terena na kome se vrši merenje (slika 85).



Slika 85. Princip merenja izazvane polarizacije.

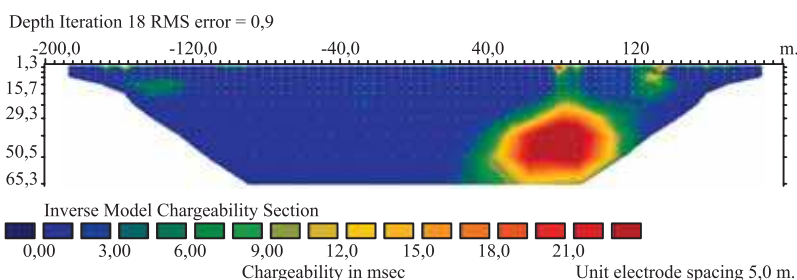
U nekim slučajevima primena metode IP-a može imati i izvesne prednosti u odnosu na primenu električne otpornosti jer niska otpornost ne mora uvek detektovati mineralizaciju.

Kod metode merenja izazvane polarizacije, u slučajevima interpretacije podataka u cilju dobijanja 2D modela, kao jedinična mera koristi se i izraz „Chargeability” (engl.) koji se izražava u milisekundama, što se može opisno prevesti kao vreme punjenja odnosno pražnjenja sekundarnog napona nastalog nagomilavanjem jonskog potencijala.

## PRIMER IZ PRAKSE BR. 10

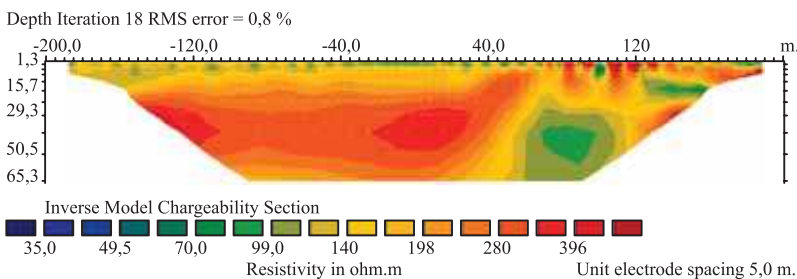
### KORELACIJA REZULTATA MERENJA PO PARAMETRIMA IZAZVANE POLARIZACIJE I ELEKTRIČNE OTPORNOSTI

Ovaj primer je objavljen od strane firme ABEM iz Švedske.<sup>21</sup> Merenja je obavio dr T. Dahlin sa LUND univerziteta u Švedskoj. Lokacija je Östra Ödarslöv u južnoj Švedskoj, a merenje po parametrima izazvane polarizacije i električne otpornosti izvedeno je iznad doleritskog intruziva (dajk) na istom profilu. Dajk je vertikalna forma magmatskog proboja prema površini terena. Vrh dajka je detektovan na 2D modelu od 70. do 110. metra po stacionaži, na dubini oko 25 metara, sa povećanim faktorom polarizacije, „chargeability” preko 15 msec (slika 86).



Slika 86. 2D model terena po parametru izazvane polarizacije, ABEM, Švedska.

Merenje po parametru električne otpornosti<sup>22</sup>, po istom profilu, prikazalo je dajk kao intruzivnu stenu relativno niske električne otpornosti, takođe na stacionaži 2D modela od 70. do 110. metra, na dubini oko 25. metara (slika 87).



Slika 87. 2D model terena po parametru električne otpornosti, ABEM, Švedska.

<sup>21</sup> <http://www.abem.se>.

<sup>22</sup> Isto.

Na osnovu korelacije podataka izazvane polarizacije i električne otpornosti, zaključeno je da dajk ima nisku otpornost zbog prisutne mineralizacije. Ta prisutna mineralizacija je stvorila anomaliju po parametru izazvane polarizacije. Na taj način je ostvarena izvanredna korelacija dve geofizičke metode.

Primena izazvane polarizacije može biti vrlo efikasna u arheologiji ukoliko se očekuje detekcija većih metalnih predmeta.



## PRIMENA GEOFIZIČKIH METODA U ARHEOMETALURGIJI

Baveći se arheometalurgijom arheolozi često sarađuju sa stručnjacima geološke i rudarske struke, tako da je eventualno angažovanje primenjene geofizike samo deo mogućeg doprinosa rešavanju date problematike. Ovom prilikom razmotrićemo mogućnosti primene geofizičkih metoda u cilju detekcije tragova rudarenja iz prošlosti. Ovakav pristup je inače znatno olakšan i zbog činjenice da su neke geofizičke metode stalno angažovane prilikom istraživanja mineralnih sirovina, a nekada se koristio i pojam „rudna geofizika”, koji je obuhvatao više metoda koje se i danas standardno koriste u tu svrhu.

Kako danas postoji interesovanje za arheološka istraživanja rudarenja i starih rudarskih radova vezanih za rude bakra, olova i gvožđa, odnosno u praistoriji, ovom prilikom predstavimo neke geofizičke metode koje mogu pomoći prilikom njihove detekcije. Takođe, s obzirom na primitivne tehničke mogućnosti vađenja rude u prošlosti, tragovi starog rudarenja uglavnom se nalaze pri površini terena, što bitno olakšava izvođenje geofizičkih istražnih postupaka.

Neki od osnovnih tipova starih radova su:

- Stari potkopi – otvarani su jednostavnim načinom, uglavnom čekićem i dletom. Kako je često moralo da se prolazi kroz jalovinu, korišćeno je loženje vatre na čelu gradilišta, pa kada bi se stena dovoljno zagrejala, polivana je vodom, tako da je pucala usled nagle promene temperature. Na taj način jalovina je brže iznošena i lakše se dolazilo do rudne supstance.

- Stara okna ili pinge – ostaci su rudarskih radova iz srednjovekovne rudarske delatnosti. Ovi radovi su bili najpogodniji jer se uz manji napor brzo dolazilo do rudne supstance. Okna su se međusobno povezivala radi ventilacije, transporta itd. Okna su imala dubinu od oko 50–60 metara, a njihova granična dubina najčešće je bila uslovljena nivoom podzemnih voda. Položaji okana su uglavnom bili diktirani prostornim pojavljivanjem rudne sirovine.

– Krivudavi niskopi – izvodili su se slično kao i okna, samo su im prostorne konture mnogo više saglasne s morfologijom rudnih tela. Krivudavi niskopi su izvođeni direktno s površine i pod manjim uglom išlo se direktno za rudom.

– Stari dnevni kopovi – na terenu se vrlo teško uočavaju, pošto su uglavnom zatrpani produktima površinske erozije.

– Nepravilne stare komore – zauzimaju u prostoru potpuno isti oblik kakav je imalo otkopano rudno telo. Bez obzira na otvoreni prostor, rudna materija je potpuno otkopana, tako da se na njenim zidovima retko mogu uočiti ostaci u vidu tankih slojeva mineralizacije. Stare komore su rađene iz potkopa, niskopa, okana ili direktno sa površine.

Tokom starog rudarenja, usled nedostatka znanja i adekvatne tehnologije, neke od danas korisnih sirovina (minerali metala i nemetala) predstavljale su jalovinu, pa su pri otkopavanju sa ostalim otpadnim materijalom bacane na haldišta. Takođe je, usled nedostatka tehničkih sredstava, obavljan i manji obim radova na ležištima u tvrdim kvarcnim stenama.

Na mestima eksploatacije rudnih pojava u prošlosti, danas su ostali tragovi nepravilnih kanala ili komora, koji su uglavnom zatrpani raspadnutim materijalima sa površine terena.

Kako su u prošlosti ljudi kamenim alatkama odvaljivali komade rude, sigurno nisu vadili i delove stena u koje je utisnuta sitnija mineralizacija usled pritisaka i visoke temperature magme u trenucima postanka. Upravo zbog toga, možemo zaključiti da su zidovi praistorijskih kanala ili komora dovoljno mineralizovani da mogu biti detektovani primenom neke od geofizičkih metoda.

Kao prva metoda koja se može koristiti, ako je u pitanju ležište magnetita, jeste merenje magnetizma. Izvodila bi se merenja vertikalne komponente magnetskog polja pomoću magnetometra. Magnetski susceptibilitet za magnetit je 5 700 a za pirhotin 3 200 cgs jedinica. Obično tlo ima 1,26, peščar ima oko 0,4, krečnjak do 3, diorit ima 120, a dacit 190 cgs jedinica ( $\times 10^{-3}$ ). Kao što se vidi, postoji više nego dovoljna razlika u susceptibilitetu prisutnih materijala da bi primena magnetometara bila uspešna prilikom detekcije zatrpanih rudarskih radova.

Druga metoda koja može biti primenjena je električno skeniranje u varijantama 2D ili 3D. Na osnovu pretpostavljene električne otpornosti okolne stene, koja može biti od 500 do 5 000 Ohmm, i rudnog kanala ili komore sa vlažnom sitnom ispunom, koja može biti reda veličine do 100 Ohmm, postoji dovoljna razlika u otpornostima da kanal bude detektovan u prostoru. A ukoliko uzmemo u obzir i prisutnu mineralizaciju koja je utisnuta u stenu – zidove kanala, sa električnom otpornošću manjom od nekoliko Ohmm, možemo biti sigurni u njegovu prostornu detekciju.



Treća metoda može biti merenje sopstvenog potencijala (SP-a) u cilju detekcije anomalijских zona koje se javljaju usled prisustva mineralizacije. Na taj način bi se posredno potvrdilo prisustvo rudnih kanala ili komora.<sup>23</sup>

Kao četvrta metoda može se primeniti merenje izazvane polarizacije (IP-a) u cilju detekcije mineralizacije koja je utisnuta u stene na zidovima rudnih kanala ili komora. Na taj način bi se takođe posredno potvrdilo prisustvo rudarskih radova.<sup>24</sup>

Kao primer moguće detekcije starog rudarenja i na osnovu objavljenih rezultata arheoloških istraživanja ranog eneolita na Rudnoj glavi u blizini Majdanpeka,<sup>25</sup> koja su obuhvatila rudna ležišta magnetita i halkopirita, predstaviceo vertikalni presek zapadnog profila zapadne platforme 4, sa pretpostavljenim (najverovatnijim) vrednostima električne otpornosti koje prisutni materijali, mineralizacija i stene mogu imati (slika 88).

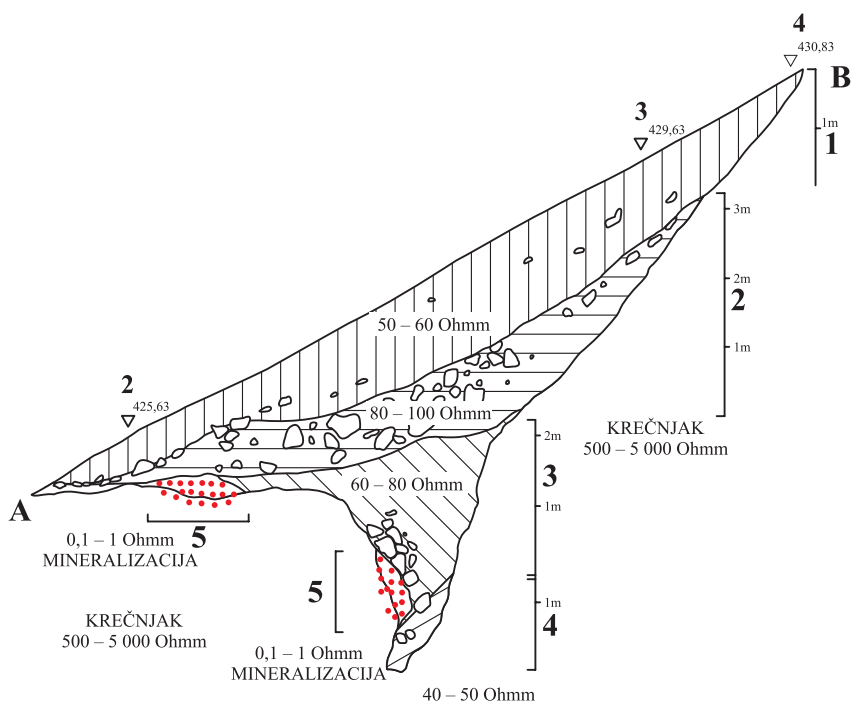
Zapadni profil na platformi 4 je karakteristični vertikalni presek koji je zatrpan raznim materijalima. Pri površini terena nalazi se humusni sloj (1), kome je dodeljena otpornost od 50 do 60 Ohmm. Ispod humusa nalazi se sloj nanesenog materijala sa krupnijim komadima kamena (2), kome je dodeljena otpornost od 80 do 100 Ohmm. Zatim sledi tamna ispuna sa krupnijim i sitnijim kamenom (3), koja bi trebalo da ima otpornost od 60 do 80 Ohmm. Na dnu se nalazi ispuna sivkaste, peskovite zemlje i isitnjenog kamena (4), sa najverovatnijom otpornošću od 40 do 50 Ohmm. Na preseku je prisutna i crvenkasta mineralizacija (5), koja može imati otpornost od 0,1 do 1 Ohmm. Okolna stena je najverovatnije krečnjak koji može imati otpornost od 500 pa i preko 5 000 Ohmm.

---

<sup>23</sup> Videti poglavlje o sopstvenom potencijalu.

<sup>24</sup> Videti poglavlje o izazvanoj polarizaciji.

<sup>25</sup> Borislav Jovanović, Rudna glava, najstarije rudarstvo bakra na Centralnom Balkanu, Bor-Beograd, 1982. god.



Slika 88. Zapadni profil zapadne platforme 4 (prema B. Jovanović, 1982) sa pretpostavljenim vrednostima električne otpornosti.

Sagledavanjem prostorne raspodele pretpostavljenih električnih otpornosti prisutnih materijala na primeru zapadne platforme sa Rudne glave, može se sa opravdanom sigurnošću očekivati da električne metode po parametru otpornosti mogu detektovati ostatke starog rudarenja.

## METODE TOMOGRAFIJE U ARHEOLOGIJI

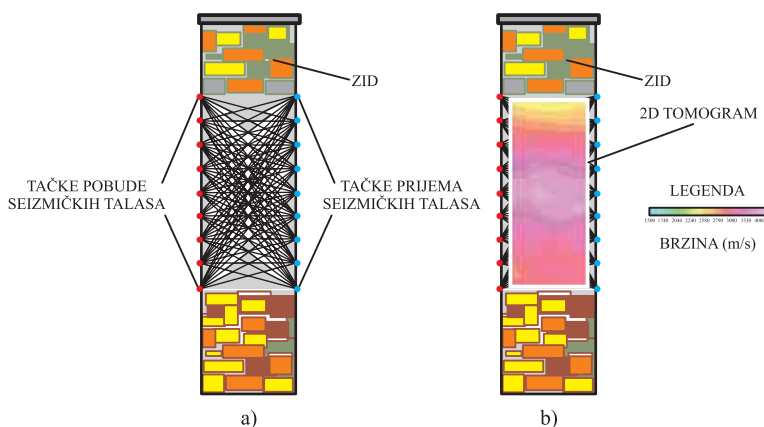
Detekcija metodama tomografije u arheologiji predstavlja način otkrivanja šupljina, prostorija, prisustva infiltrirane vode, stanja materijala i unutrašnje građe kod građevinskih objekata kao što su bedemi, kule i temelji raznih građevina i utvrđenja. Tomografija se koristi kod geofizičkih istraživanja i između bušotina koje mogu biti izbušene u tlu ili kroz građevinske objekte. Tomografsko istraživanje izvodi se u 2D ili 3D varijanti i zasniva se na primeni više fizičkih parametara od kojih su najznačajniji brzina seizmičkih elastičnih talasa i specifična električna otpornost.

Tomografska merenja i obrada podataka zasnivaju se na velikom broju merenja i izvode se pomoću kompjuterizovanih aparatura i specijalnih programa. Prilikom tomografskih merenja postavljaju se merne tačke (senzori, elektrode...) sa obe strane zida ili bedema kako bi se unutrašnja građa detaljno snimila. Pri tome se teži da se postavi što veći broj mernih tačaka kako bi se dobili što precizniji i detaljniji rezultati.



## SEIZMIČKA TOMOGRAFIJA

Kod seizmičke tomografije osnovni parametar je brzina seizmičkih elastičnih talasa. Osnovni princip metode je zasnovan na postavljanju većeg broja tačaka pobude i prijema elastičnih talasa oko istraživanog prostora, čime se postiže njegovo prozračivanje. Prozračivanje se praktično vrši tako da se iz svake tačke pobude ka svim tačkama prijema vrši merenje brzine talasa. Pri tome jedan pravac prozračivanja, od tačke pobude ka tački prijema, čini jedan zrak. Za detaljno istraživanje potrebno je da se istraživani prostor pokrije ravnomerno sa što većim brojem ukrštenih zraka odnosno pravaca (slika 89).



Slika 89. a) Princip tomografskog prozračivanja zida ili bedema;  
b) Rezultati prozračivanja – 2D tomogram po parametru brzine talasa.

Pri izvođenju seizmičke tomografije vrši se merenje vremena koje je potrebno da seizmički talas pređe put od tačke pobude do tačke prijema, i to za svaki od zraka odnosno pravaca. Pri postavljanju tačaka pobude i prijema potrebno je njihov prostorni položaj geodetski snimiti i odrediti njihove kote i koordinate u cilju dobijanja tačnih dužina putanja za svaki zrak posebno.

Tačku pobude predstavlja mesto gde se stvara seizmički talas. Pobuda se može izvesti ručno ili automatski pomoću nekog od elektromehaničkog generatora. Ručna pobuda se vrši pomoću čekića kojim udaramo u obeleženu tačku, a automatska pobuda je programski određena i s kontrolisanim impulsom oslobođene energije u vidu mehaničkog udara ili eksplozije električne varnice.

Tačke prijema predstavljaju postavljeni senzori koji imaju zadatak da registruju nailazak elastičnih talasa, tako što mehaničke oscilacije pretvaraju u električne i šalju ih u aparaturu – seizmograf koji ima veći broj radnih kanala (12, 24, 48 itd). Tomografska merenja se obavljaju tako da se za svaku tačku pobude snimaju vremena nailazaka elastičnih talasa na svim kanalima sa kojima raspolažemo.

Kada se kod registrovanih seizmičkih talasa pojave izvesne promene, brzine im se smanje, intenzitet oslabi itd., i ako višestruko ukrstimo seizmičke zrake sa takvim indikacijama, pomoću softverske obrade podataka dobićemo anomalijsku zonu koja ukazuje na unutrašnju strukturu građevinskog objekta, prisustvo šupljine, nehomogenosti na dvodimenzionalnom prikazu – 2D tomogramu.

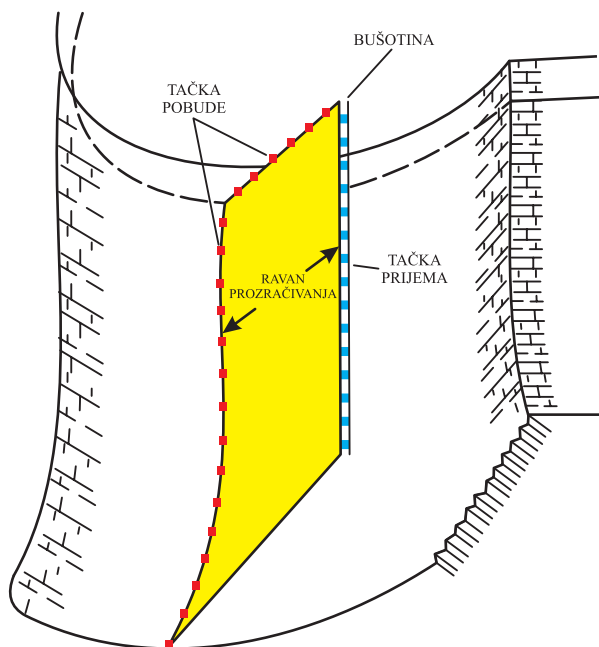
Prikupljanje seizmičkih tomografskih podataka podrazumeva mnogo-brojne kombinacije položaja izvora i prijemnika seizmičkih talasa u cilju ostvarivanja što boljeg prekrivanja istražnog prostora.

Na osnovu izloženog, može se zaključiti da seizmička tomografija može detaljno rekonstruisati sliku unutrašnje strukture građevinskog objekta na osnovu brzina seizmičkih talasa koji se prostiru kroz dati prostor sa geodetski snimljenim tačkama pobude i prijema. Rezultat seizmičke tomografije je dobijanje 2D ili 3D (dvodimenzionalnog ili trodimenzionalnog) modela distribucije brzina prostiranja seizmičkih talasa kroz građevinski objekat koji se prozračuje.

## PRIMER IZ PRAKSE BR. 11

### PRIMENA SEIZMIČKE TOMOGRAFIJE NA TVRĐAVI BUDIM

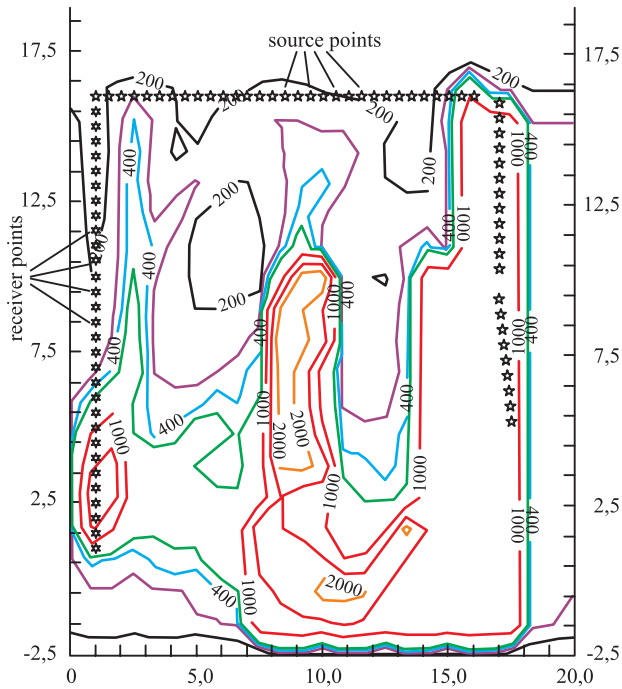
Na tvrđavi Budim u Mađarskoj izvedena su geofizička istraživanja kule Esztergomi Rondella, metodom seizmičke tomografije između bušotine i spoljne strane bedema. Cilj seizmičkog prozračivanja bila je detekcija položaja zapuštenih i zarušenih prostorija, prolaza u unutrašnjosti kule. U bušotini su bili smešteni prijemni senzori a po bedemu i duž zida bile su postavljene tačke pobude seizmičkih talasa (slika 90). Rastojanje između linije sa tačkama pobude i prijemnicima u bušotini bilo je oko 20 metara.<sup>26</sup>



Slika 90. Šematski prikaz seizmičke tomografije na Esztergomi Rondella, Budim, Mađarska.<sup>26</sup>

Na osnovu dobijenih rezultata metodom seizmičkog prozračivanja dobio je 2D tomogram po parametru brzina elastičnih talasa sa anomalijским zonama manjih i većih brzina elastičnih talasa. Anomalijske zone su predstavljene izolinijama (slika 91). Pri tome, zone manjih brzina najverovatnije odgovaraju prostorijama unutar kule (šupljinama), a veće brzine su najverovatnije indicirale položaje zidova od čvrstih materijala.

<sup>26</sup> Combined geophysical investigation on Buda Castle Hill, L. Hermann, M. Pattantyús-Á., Zs. Prónay, E. Törös, Eötvös Loránd Geophysical Institute, P. O. Box 35, Budapest, H-1440, Hungary. This paper was presented in the poster session at the 56th EAEG European Meeting in Vienna (Austria), June 6–10, 1994.



Slika 91. Seizmički 2D model tomografije između bušotine i spoljne strane bedema, Esztergomi Rondella, Budim, Mađarska.

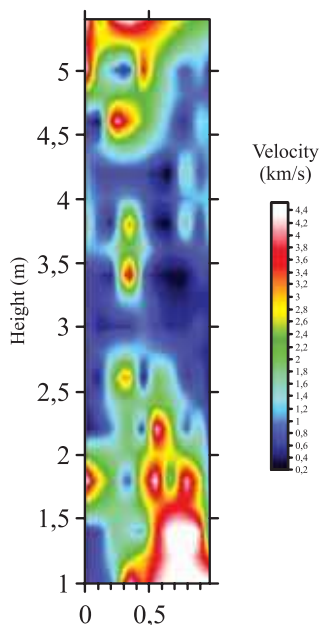
## PRIMER IZ PRAKSE BR. 12

### PRIMENA SEIZMIČKE TOMOGRAFIJE NA KATEDRALI LUCCA

Na katedrali Lucca u Toskani – Italija, koja je građena od XII do XV veka, pre nekoliko godina pojavili su se simptomi degradacije zidova sa unutrašnje strane portala usled infiltracije vode, tako da je njihova nosivost dovedena u pitanje a samim tim i statika cele građevine.<sup>27</sup> Kako bi se ustanovilo koji su delovi zidova bili najviše ugroženi, izvedena je 2D seizmička tomografija (slika 92).

<sup>27</sup> M. Marchisio, L. D. Onofrio, A. De Falco, L. Frediani, F. Guidoni, Dipartimento di Ingegneria Civile - Università di Pisa - Italy, „New tomographic techniques (micro-seismical and geoelectrical) for the non-destructive testing on masonry structures”, International Symposium (NDT-CE 2003) Non-destructive testing in Civil Engineering 2003.





Slika 92. Seizmička tomografija zida, katedrala Lucca u Toskani, Italija.

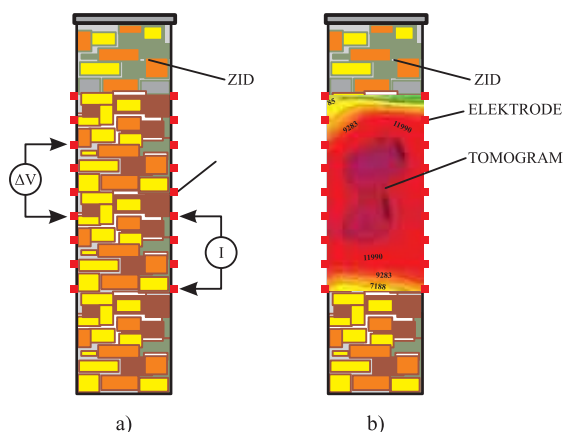
Kako se na tomografskoj 2D sekciji vidi, dobijene su brzine elastičnih talasa u rasponu od 0,2 do 4,4 km/s za zid. Pri tome su niske brzine, na legendi, označene plavim nijansama a visoke brzine od crvene ka belojoj boji. Niske brzine odgovaraju zonama zida degradiranim i potpuno omekšanim usled razarajućeg dejstva infiltrirane vode, dok su manji delovi zida ostali u boljem stanju. Pri tome se treba podsetiti da brzine seizmičkih talasa kod zidova sačinjenih od kamena i zdrave opeke mogu biti preko 3,5 km/s.

Na osnovu ovakvih istraživanja metodom seizmičke tomografije mogu se ustanoviti unutrašnja građa i stanje degradiranih zidova i preduzeti odgovarajuće mere hidrotehničke zaštite.



## ELEKTRIČNA TOMOGRAFIJA

Metoda tomografije po parametru električne otpornosti koju možemo primeniti na građevinskim objektima, kao i seizmička tomografija, ima za cilj utvrđivanje unutrašnje građe, prisustva šupljina, prostorija, nehomogenosti, provlaženih zona itd. po parametru specifične električne otpornosti. Merenja se izvode tako što se po spoljnim stranama objekta postavljaju nizovi strujnih i potencijalnih elektroda preko kojih se vrše merenja (slika 93a, videti poglavlje o električnom skeniranju). Postavljene elektrode se povezuju sa aparaturom – rezistivimetrom preko specijalnih višezilnih kablova.



Slika 93. a) Princip tomografskog merenja električne otpornosti;  
b) Rezultat merenja – 2D tomogram po parametru otpornosti.

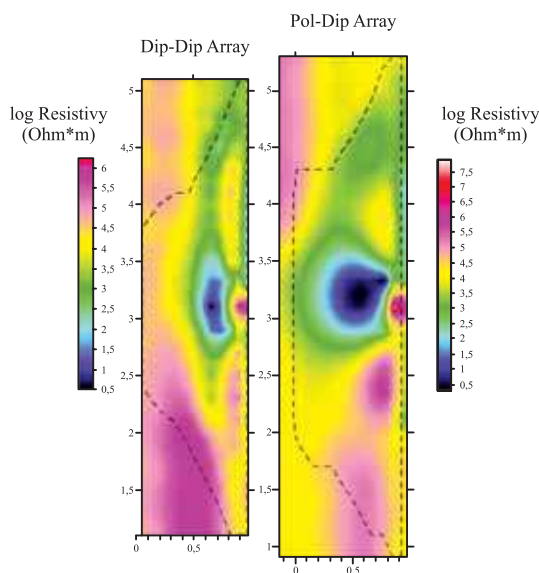
Za obavljanje merenja koriste se određeni protokoli odnosno kompjuterizovani programi po kojima se automatski biraju i uključuju elektrode u kontinualnom režimu merenja. Korišćeni elektrodni dispozitivi za ova merenja mogu biti npr. dipol-dipol, pol-dipol itd. Rezultati merenja električne tomogra-

fije predstavljaju se u vidu tomograma, odnosno 2D modela terena (po parametru specifične električne otpornosti) i to u ravni koju čine linijski postavljene elektrode sa jedne i druge strane zida (slika 93b).

## PRIMER IZ PRAKSE BR. 13

### PRIMENA TOMOGRAFIJE PO PARAMETRU ELEKTRIČNE OTPORNOSTI NA SREDNJEVEKOVNOJ GRAĐEVINI U VIKOPIZANU

Na spoljnom zidu stare srednjovekovne građevine od kamena u Vikopizanu, manjem gradiću pored Pize u Italiji, primećeni su znaci degradacije usled infiltracije vode. U cilju detekcije prostornog položaja zona koje su provlažene i koje su podložne degradaciji materijala, izvršena su električna tomografska merenja kroz zid visine 6,5 m i debljine 0,9 m (slika 94) po parametru električne otpornosti<sup>28</sup>.



Slika 94. a) Rezultat 2D tomografije provlaženog zida po parametru otpornosti, Vikopizano, Italija.

<sup>28</sup> Isto.

Merenja su obavljena sa dva elektrodna dispozitiva, dipol-dipol i pol-dipol u cilju poređenja dobijenih rezultata. Pri tome je ustanovljeno da u zidu postoji visoka koncentracija vlage, koja je uticala na njegovu degradaciju sa maksimalnom električnom otpornošću do 7-8 Ohmm. Na 2D tomogramu je takođe prisutna centralna anomalijaska zona (od svetloplave do tamnoplave nijanse,) koja najverovatnije predstavlja pravac glavne filtracije vode, sa otpornošću od oko 1 Ohmm.

Na osnovu rezultata tomografije po parametru električne tomografije izveden je projekat sanacije po kome su izvedene mere hidrotehničke zaštite kako bi se spomenik od velikog kulturnog značaja trajno zaštitio.

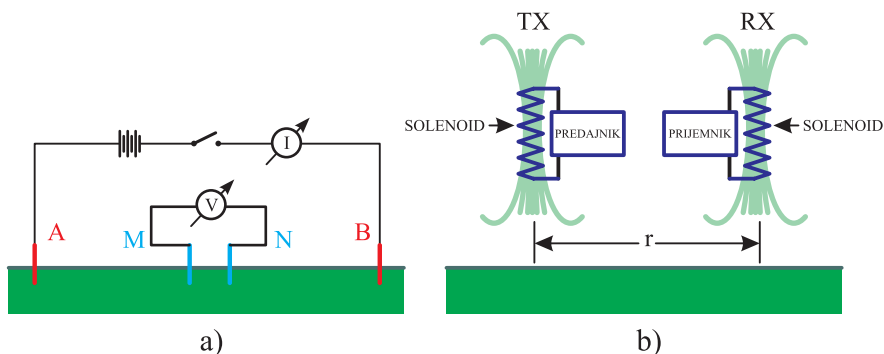


## ELEKTROMAGNETSKE METODE

U arheološkim istraživanjima se vrlo često primenjuju elektromagnetske metode (EM) pomoću kojih se utvrđuje prisustvo arheoloških ostataka ispod površine terena.

Elektromagnetske metode su vrlo brojne u geofizičkoj prospekciji iako su relativno složenije i kompleksnije. Prva primena elektromagnetskih metoda vezuje se za skandinavske zemlje tridesetih godina XX veka. Jedan od osnovnih razloga njihovog uvođenja u praksu bila je potreba istraživanja prostora ispod površine terena, koji je smrznut i pod ledom, nekim drugim načinom bez direktnog ukucavanja elektroda u tlo.

Polazeći od takve potrebe došlo se do ideje da se neki od standardnih električnih dispozitiva (slika 95a) sa napajanjem i merenjem putem ukucanih elektroda zameni ekvivalentnim elektromagnetskim mernim dispozitivom, korišćenjem dva kalema – solenoida, koji mogu stvoriti i meriti elektromagnetsko polje u prostoru ispod površine terena (slika 95b). Na taj način je ostvareno uvođenje električnih struja u prostor ispod površine terena, a sam način je zasnovan na principima elektromagnetskog prenosa – putem elektromagnetske indukcije.

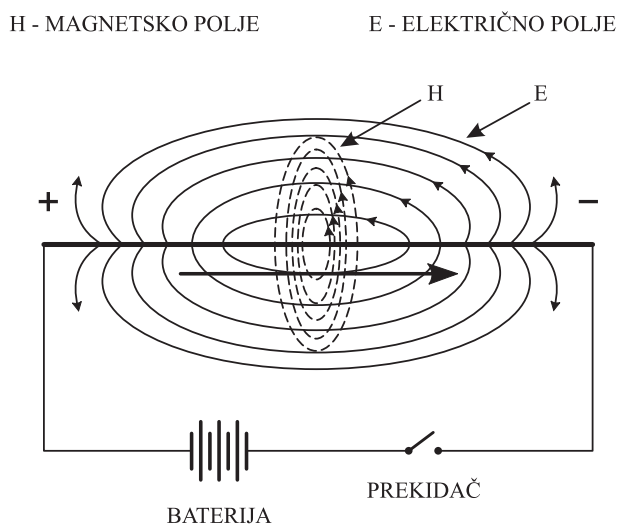


Slika 95. a) Električni merni dispozitiv;  
b) Ekvivalentni elektromagnetski merni dispozitiv.

Elektromagnetski merni dispozitiv čine dva solenoida koji se nalaze na konstantnom rastojanju  $r$ . Pomoću predajnog solenoida (TX) stvara se elektromagnetsko polje, a pomoću prijemnog (RX) vrše se merenja.

Kako je osnovni princip svih EM metoda uvođenje ili indukcija naizmeničnog elektromagnetskog polja u prostor ispod površine terena, razmotrićemo osnovne formiranja elektromagnetskog polja.

Ako pustimo struju da protiče kroz provodnik, oko njega će se formirati dva fizička polja, jedno je električno a drugo je magnetsko. Oba polja su u funkcionalnoj vezi, i njihovo stvaranje je vezano za protok električne struje kroz provodnik (slika 96). Električno polje može se predstaviti kao polje koje vlada između dve tačke duž provodnika koji je pod naponom ili između nekih površina koje su različito naelektrisane (kondenzator).



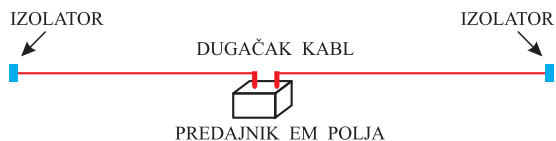
Slika 96. Provodnik i elektromagnetsko polje.

Magnetsko polje se stvara oko svakog provodnika kroz koji protiče električna struja. Magnetsko polje koje je nastalo usled proticanja jednosmerne struje, po smeru i jačini, je homogeno i konstantno. Pri tome su električno i magnetsko polje uvek pod uglom od  $90^\circ$ .

Ako kroz provodnik teče naizmenična struja, smer i jačina magnetskog polja će se menjati u taktu naizmenične struje.

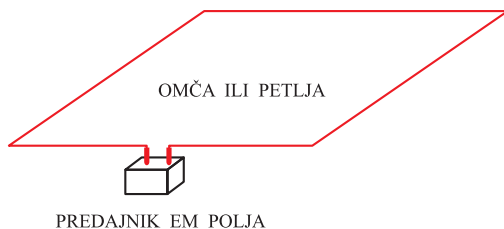
Prilikom primena EM metoda prostor ispod površine terena može se na više načina napajati elektromagnetskom energijom. Jedna varijanta je korišćenje dugackog kabela koji se kao antena priključuje na generator ili predajnik. Kabl ima funkciju da stvori i prenese EM polje u prostor ispod površine terena (slika 97).





Slika 97. Dugačak kabl kao predajnik EM polja.

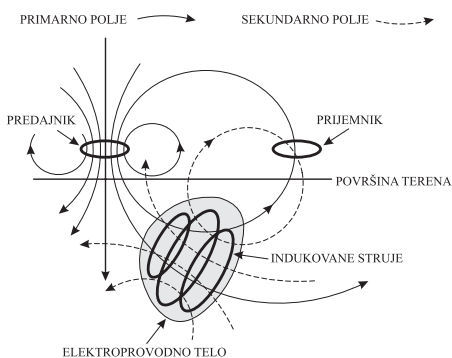
Kako je postavljanje dugačkog kabla na terenu problematično zbog velikih dimenzija, najčešće se koristi omča ili petlja koja u stvari predstavlja isti taj dugački kabl samo savijen u kvadratnu ili kružnu formu (slika 98).



Slika 98. Omča ili petlja kao predajnik EM polja.

U praksi se najčešće koriste omče ili petlje koje služe kako za emitovanje EM polja tako i za prijem sekundarnih polja.

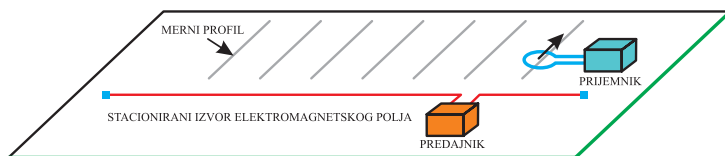
Elektromagnetsko prodiranje u prostor ispod površine terena sastoji se iz više prelaznih faza. Prva faza je prodiranje primarnog EM polja u prostor ispod površine i stvaranje vrtložnih – nestacionarnih struja u elektroprovodnom telu. Druga faza nastaje kao posledica kretanja vrtložnih struja u elektroprovodnom telu i stvara se elektromagnetsko polje oko njega. To elektromagnetsko polje nazivamo sekundarnim i detektujemo ga iznad površine terena pomoću prijemne omče ili petlje. Takođe, sekundarno polje se uvek javlja sa izvesnim kašnjenjem (fazni pomak) u odnosu na primarno elektromagnetsko polje (slika 99).



Slika 99. Primarno i sekundarno elektromagnetsko polje.

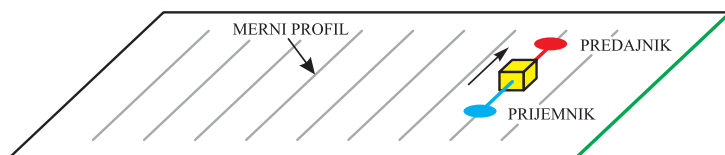
Ukoliko se ispod površine terena nalaze arheološki ostaci sa različitom provodnošću ili električnom otpornošću u odnosu na okolnu sredinu, javiće se sekundarna polja sa različitim kašnjenjem i različitom jačinom. Terenske aparature koje se koriste prilikom elektromagnetskih merenja funkcionišu tako da vrše merenja primarnog i sekundarnog EM polja, a onda ih sabiraju u cilju dobijanja rezultujućeg elektromagnetskog polja. Takođe se vrše i očitavanja kašnjenja sekundarnog polja u odnosu na primarno u vidu faznog pomaka (ili faznog ugla). Na taj način, dobijanjem anomalijских vrednosti rezultujućeg polja i faznog ugla može se locirati uzročnik anomalija odnosno objekat koji je cilj istraživanja.

U praksi postoji podela na dve grupe EM metoda koje se koriste po površini terena. Prva grupa je ona kod kojih je izvor elektromagnetskog polja stacionaran, a to može biti dugačak kabl ili petlja, dok se prijemnikom vrši merenje u pokretu po mernim profilima (slika 100).



Slika 100. Metode sa stacionarnim izvorom EM polja i pokretnim prijemnikom.

Druga grupa obuhvata metode koje se zasnivaju na merenjima pomoću pokretnih sistema. Pokretni sistemi imaju predajnik i prijemnik EM polja koji su smešteni na jednom zajedničkom nosaču sa definisanim međusobnim rastojanjem. Predajnik i prijemnik su smešteni na krajevima nosača koji ne sme biti sačinjen od metala. Takvim uređajima se može vršiti merenja po profilima – takozvano kartiranje terena, a metoda se zove dipolno elektromagnetsko kartiranje. Zove se dipolno kartiranje zbog prisustva dva pola – predajnika i prijemnika EM polja. Savremeni instrumenti za dipolno kartiranje poseduju digitalnu akviziciju merenih podataka, GPS i sa njima je moguće obaviti veliki broj merenja (slika 101).

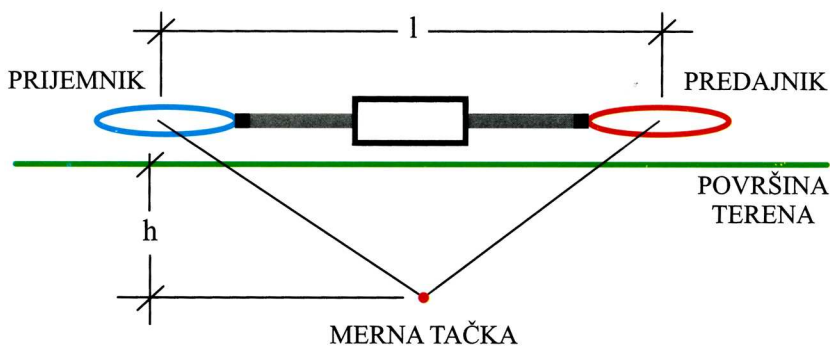


Slika 101. Metoda sa pokretnim sistemom za EM dipolno kartiranje.

Druge podele elektromagnetskih metoda mogu biti zasnovane na raznim oblicima korišćenog EM izvora, na merenjima pojedinih komponenti ili na načinu kretanja mernog sistema.

Metoda dipolnog EM kartiranja je brza metoda i koristi se u cilju dobijanja podataka o lateralnim (bočnim) promenama električne otpornosti ili elektroprovodnosti materijala ispod površine terena. Predajna i prijemna omča su na fiksnom rastojanju i zbog toga se električno kartiranje obavlja na konstantnoj dubini, koja zavisi od rastojanja između omči.

Merna tačka (ispod površine terena) nalazi se na dubini koja je približno jednaka polovini rastojanja između predajne i prijemne omče, na dubini  $h$ . Dubinski zahvat  $h$  računa se kao  $0,6 \times l$  za slučajeve horizontalno uslojenih, i  $1,5 \times l$  za slučajeve strmo nagnutih ili vertikalnih struktura – arheoloških ostataka koji se istražuju (slika 102).



Slika 102. Merna tačka u funkciji rastojanja između omči.

Finalni rezultati merenja elektromagnetskim kartiranjem predstavljaju se kvalitativno, zapažaju se promene po parametru električne otpornosti ili elektroprovodnosti, ali bez tumačenja dubine i geometrije uzročnika, jer se merenja obavljaju na samo jednom dubinskom nivou. Merni dispozitiv na terenu obično se kreće po unapred određenoj mreži profila.

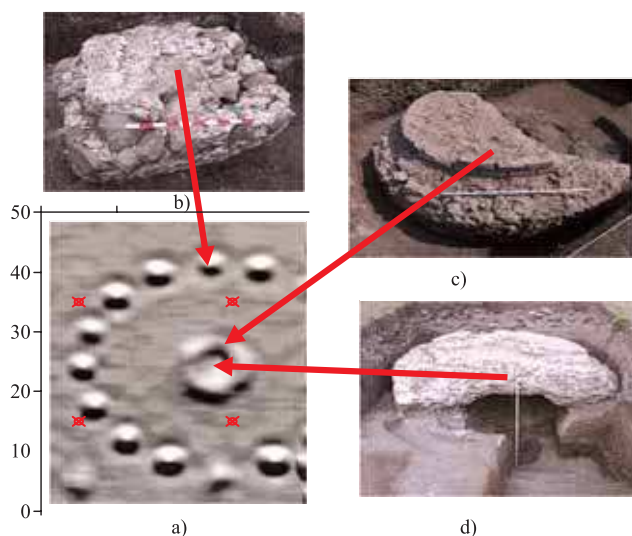
## PRIMER IZ PRAKSE BR. 14

### DIPOLNO ELEKTROMAGNETSKO KARTIRANJE NA ARHEOLOŠKOM LOKALITETU GAMZIGRAD

Tokom 2006. godine na arheološkom lokalitetu Gamzigrad, pored carske palate rimskog cara Galerija, izvršena su geofizička merenja dipolnim elektromagnetskim kartiranjem od strane Zavoda za geofiziku Lorenc iz Berlina (Büro für Geophysik Lorenz, Berlin), kojima je rukovodio prof. dr T. Schüler iz Jene (Universität Jena). Merenja su izvršena aparaturom GEM 300 američke proizvodnje po paralelnim profilima na rastojanju od 0,5 m i na tačkama na svakih 0,5 m.

Predajni prijemni element kod GEM 300 se nalaze na  $L = 1,3$  m, što je omogućilo merenje do dubine nešto oko pola metra. Merni parametar je relativna elektroprovodnost a jedinica je mS/m (milisimens po metru).

Dipolnim elektromagnetskim kartiranjem, na frekvencijama od 825 i 3825 Hz, dobijena je karta sa manjim kružnim anomalijama raspoređenim u skoro pravilnoj kružnici i sa znatno većom anomalijom takođe kružnog oblika u centru (slika 103).<sup>29</sup>



Slika 103. Rezultati dipolnog kartiranja i iskopavanja:  
a) karta dipolnog kartiranja dipolnog elektromagnetskog kartiranja; b) ostatak stuba (manje anomalija); c, d) ostaci kružne građevine sa kriptom (centralna anomalija), Gamzigrad, lokalitet Felix Romuliana.<sup>29</sup>

<sup>29</sup> Bülow, G. v., Schüler, T., Geophysical and archaeological research at Gamzigrad – Report of the 2004–2007 campaigns, *Старинар* LVII (2007), Beograd 2009, 231–249.



Slika 104. Aparatura GEM 300.

## PRIMER IZ PRAKSE BR. 15

### KORELACIJA REZULTATA MERENJA ELEKTROMAGNETSKOG DIPOLNOG KARTIRANJA I ELEKTRIČNOG SKENIRANJA NA ARHEOLOŠKOM LOKALITETU GAMZIGRAD

Na arheološkom lokalitetu Gamzigrad, van bedema carske palate Felix Romuliana, sredinom avgusta 2007. godine izvedena su geofizička merenja metodom električnog skeniranja metodom specifične električne otpornosti – SEO duž jednog profila postavljenog u domenu anomalijских zona koje su dobijene geofizičkim merenjima metodama magnetometrije i dipolnim elektromagnetskim kartiranjem od strane arheološke ekipe iz Nemačke.<sup>30</sup> Anomalije dobijene od strane nemačkih geofizičara imaju kružnu formu, sastoje se od spoljnog prstenastog dela sa 11 manjih i centralne veće anomalije.

Profil geoelektričnog skeniranja A–B postavljen je tako da seče manju i veću anomaliju sa ciljem da se dobiju i potvrde informacije o dubini zaleganja i prečniku arheološkog objekta koji je indiciran metodom merenja magnetizma i elektromagnetskim dipolnim kartiranjem (slika 31).

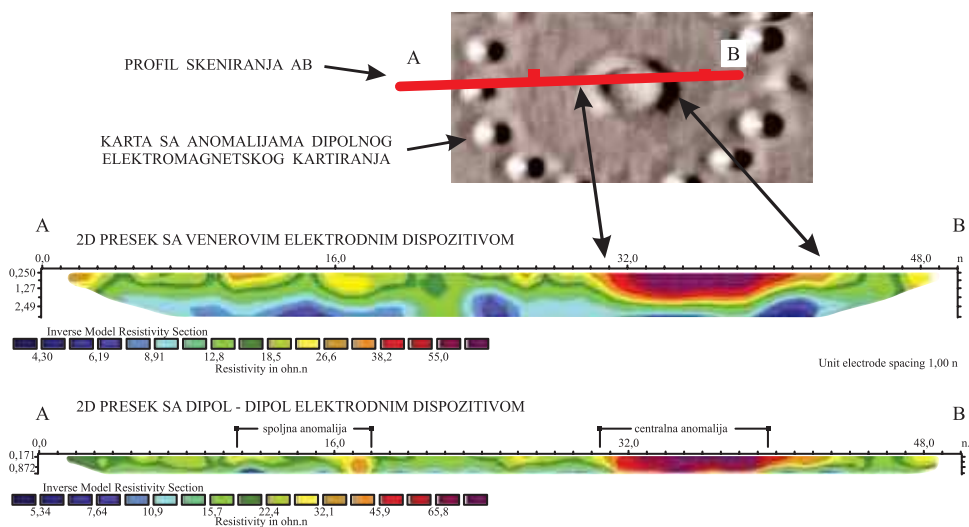
Po profilu A–B izvršeno je merenje sa dva elektrodna dispozitiva, Venerovim i Dipol-Dipolom tako da je izvršena korelacija svih dobijenih rezultata merenja (slika 105).

Na osnovu dobijenih podataka po profilu skeniranja na stacionaži preseka od 31. do 39. metra indicirana je anomalijска zona sa većom električnom otpornošću, preko 80 Ohmm, sa dubinom zaleganja od 1,2 do 1,3 metra. Ova zona predstavlja ostatke većeg građevinskog objekta koji praktično izlazi na površinu terena a pripada centralnoj kružnoj anomaliji dobijenoj magnetometrijom i elektromagnetskim kartiranjem.

<sup>30</sup> Nепубликовано; merenje obavio M. Vukadinović, dokumentacija Arheološkog instituta.

Duž profila skeniranja detektovano je prisustvo rasutog građevinskog materijala od 11. do 18. metra, a manja anomalija po parametru električne otpornosti je detektovana od 16. do 18. metra i verovatno predstavlja ostatke manjeg građevinskog objekta. Pozicija anomalije dobijene električnim skeniranjem odgovara pozicijama manjih i kružnih anomalijskih zona dobijenih magnetometrijom i dipolnim elektromagnetskim kartiranjem.

Na bazi korelacije rezultata merenja dobijenih pomoću više metoda može se zaključiti da geofizička merenja po parametrima električne otpornosti, električne provodnosti i namagnetisanosti određenih materijala mogu u pojedinim slučajevima biti vrlo korelativna i vrlo korisna. U ovom slučaju bitan podatak koji je električno skeniranje dalo, za razliku od drugih pomenutih metoda, jeste dubina do koje se prostiru građevinski objekti.



Slika 105. Korelacija rezultata elektromagnetskih<sup>31</sup> i električnih merenja skeniranjem<sup>32</sup>, Gamzigrad, Felix Romuliana.

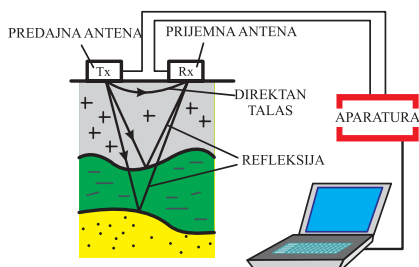
<sup>31</sup> Bülow, G. v., Schüler, T., Geophysical and archaeological research at Gamzigrad – Report of the 2004–2007 campaigns, *Сйаринар* LVII (2007), Beograd 2009, 231–249.

<sup>32</sup> Nepublikovano; merenje obavio M. Vukadinović, dokumentacija Arheološkog instituta.

## METODA GEORADARA

Georadar je instrument koji radi na istim principima kao i standardni radarski uređaj koji se koristi prilikom praćenja aviona, brodova itd. Kod standardnih radara princip rada se zasniva na emitovanju usmerenog snopa elektromagnetskih talasa koji putuje do nekog objekta, od njega se reflektuje i vraća se nazad. Pri tome, na osnovu pojave reflektovanog talasa konstatuje se da je objekat prostorno detektovan, a na osnovu pređenog puta talasa do objekta i nazad, računa se daljina do njega. Kod georadara razlika je uglavnom u antenskim konstrukcijama jer se zračenje usmerava u prostor ispod površine terena, zatim u snazi emitovanja elektromagnetskih talasa i načinu prikazivanja rezultata. Georadar se uglavnom koristi za detekciju na malim dubinama i poseduje visoku rezoluciju pri merenjima.

Georadar je nastao paralelno sa razvojem sličnih uređaja koji se koriste u građevinarstvu, putarstvu, prilikom lociranja zakopanih predmeta itd. U građevinarstvu<sup>33</sup>, instrumentima zasnovanim na principu radara, vrši se detekcija nehomogenosti u betonskim konstrukcijama (aerodromske piste), zidovima itd. Takođe, takvim instrumentima u raznim materijalima moguće je detektovati šupljine, metalnu armaturu, plitko ukopane metalne cevi, a ovi instrumenti koriste se često i u arheologiji.



Slika 106. Osnovni princip funkcionisanja georadara.

Radarski sistem za terensku upotrebu u arheologiji sastoji se od predajnika i prijemnika visoke frekvencije, predajne i prijemne antene i aparature za beleženje dobijenih podataka (slika 106).

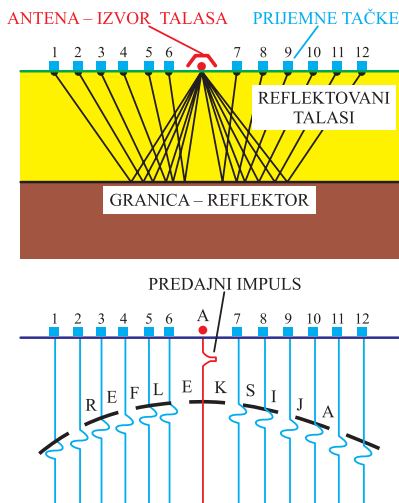
<sup>33</sup> M. Vukadinović, R. Vasić, Primena georadara na putevima, u geotehnici i kontroli masivnih konstrukcija, Građevinski kalendar 2001. god., 132–154 str. Savez građevinskih inženjera i tehničara Jugoslavije – Beograd.

Radarski signal iz predajne antene prilikom prodiranja u materijale ispod površine terena prelazi određeni put, nailazi na objekat od koga se odbija i vraća se na površinu do prijemne antene. Dubina  $d$  neke strukture od koje se radarski signal odbio je:

$$d = \frac{t}{2} \cdot v$$

gde je  $t$  ukupno vreme koje je potrebno impulsu da pređe put od predajne antene do strukture koja ga je reflektovala i da se vrati do prijemne antene. Oznaka  $v$  predstavlja brzinu elektromagnetskog impulsa u datim uslovima. Ako znamo brzinu  $v$ , uz izmereno vreme  $t$ , lako i jednostavno dobijamo traženu dubinu  $d$ , gde je nastala refleksija.

Ukoliko iz predajne antene, koja je u sredini linije mernog profila sa prijemnim tačkama (slika 107), uputimo radarski impuls u tlo, i ukoliko postoji granica između različitih sredina ili reflektor, talasi će se odbiti i stizati sa odgovarajućim kašnjenjem. To kašnjenje će biti sve veće prema daljima tačkama prijema, a snimljena indikacija (refleksija) na zapisu – radargramu biće u vidu hiperbole sa temenom nagore. Prilikom radarskih merenja najčešće dobijani oblik refleksija od detektovanih objekata ispod površine terena je hiperboličnog tipa.



Slika 107. Osnovni princip refleksije radarskih elektromagnetskih talasa.

Da bi se radarski impuls odbio od neke strukture – objekta koji se nalazi ispod površine terena, potrebno je da bude ostvaren još jedan važan i neo-



phodan uslov. Taj uslov je da postoji dovoljna razlika ili odgovarajući kontrast u materijalima po parametru dielektrične konstante između zakopanog objekta i sredine koja ga okružuje. Dielektrična konstanta je parametar koji predstavlja sposobnost materijala da u sebi akumulira električno polje odgovarajućeg intenziteta. Inače kod materijala koji su dielektrici nema slobodnih elektrona i oni važe za izolatore. Na tabeli 6 dat je spisak materijala, dielektrične konstante i brzine prostiranja radarskih talasa. Brzina se izražava u jedinici m/ns (metar u nanosekundi).

Sredina – materijal	Dielektrična konstanta	Brzina talasa (m/ns)
Vazduh	1	0,3
Voda	81	0,33
Granit	9	0,1
Krečnjak	6	0,12
Peščar	4	0,15
Razne stene	4 – 12	0,15 – 0,087
Suvi pesak	4 – 6	0,15 – 0,12
Mokri pesak	30	0,055
Suva glina	8	0,11
Mokra glina	33	0,52
Suvo tlo	3 – 8	0,17 – 0,11
Mokro tlo	4 – 40	0,15 – 0,047
Asfalt	3 – 6	0,17 – 0,087
Beton	9 – 12	0,10 – 0,087

Tabela 6. Materijali, dielektrične konstante i brzine talasa.

Kako je već rečeno, da bismo uočili prisustvo nekog objekta ispod površine terena, moraju postojati odgovarajući uslovi kao što su neophodne razlike po parametru dielektrične konstante da bi se traženi objekat detektovao odgovarajućom refleksijom i potvrdio time svoje prisustvo. U protivnom slučaju, može da se desi da u suvom pesku, na primer, na dubini od par centimetara georadar na može da detektuje objekat od kamena jer su dielektrične konstante suvog peska i kamena skoro identične.

U tabeli 7 navedeni su slučajevi dobrih i loših sredina za metodu georadara.

Dobra sredina	Loša sredina
Suva so	Slana voda
Sneg	Metali
Led i čista voda	Glina
Treset	Tlo bogato glinom
Mokar i suvi pesak	Elektroprovodni minerali
Suva homogena stena	

Tabela 7. Dobre i loše sredine za primenu georadara.

Za pravilnu interpretaciju podataka dobijenih metodom georadara, potrebno je znati da se kod geoloških formacija – stena, brzine prostiranja georadarskih signala frekvencije od 100 Mhz, kreću od 0,06 do 0,175 m/ns (metar u nanosekundi). Shodno prikazanom, najbolje su refleksije od vode i od granice između suvog i mokrog peska.

Dubina prodiranja radarskog talasa zavisi i od elektroprovodnosti odnosno od električne otpornosti prisutnih materijala. Ukoliko je električna otpornost materijala niska, imaćemo malu dubinu prodiranja radarskog talasa. Iz anglosaksonske literature predstavljamo skraćenu formulu za računanje mogućeg dubinskog zahvata metodom georadara pri frekvenciji od 100 Mhz. Dubina  $d$  se računa u metrima i dobija se kada se električna otpornost  $\rho$  ( $\rho$ ) u Ohmm (om-metar ili  $\Omega m$ ) podeli sa brojem 30.

$$d[m] = \frac{\rho[\Omega m]}{30}$$

Da bismo sračunali mogući dubinski zahvat po navedenoj formuli, potrebno je poznavati električne otpornosti za prisutne geološke sredine. U tabeli 8 date su električne otpornosti za neke od materijala koji se najčešće sreću u praksi.

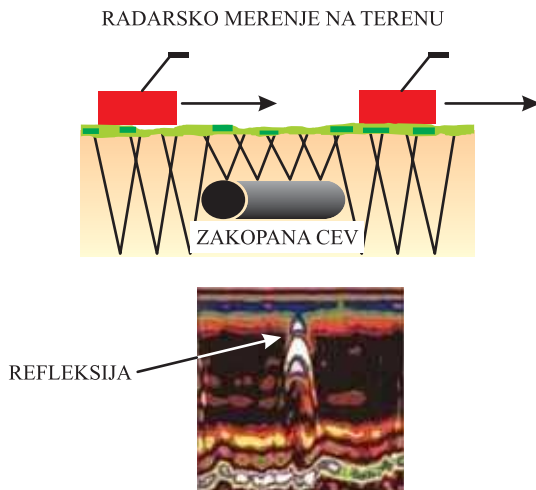
Geološka sredina	Električna otpornost ( $\Omega m$ )
Granit	1 000 – 10 000
Škriljci	200 – 3 000
Peščar	300 – 10 000
Krečnjak	300 – 1 000
Laporoviti krečnjak	30 – 60
Lapori i laporci	20 – 100

Glinoviti peščari	50 – 300
Glina	10 – 25
Pesak suv	100 – 200
Pesak mokar	40 – 60
Šljunak suv	800 – 1 000
Šljunak sa vodom	80 – 120
Šumski humus	50 – 60

Tabela 8. Geološke sredine i njihove električne otpornosti.

Kod georadarskih sistema najčešće se koriste frekvencije od 80, 100, 250, 500, 1 000 ili 15 00 Mhz. Korišćenjem nižih frekvencija, npr. od 100 Mhz možemo ostvariti veći dubinski zahvat, dok primenom frekvencija od 250, 500 ili 1 000 Mhz, ostvarujemo manju dubinu istraživanja ali imamo i veću rezolutivnost.

Terenska merenja metodom georadara se izvode kretanjem antenskih sistema duž postavljenih profila (slika 108). Ukoliko se ispod površine terena nalazi zakopana metalna cev, dobićemo karakterističnu hiperboličnu refleksiju. Profili treba da budu geodetski snimljeni kako bismo na osnovu dobijenih rezultata, mogli tačno da nanesimo detektovane zakopane objekte na situacionu kartu.



Slika 108. Merenje georadarom i rezultat snimanja – radargram, reklama GPR Geophysical Services.

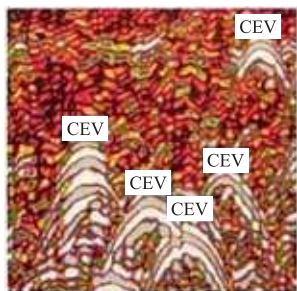
Georadarska merenja je moguće izvoditi pomoću dve vrste antena. Prva vrsta je takozvana monostatična, a druga je bistatična. Monostatični sistem je

konstrukciono rešenje gde se i prijemna i predajna antena nalaze u istom kućištu. Bistatični sistem podrazumeva da se i predajna i prijemna antena nalaze u posebnim kućištima. Kod bistatičnih antena moguće je raditi i sa nižim frekvencijama u cilju dobijanja većeg dubinskog zahvata.

## PRIMER IZ PRAKSE BR. 16

### ISTRAŽIVANJE PODZEMNIH – PLITKO UKOPANIH INSTALACIJA METODOM GEORADARA

Najbolji primer georadarskog snimanja su jasne i prepoznatljive indikacije o prisutnosti metalnih cevi u vidu hiperboličnih refleksija sa dosta strmim formama (slika 109)<sup>34</sup>.



Slika 109. Hiperbolične refleksije od zakopanih cevi, dokumentacija GSSI.

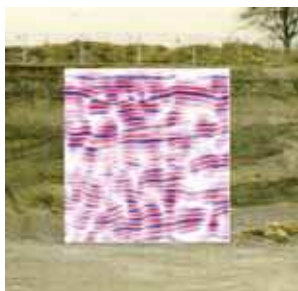
Rad na terenu sa georadarskim uređajem podrazumeva kretanje operatera zajedno sa antenskim sistemom uz kontinualno beleženje odnosno snimanje refleksija od struktura ispod površine terena (slika 110).



Slika 110. Rad na terenu georadarom, dokumentacija GSSI.

<sup>34</sup> <http://www.geophysical.com>, GSSI – Geophysical Survey System Inc.

Na sledećem primeru vidi se rezultat primene metode georadara prilikom detekcije šljunkovitih slojeva tokom geoloških istraživanja. Vertikalni odsek terena je upoređen sa radargramom koji je snimljen po profilu koji je postavljen u neposrednoj blizini na platou (slika 111).



Slika 111. Detekcija slojeva šljunka, dokumentacija GSSI.

Vidi se da su linije u boji na radargramu saglasne po svom položaju sa pružanjem i granicama između geoloških sredina, što je dokaz o visoko ostvarenoj rezoluciji merenja.

Interesantan primer iz građevinske prakse je detekcija armature u betonu, koja je izvedena aparaturom proizvođača GSSI.<sup>35</sup> Pre betoniranja fotografisana je gvozdена armatura (slika 112).



Slika 112. Gvozdена armatura pre betoniranja, dokumentacija GSSI.

Nakon betoniranja, izvedeno je merenje radarskim sistemom i dobijen je radargram<sup>36</sup> na kome se vidi prisustvo armature kao dokaz o visoko ostvarenoj rezoluciji i mogućnostima detekcije armature i njenog stanja u betonskim konstrukcijama (slika 113).



Slika 113. Radargram armature snimljene u betonskoj konstrukciji, dokumentacija GSSI.

---

<sup>35</sup> Isto.

<sup>36</sup> Isto.



## METODE GEOFIZIČKOG KAROTAŽA U ARHEOLOGIJI

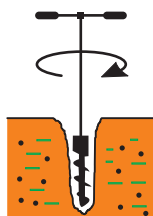
Važno mesto u savremenim geofizičkim istraživanjima imaju metode koje se sprovode u bušotinama u cilju merenja pojedinih fizičkih parametara. U bušotinama se najčešće izvode merenja otpornosti, brzine seizmičkih talasa, temperature, prirodne radioaktivnosti, brzine kretanja fluida, prečnika itd. Sva merenja koja geofizika može izvesti u bušotinama nazivaju se karotažnim merenjima. Karotažna merenja se obavljaju celom dužinom ili na pojedinim delovima u bušotinama.

Shodno izloženom, tehnika izvođenja geofizičkog karotaža predstavlja unošenje i lagano kretanje specijalnih instrumenata (karotažnih sondi) duž bušotina. Na bušotinskim sondama nalaze se senzori i elektrode pomoću kojih se vrši istovremeno registrovanje više fizičkih parametara. Prilikom takvih merenja dobijaju se karotažni dijagrami, koji su u neposrednoj vezi sa parametrima okružujuće sredine.

Karotažna merenja u arheologiji se mogu izvoditi u cilju rešavanja problema prilikom identifikacije i preciziranja položaja kulturnih slojeva između bušotina, lokalizacije ostataka građevinskih objekata i dopune podataka o praznim intervalima koji se javljaju tokom arheoloških površinskih istraživanja. Takođe bi se tom prilikom mogli dobiti i podaci o okolnim geološkim sredinama. Karotažna merenja podrazumevaju istovremeno opažanje više parametara bušotinskom sondom, uz obaveznu identifikaciju dužine odnosno dubine koji sonda pređe.

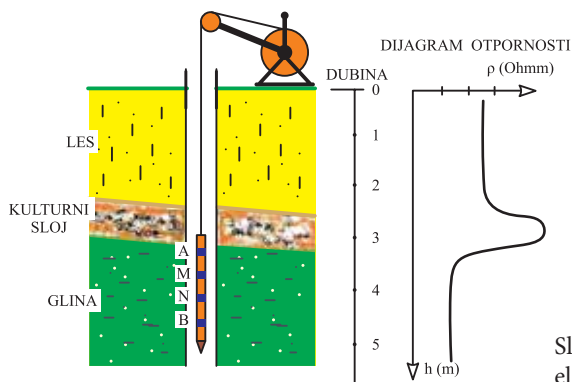
Bušenje i vađenje uzoraka materijala sa određene dubine može se obavljati specijalnom bušotinskom burgijom (slika 114). Bušenje se ručno može vršiti uglavnom kroz rastresite i slabo vezane materijale i odvija se u intervalima čija dužina zavisi od tvrdoće materijala. Interval bušenja kod materijala koji je suv i rastresit trebalo bi da bude kraći, a kod mekših materijala kao što je les, interval bušenja bi mogao da bude i tri puta duži. Prilikom bušenja u bur-

giju ulazi materijal koji, nakon vađenja pribora na površinu, možemo pregledati, fotografisati i smestiti u posebnu kutiju za kasniju analizu. Ukoliko se, na osnovu arheoloških pokazatelja, rasporedi dovoljan broj bušotina, karotažnim merenjima možemo precizno i bez otvaranja arheološke sonde da ustanovimo prisustvo kulturnih slojeva i njihovu stratigrafiju.



Slika 114. Princip izvođenja bušenja ručnom burgijom.

Električni karotaž u bušotinama može se izvoditi sondom na kojoj su elektrode na kraćim rastojanjima nego na standardnim, zbog potrebe da se što preciznije definišu granice ili debljine kulturnih slojeva. Koristeći konfiguraciju sa elektrodnom rasporedom AMNB<sup>37</sup> praktično se izvodi električno kartiranje zida bušotine po parametru električne otpornosti (slika 115). Sonda se prvo spusti na dno bušotine pomoću specijalnog samonosećeg kabla i onda se polako izvlači nagore uz kontinualno merenje. Pri tome se meri i pređena metraža sonde kroz bušotinu u cilju uspostavljanja korelacije sa izmerenim vrednostima električne otpornosti. Desno od prikaza bušotine predstavljen je dijagram električne otpornosti u funkciji dubine.

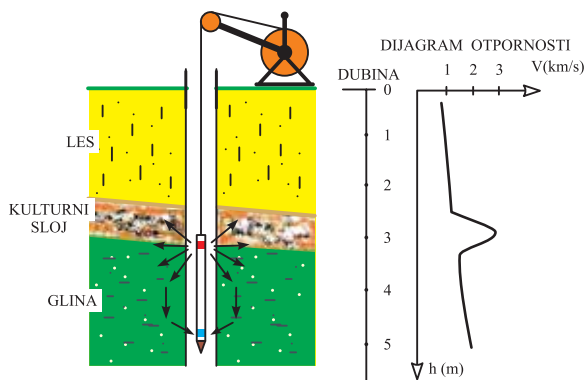


Slika 115. Princip merenja električne otpornosti u bušotinama.

<sup>37</sup> Videti poglavlje o električnim merenjima.



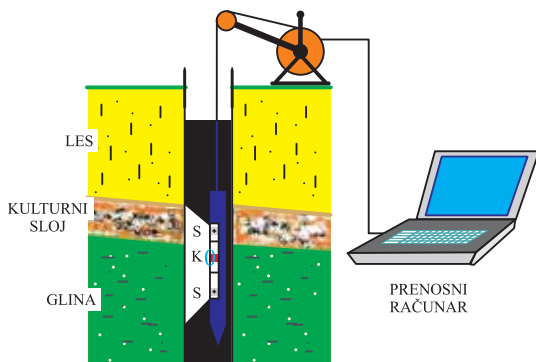
Seizmičkim karotažem mogu se meriti brzine prostiranja seizmičkih elastičnih talasa vezanih za prisutne materijale ili slojeve kroz koje je bušotina izbušena. Merenja se izvode pomoću specijalnih bušotinskih sonde. Najjednostavniji način merenja je sondom na čijem telu se nalaze i izvor i prijemnik elastičnih talasa (slika 116).



Slika 116. Princip merenja brzina elastičnih talasa u bušotinama.

Sonda svojim kretanjem prolazi pored raznih materijala i registruje brzine talasa kroz njih. Pri tome su izvor (pobuda) i prijemnik smešteni na krajevima korpusa sonde, a merna tačka, gde se pripisuju merenja, smeštena je na sredini rastojanja između njih.

Ne treba pri tome zaboraviti ni metodu snimanja bušotinskom video-kamerom. Bušotinska video-sonda je relativno jednostavan instrument, u hermetički zatvorenom cilindru nalazi se kamera (k), koja kroz providni segment snima bočno i izvor svetla (s), koji obezbeđuje dovoljno osvetljavanje zidova bušotine i kroz vodu, kako bi se uočili materijali i detalji od arheološkog značaja (slika 117). Kamera mora da ima takve optičke karakteristike da ne izobličava dobijenu sliku.



Slika 117. Princip merenja video-kamerom u bušotinama.

Spuštanjem, podizanjem i okretanjem video-sonde oko njene ose može se pratiti i snimati stanje i prisustvo materijala kroz koje je bušotina prošla, na prenosnom računaru preko specijalnog kabla smeštenog na motalicu. Ukoliko je potrebno, podaci snimanja se mogu sačuvati u posebnoj datoteci za kasniju analizu i kao dokumentacioni materijal.

## PRIMER IZ PRAKSE BR. 17

### BUŠENJE RUČNOM BURGIJOM NA LOKALITETU KALE – KRŠEVICA

Tokom 2010. god. na arheološkom lokalitetu Kale – Krševica vršeno je bušenje ručnom bušilicom u cilju utvrđivanja položaja prostornog pružanja zidova na delu lokaliteta koji još nije obuhvaćen iskopavanjem (slika 118).



Slika 118. Bušenje ručnom bušilicom na lokalitetu Kale – Krševica.



Slika 119. Svrđlo.  
Slika 120. Bušotine.

Ručna bušilica koja je korišćena sastoji se od svrdla (slika 119) i članaka koji se nastavljaju jedan na drugi. Bušotine su izvođene na rastojanju oko 1 metar po profilima (slika 120).

## PROSTORNA ORIJENTACIJA NA TERENU

U ovom poglavlju biće predstavljeni neki osnovni pojmovi o terenu i prostornoj orijentaciji koji mogu biti korisni u arheološkoj praksi, naročito kod rekognosciranja.

Teren ili zemljište je određeni deo zemljine površine sa reljefom, prirodnim i veštačkim objektima koji se na njemu nalaze.

Reljef je zbir svih prirodnih uzvišenja, udubljenja i ravnih delova, a sve ostalo su razni objekti koji su nastali delovanjem čoveka. Reljefni oblici mogu biti izdignuti, zaravljani i udubljeni. Kod izdignutih oblika razlikujemo: teme, vrh, ivicu, padinu i podnožje.

Preglednost terena je mogućnost opažanja topografskih orijentira, a zavisi od vrste i osobina veštačkih i prirodnih smetnji koje nam zatvaraju vidno polje. Razlikujemo pregledan, polupregledan i nepregledan teren. Na preglednost terena najviše utiču uzvišenja i rastinje.

Prohodnost terena je stepen dostupnosti i mogućnosti kretanja po njemu. Ukoliko je mreža saobraćajnica gusta, prohodnost je veća.

Prema bitnim karakteristikama, razlikujemo ravničarske, planinske, močvarne i kraške terene. Poseban problem je orijentacija u gustoj šumi.

Ravničarski i brežuljkasti teren uglavnom je lako prohodan i omogućava neometano kretanje i izvan puta ukoliko ga ne presecaju površinske vode, zasejane obradive površine ili gusto obrasli tereni.

Planinski tereni predstavljaju znatno zatalasano zemljište s većim nadmorskim visinama. Osnovna obeležja su velika raznolikost na manjem prostoru i ponekad hladnije podneblje. Naselja su ređa, pa ima i manje puteva. Na većim strminama kretanje je vrlo otežano. Reljefni oblici i rastinje ponekad osetno otežavaju preglednost. Putevi se uglavnom nalaze u dolinama.

Kraški teren je stenovito-krečnjačko zemljište s karakterističnim kraškim pojavama (vrtače, uvale, kraška polja, ponornice, škrape), koje su više ili manje izražene. Razlikujemo goli kras, čija je površina oštra, teško prohodna i retko obrasla, i zeleni kras, koji se odlikuje manjim brojem kraških pojava, a tlo je pokriveno rastinjem. Najneprohodniji je visoki kras.

Močvarni teren se pojavljuje tamo gde je površinsko i vertikalno oticanje vode slabo zbog specifičnih svojstava tla. Stvara se raskvašenost ili je celo tlo pod vodom. U gusnoj šumi orijentacija i kretanje su znatno otežani, krošnje drveća su isprepletane pa je onemogućena preglednost. Prohodnost u svim vrstama šume zavisi od učestalosti mladog drveća i strmine na kojoj šuma raste. Najneprohodnija je šuma s gustom travom i mladim drvećem, pogotovo ako je smeštena na strmom terenu.

Kako bismo se što lakše orijentisali na terenu, odnosno znali gde se tačno nalazimo (u odnosu na geografsku kartu), odredili strane sveta ili pronašli potrebnu lokaciju, moramo se poslužiti nekim od instrumenata kao što su kompas, GPS prijemnik ili nekom od geodetskih sprava.

## KOMPAS

Prvi kompas kao mehanička sprava stigao je na Zapad, u Evropu tokom XIII veka iz Kine preko arapskih trgovaca. Takođe je i činjenica da su Kinezi kompas poznavali i koristili mnogo ranije. Prvi kompas je bio primitivan i predstavljao je komad prirodno namagnetisanog materijala obrađen u obliku kašike koja se postavlja na bronzanu ploču četvrtastog oblika sa glatkom uglačanom površinom. Kašika je mogla da se slobodno okreće, tako da je njena drška pokazivala jug zato što je širi deo privlačen ka magnetskom severu. Oblik kašike je tako izabran da predstavlja konstelaciju sazvežđa Veliki medved.

U jednoj knjizi, oko 80. godine n.e., ova čudna sprava se pominje pod imenom *sinan*, a pominje se i u nekim spisima koji datiraju još iz IV veka pre n.e. Između ostalog pominje se da su i kopači žada, koji su prelazili velike daljine u potrazi za ovom sirovinom, nosili sa sobom *sinan* radi orijentacije. U Naučnom centru u Torontu čuva se ovakva rekonstruisana sprava (slika 121).



Slika 121. Rekonstruisani *sinan*.

Interesantno je napomenuti da klasičan kompas praktično nije menjao svoju osnovnu konstrukciju kroz vekove. Kompas danas ima, kao i pre, kutiju sa malim vertikalnim šiljkom na kojoj leži uravnotežena magnetna igla, koja se može obrtati u horizontalnoj ravni. Naravno, tehnologija izrade kompasa je danas mnogo sofisticiranija nego ranije, tako da je u raznim varijantama dostupan svima i ima široku primenu.

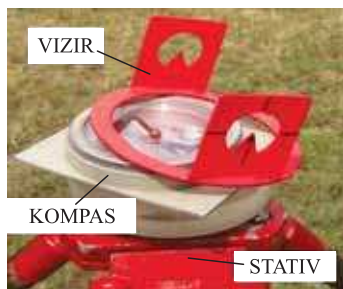
Kao što je već rečeno, magnetna igla svojim južnim krajem pokazuje pravac ka severnom magnetskom polu. Pravac magnetskog severa i pravac prema geografskom Severnom polu se ne poklapaju i zauzimaju izvestan ugao koji se zove ugao deklinacije. Magnetska igla rotira u kružnom prstenu koji je podeľjen na 360°. Prilikom korišćenja kompasa poželjno bi bilo da u njegovoj neposrednoj blizini ne budu veći gvozdeni predmeti ili neki od jaćih magneta, što bi unelo grešku u određivanje taćnog pravca magnetskog severa.

Kompas, kojim se mogu vršiti razna merenja u rudarstvu, geologiji i arheologiji, čine kućište, magnetska igla, kružni prsten sa ugraviranom podelom na 360°, centrićna libela za postavljanje u horizontalan poloţaj, uglomer, koćnica i zaštitno staklo (slika 122).



Slika 122. Kompas za merenja u rudarstvu i geologiji.

Ukoliko želimo da merimo horizontalne uglove, pri snimanju terena u vidu skice ili krokija, na ovakav kompas možemo dodati vizir, ako inače nije fabrićki ugrađen, koji se može okretati ukrug. Pri tome se kompas mora postaviti na stativ – tronoţac, zbog taćnosti u merenju (slika 123).



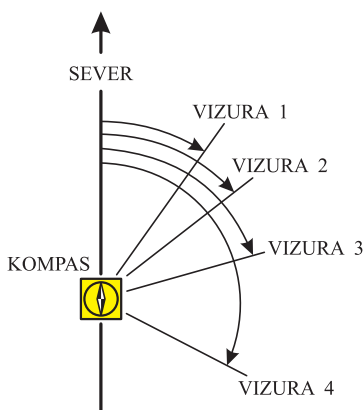
Slika 123. Kompas na stativu sa vizikom.

Za ovakav kompas, vizir predstavlja kružni prsten sa dve vertikalne pločice sa rupama kroz koje gledamo. Viziranje se vrši tako da vrhove konusa na pločicama dovedemo u istu liniju sa nekom tačkom na objektu koji osmatramo. Takva linija se naziva vizurom (slika 124). Osmatrajući položaj dve tačke, na istom ili na dva objekta, možemo na brojčaniku kompasu u stepenima pročitati horizontalni ugao koji čine dva pravca – dve vizure. Naravno, teme horizontalnog ugla predstavlja mesto gde stojimo, odnosno vertikalna osovina magnetske igle.



Slika 124. Radni položaj kod viziranja.

Ako magnetsku iglu na kompasu, rotirajući kućište, dovedemo na poziciju da pokazuje  $0^\circ$  ili  $360^\circ$ , i kućište ostavimo zaključeno u tom položaju, svaku ostvarenu vizuru možemo izmeriti kao ugao u odnosu na pravac severa. Na taj način dobijamo takozvane direkcione uglove koji se uvek mere u pravcu kretanja kazaljki na satu. Vrlo često se direkcioni ugao naziva i azimutom (slika 125).



Slika 125. Vizure i direkcioni – azimutalni uglovi.

Jedan od kvalitetnijih kompasu koji ima mogućnost da precizno meri horizontalne i vertikalne uglove je marke Brunton (slika 126). Brunton ima na poklopcu i ogledalo kako bi se uglovi mogli čitati u raznim položajima kućišta preko vizirnih elemenata.



Slika 126. Kompas marke Brunton.

Ukoliko kompas marke Brunton stavimo na stativ dobićemo vrlo upotrebljiv geodetski instrument kojim se u arheološkoj praksi može dobro poslužiti (slika 127).



Slika 127. Kompas marke Brunton u položaju viziranja.

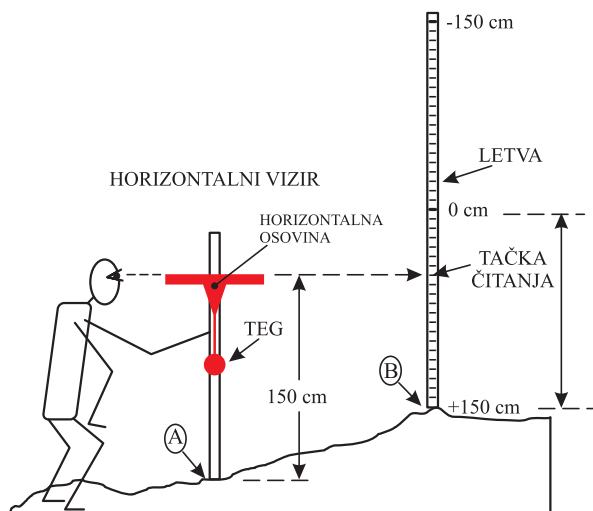
Ukoliko se desi da prilikom korišćenja kompasu na stativu konstatujemo da se libela razdesila, odnosno da vazdušni mehur nije tamo gde je neko vreme stajao, sigurni uzrok tome je dejstvo sunčevih zraka. Pravi uzrok pojave bežanja mehura u libeli usled dejstva sunca su temperatura i razlike u gustini tečnosti koja se koristi u libeli, tako da je poželjno koristiti suncobran kako bismo omogućili merenja pomoću kompasu u dužem vremenskom periodu.

## ODREĐIVANJE VISINSKIH RAZLIKA IMPROVIZOVANIM NIVELIROM

Da bismo u nekoj fazi terenskih radova (rekognosciranje npr.) izmerili visinske razlike na arheološkom lokalitetu, u cilju pravljenja skice ili krokija terena, a trenutno nemamo sa sobom profesionalni geodetski nivelir, možemo se poslužiti improvizovanom tehnikom koju možemo sklopiti direktno na terenu. Ovakvo merenje visina se preporučuje samo na kraćim rastojanjima.

Instrument koji se može brzo napraviti sastoji se iz dva dela. Prvi deo je drveni ili plastični štap na kome se na određenoj visini postavlja horizontalna osovina (ekser, šraf) oko koje se može obrtati horizontalni vizir. Horizontalni vizir predstavlja lenjir koji na sredini ima vertikalnu polugu sa tegom koji ga usled sile teže drži stalno horizontalnim, ma kako drveni štap držali nagnutim. Pri tome, gornja ivica horizontalnog vizira mora biti na visini 1,5 metara od tla (slika 128).

Drugi deo nivelira je takozvana letva, dužine 3 metra, koja se sastoji od dva drvena ili plastična štapa pojedinačnih dužina od po 1,5 metara. Oba štapa je potrebno međusobno mehanički čvrsto spojiti, a na svakom od njih potrebno je pričvrstiti po jednu čeličnu traku sa centimetarskom podelom (misli se na metar – mernu traku u spirali koja se izvlači i automatski uvlači u plastično kućište). Pri tome važno je da oznaka za 0 cm (nula) bude u sredini i da bude zajednička za obe čelične trake sa centimetarskom podelom. Nula na letvi (0 cm), ako je gornja ivica horizontalnog vizira na 1,5 m, takođe mora da bude na visini 1,5 m.



Slika 128. Merenje visinskih razlika improvizovanim nivelikom.



Merenje visinske razlike između tačaka A i B se vrši tako što gledamo duž gornje ivice lenjira (na horizontalnom viziru) zamišljenom horizontalnom linijom u pravcu letve, tako da čitamo visinu na centimetarskim trakama. Pri tome donja centimetarska podela nosi predznak + (plus) kada se visina terena povećava. Ukoliko se visina terena smanjuje, čitanja se izvode na gornjoj traci čije vrednosti nose predznak - (minus).

Merenje na terenu sa ovakvim improvizovanim instrumentom (slika 129), izvodi se tako što se prvo obeleže sve relevantne tačke za koje je potrebno znati visinu. Svaku tačku je potrebno obeležiti nekom oznakom (broj, slovo...).

Pre početka merenja pravi se zapisnik u koji se unose podaci o datumu, lokalitetu na kome se vrše merenja, oznakama mernih tačaka, dužini između njih i visinskim razlikama. Dužine između tačaka koje su predviđene za merenje izvode se geodetskom pantljkikom.

Merenja improvizovanim nivelirom može se izvesti na dva načina.

Prvi način je da štap sa horizontalnim vizikom držimo na jednom mestu a letvu šetamo po terenu koji treba snimiti, i pri tome vodimo zapisnik u koji, pored svake izmerene tačke, upisujemo visinsku razliku.

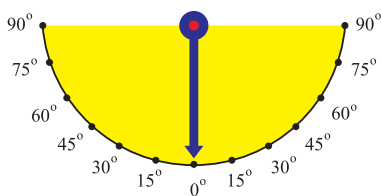
Drugi način je sistem merenja između dve tačke duž predviđene linije, prvo se letva postavlja na određenu tačku a štap sa horizontalnim vizikom je prati, tako da štap uvek stavljamo na mesto gde je prethodno bila letva. Takvim sukcesivnim merenjem dobijamo visinske razlike između izmerenih tačaka, tako da nije teško nakon toga grafički predstaviti topografiju terena po izabranim pravcima ili čak sačiniti topografsku kartu sa relativnim kotama u odgovarajućoj razmeri.



Slika 129. Primer merenja na terenu improvizovanim nivelirom.

## ODREĐIVANJE NAGIBA ILI PADNOG UGLA POMOĆU KOMPASA

Naravno, nije moguće magnetnom iglom odrediti nagib terena ili padni ugao, ali to je ipak moguće ako je u kućište kompasa ugrađen uglomer odnosno klinometar. Uglomer se sastoji od viska i brojčanika. Visak je od metala koji nema uticaja na promenu magnetskog polja i okačen je na horizontalnu osovinu. Brojčanik ima polukružnu formu, pričvršćen je na kućište kompasa i ima oznake u stepenima u opsegu  $90^{\circ}$ – $0^{\circ}$ – $90^{\circ}$ . Visak se slobodno kreće i zauzima vertikalni položaj usled sile teže kada kućište kompasa postavimo vertikalno. U horizontalnom položaju kućišta kompasa visak pokazuje  $0^{\circ}$ , a pri bilo kom nagibu, kazaljka – visak pokazuje veličinu odgovarajućeg ugla (slika 130).



Slika 130. Uglomer sa viskom u kućištu kompasa.

Pri merenju nagiba magnetska igla je ukočena i ne može se pokretati. Na terenu, pri merenju padnog ugla potrebno je da kućište kompasa u vertikalnom položaju prislonimo na površinu objekta ili terena čiji je pad potrebno izmeriti. Kada se visak bude umirio, svojom kazaljkom će pokazati veličinu ugla na brojčaniku.

Upotrebom ovakvog uglomera može se dosta precizno izmeriti veličina padnog ugla ili nagib terena, arheološkog sloja, zida ili konstrukcionog dela neke građevine.

Merenje padnog ugla moguće je izvesti pomoću svakog kompasa koji su pravljeni za korišćenje pri rudarsko-geološkim istraživanjima i koji je postavljen u radni položaj za merenja vertikalnog odnosno padnog ugla (slika 131). U prikazanom slučaju izmereni padni ugao je oko  $20^{\circ}$ .



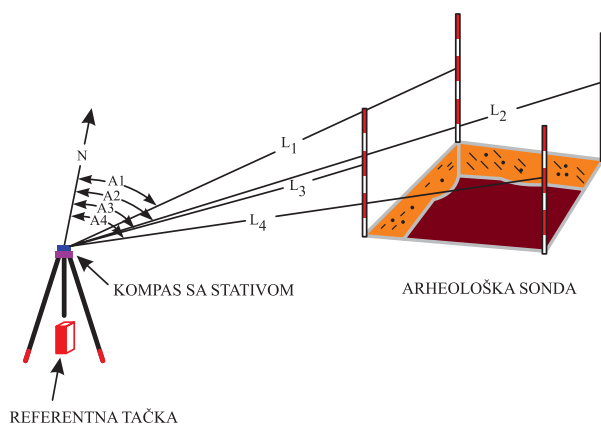
Slika 131. Merenje padnog ugla pomoću kompasa.

## PRAVLJENJE SKICE ILI KROKIJA TERENA POMOĆU KOMPASA I GEODETSKE PANTLJIKE

Skica je jednostavno nacrtana situacija terena koja se može brzo uraditi ali bez dobre tačnosti i bez odgovarajuće razmere.

Za razliku od skice, kroki je detaljan i precizan plan manjeg dela terena nacrtan u razmeri uz upotrebu tehničkih sredstava kao što su kompas, uglomer i lenjiri uz izabranu razmeru.

Kada crtamo kroki, prvo ucrtamo izabranu stajnu ili referentnu tačku. Takođe se kod krokija može po potrebi koristiti više stajnih tačaka. Kada crtamo položaj arheološke sonde, u odnosu na sever mere se sva četiri azimuta ili horizontalna ugla ( $A$ ) i dužine ( $L$ ) geodetskom pantljkicom od referentne tačke ispod kompasu do svake značke koje su postavljene na uglovima sonde (slika 132).



Slika 132. Crtanje krokija – merenje položaja arheološke sonde.

Kroki uvek radi više ljudi jer se za svaki objekat ili izabranu tačku mere dužina i azimut pa se to ucrtava na situaciju u pogodnoj razmeri. Greška prilikom crtanja ne bi smela da bude veća od 0,5 m. Kod krokija se moraju ucrtati i objekti koje ne možemo videti iz samo jedne stajne tačke. Za takve objekte biraju se pomoćne stajne tačke, koja se takođe ucrtavaju.

Kada snimamo neki objekat kao što je arheološki ostatak nekog zida, možemo meriti udaljenosti do pojedinih karakterističnih tačaka kao i azimut za svaku tačku posebno. Pri tome bi bilo poželjno proveriti i dimenzije ostatke zida direktnim merenjem dužine njegovih ivica i uporediti sa dobijenim rezultatima merenja iz stajne tačke.

Treba težiti da se u kroki ucrtta što više detalja, ali do granice preglednosti. Takođe treba nastojati nacrtati i neku od karakterističnih izohipsi.

Nakon završetka crtanja, potrebno je kroki dopuniti imenom lokacije, nazivom crteža, nacrtati pravac severa, formirati legendu, razmernik itd.

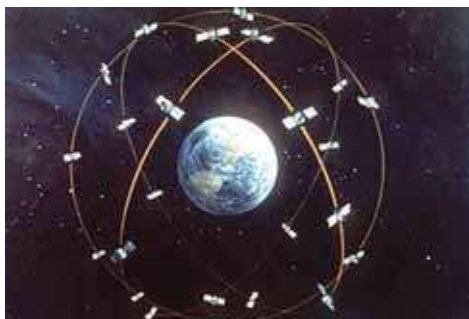
Istom metodologijom arheolog bi mogao da prilikom rekognosciranja terena pojedine nalaze tačno unese u kroki. Pri tome nalazi bi mogli da budu samo obeleženi brojem, a u krokiju bi svaki nalaz bio zastupljen tačkom i odgovarajućim brojem.

## GPS – ODREĐIVANJE PROSTORNE POZICIJE POMOĆU SATELITA

GPS predstavlja skraćenicu od engleskog naziva „Global Positioning System”, što se prevodi kao „globalni sistem za pozicioniranje”. Često se nailazi i na skraćenicu GNSS – „Global Navigation Satellite System” koja se odnosi na praktično isti sistem. To su satelitski radionavigacijski sistemi namenjeni globalnom određivanju pozicija koordinata i kota. GPS pruža korisnicima na moru, kopnu i u vazduhu određivanje 3D pozicije, brzine kretanja i tačnog vremena 24 sata dnevno, bez obzira na atmosferske prilike. Pri tome se ostvaruje veća tačnost nego korišćenjem bilo koga drugog radionavigacijskog sistema.

Prvi od takvih sistema je razvilo i održava ga Ministarstvo odbrane SAD-a. Trenutno se u Evropi ubrzano radi na razvoju sistema GALILEO, a u Rusiji se razvija satelitski sistem GLONAS.

Izgradnja američkog Globalnog pozicionog sistema počela je 1973. godine, a prvo lansiranje satelita usledilo je u februaru 1978. godine. Prvo proširenje sistema počelo je u februaru 1989. godine lansiranjem druge generacije satelita, a sistem je proglašen potpuno operativnim 17. 7. 1995. godine (slika 133).



Slika 133. Planeta Zemlja sa orbitama i satelitima GPS-a.

GPS američki sistem čine tri osnovna dela:

- svemirski deo (31 satelit na visini od 20 200 m),
- kontrolni deo (više kontrolnih stanica širom sveta i glavni kontrolni centar u Kolorado Springsu, Kalifornija, SAD),
- korisnički deo (GPS prijemnik i antena).

Izračunavanje pozicije određene tačke zasniva se na određivanju pseudo-udaljenosti između satelita i tačke na kojoj se nalazi prijemnik. Ta udaljenost može biti izračunata merenjem vremena protoklog od trenutka odašiljanja signala sa satelita do trenutka prijema signala. Vremensko kašnjenje množi se brzinom svetlosti da bi se odredila udaljenost satelit–prijemnik.

Određivanje pozicije tačke gde se nalazi prijemnik najjednostavniji je način korišćenja GPS sistema. Za određivanje trodimenzionalnih koordinata (geografske dužine, geografske širine i nadmorske visine) neke tačke, neophodni su podaci s minimum tri satelita, a dopunski podaci sa još jednog satelita koriste se zbog korekcije merenja vremena. Jednostavnije rečeno, ako zamislimo da udaljenost između satelita i GPS prijemnika predstavlja radijus sfere opisane oko satelita, presek takve tri sfere tačno određuje nepoznatu poziciju.

Razvoj globalnog satelitskog sistema za određivanje pozicije – GPS, prihvaćen je ne samo u navigaciji već i u raznim delatnostima i naukama. Mogućnost izračunavanja koordinata 24 sata dnevno, bez obzira na meteorološke prilike i nepotrebnost dogleđanja među tačkama, vrlo brzo su GPS prijemnike učinile korisnim i opšteprihvaćenim terenskim instrumentima. Danas GPS prijemnike, osim za vojne potrebe, što je bila njihova osnovna namena sistema, koriste stručnjaci raznih profila. Sve brže širenje upotrebe GPS-a prati i stalni razvoj prijemnika. Oni postaju sve manji, brži, pouzdaniji i jeftiniji, potencirajući time svoje korišćenje. Današnji ručni GPS prijemnici veličine mobilnog telefona poseduju mogućnost simultanog praćenja do 12 satelita, omogućavajući time rad i u područjima slabijeg prijema signala, npr. u šumi, uskim kanjonima ili ulicama. Takvi uređaji prvu poziciju izračunavaju za svega minut-dva, a zatim svake sekunde daju novo izračunate koordinate. Osim pozicije GPS prijemnik računa i brzinu (maksimalna, trenutna i srednja brzina), smer kretanja vozila, broda, aviona, čoveka koji u ruci nosi prijemnik. Skoro svi ručni uređaji omogućuju memorisanje više tačaka s koordinatama, vremenom memorisanja podatka i komentarem (kuća, most, potok i dr.) i s puno ruta od više tačaka. Memorisane tačke s raznim podacima mogu se prebaciti u računar za kasniju obradu.

Noviji ručni GPS uređaji imaju i softverski ugrađene mape određenih područja. Ovi prikazi mogu varirati od jednostavne skice okoline, koja služi kao pomoć u orijentaciji, do vrlo detaljnog prikaza ulica u gradovima ili obale sa simbolima svetionika, kablova, marina, sidrišta i slično. Sve češće se u ta-

kvim prijemnicima nalaze i baze podataka gradova, mesta, ulica, muzeja, bolnica, restorana itd., sortirane po određenoj tematici. GPS standardan ručni prijemnik je veličine mobilnog telefona (slika 134).



Slika 134. Ručni GPS prijemnik.

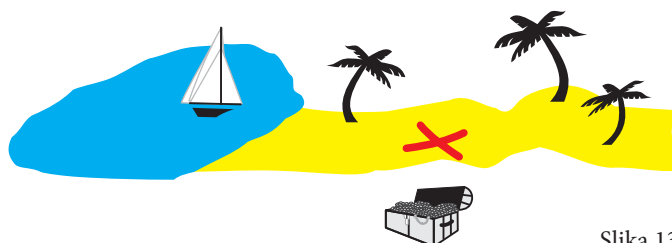
Služiti se takvim uređajem jednostavno je i gotovo automatizovano. Nakon uključivanja i prijema signala s četiri neophodna satelita uređaj računa prvu poziciju (FIX), nakon čega se možemo kretati po zamišljenoj ili planiranoj ruti.

Primena GPS prijemnika za arheologe je izuzetno značajna. Može se koristiti prilikom rekognosciranja terena i pri tome biti nezamenljivo sredstvo za brzo i efikasno prostorno evidentiranje arheoloških nalaza.

Uporeba GPS-a ne završava se samo određivanjem neke tačke. Zavisno od uređaja, tražena tačka se može odrediti i pronaći sutra ili za 10 godina s velikom tačnošću. Potrebno je samo upisati tražene koordinate i pokrenuti funkciju navođenja. Tog trenutka GPS prijemnik nas strelicom usmerava prema traženoj tački istovremeno računajući preostalu udaljenost, brzinu kretanja itd.

## METAL-DETEKTOR

Metal-detektor je vrlo poznata sprava za pronalaženja predmeta koji se nalaze ispod površine terena. Sigurno nema čoveka koji, kada se povede razgovor o metal-detektorima, ne pomisli odmah na zakopani sanduk pun zlatnika (slika 135) i njegovo nalaženje.



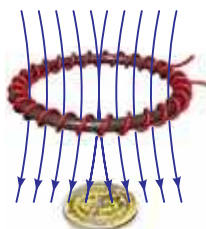
Slika 135. Zakopano blago.

Metal-detektor je prvobitno bio razvijen za vojne potrebe, kako bi se otkrile protivpešadijske mine i bombe koje su plitko zakopane ispod površine terena. Po pravilu, skoro svi aparati koji se proizvode za tu svrhu funkcionišu na elektromagnetskom principu i sve armije sveta ih imaju u svom arsenalu. Metal-detektor se sastoji iz tri dela: kutije sa elektronskim sklopom, baterijama i audio-vizuelnim indikatorom, nosača antene i antene kojom se vrši detekcija metalnih predmeta ispod površine terena (slika 136).



Slika 136. Metal-detektor i njegovi delovi.

Indikacija prisustva metalnih predmeta se vrši antenom koja predstavlja oscilatorno kolo koje radi na određenoj frekvenciji i emituje elektromagnetsko polje u prostor ispod površine terena. Ako se u blizini antene nađe metalni predmet – novčić (slika 137), menja se induktivitet antenskog dela, što prouzrokuje promenu radne frekvencije. Promenu frekvencije prati odgovarajući elektronski sklop koji signalizira operateru prisustvo metalnog predmeta.



Slika 137. Antensko oscilatorno kolo i novčić.

Usavršeniji metal-detektor rade na složenijem principu. U ispitnim antenama se stvara primarno elektromagnetsko polje koje deluje ispod površine terena. Primarno polje stvara indukovano polje u prisutnim materijalima i metalnim predmetima, ako ih ima. Pri tome se usled indukcije javljaju vrtložne struje u metalnim predmetima. Vrtložne struje zatim stvaraju svoje elektromagnetsko polje, čije signale metal-detektor registruje. Pri tome se meri i ugao – fazni pomak između primarnog i sekundarnog elektromagnetskog polja. Shodno prethodnom objašnjenju, ovakvi uređaji imaju mogućnost diskriminacije, određivanja plićih ili dubljih, većih ili manjih metalnih predmeta.

Novčići se ovakvom spravom mogu detektovati do dubine od nekoliko desetina centimetara, a veći predmeti do 1–1,5 metara dubine. Pri tome se ne mogu detektovati predmeti koji nisu napravljeni od metala. Smetnje kod detekcije mogu proizvesti razne podzemne instalacije, prisustvo bezvrednih metalnih predmeta i eventualna mineralizacija. Na primer, komad bazalta, jako čvrste vulkanske stene, zato što u sebi sadrži minerale gvožđa može ometati rad metal-detektora. Metal-detektorom se ne mogu razlikovati pojedini metali, tako da operater ne zna na šta je naišao sve dok ne izvrši iskopavanje. Dubina prodiranja elektromagnetnog polja iz antene u tlo zavisi od prečnika antene i mnogih fizičkih parametara koji su karakteristični za geološke tvorevine: električna otpornost, magnetska permeabilnost, dielektrična konstanta, frekvencija itd.

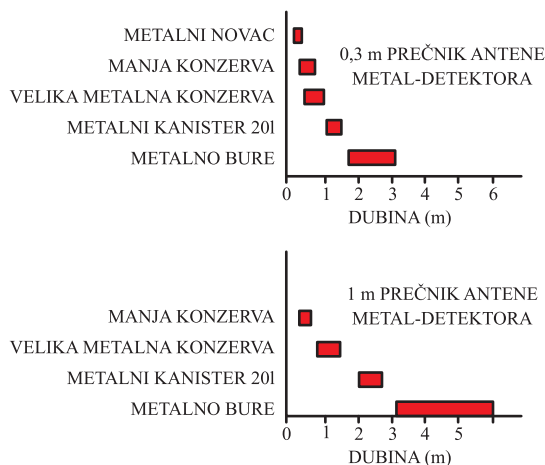
Metal-detektorima su, nažalost, naoružane i organizovane grupe „ilegalnih kopača” ili „zlatara”, koji haraju arheološkim lokalitetima jer za rukovanje takvim spravama nije potrebno posebno znanje ni obrazovanje. Interesovanje za



pronalaženje zakopanog zlata je vrlo veliko, pa cveta komercijalna proizvodnja raznih aparata koje srećemo u prodaji. Relativno su jeftini i mora se reći da dobro funkcionišu jer prave veliku štetu na terenima gde se ilegalno primenjuju.

Metal-detektor je sigurno jedan od važnijih instrumenata kojim bi arheolozi trebalo da se služe prilikom svojih iskopavanja. Ovim aparatom mogu brzo kontrolisati materijal koji iznose iz svojih sondi kako ne bi propustili neki sitan nalaz.

I na kraju, dajemo funkcionalnu zavisnost između prečnika antene i veličine metalnih predmeta sa dubinskim zahvatom (slika 138).



Slika 138. Veza prečnika antene, veličine predmeta i dubinskog zahvata.

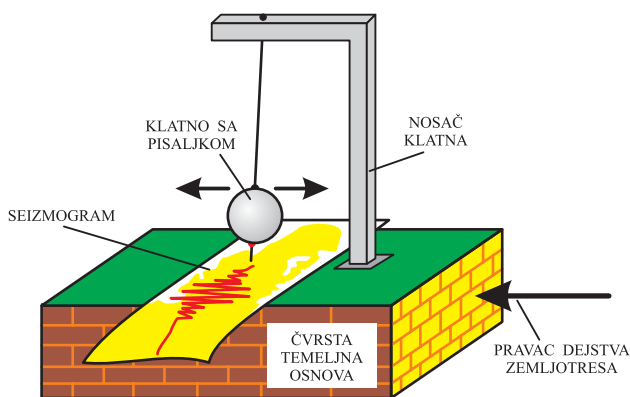


## NEKI POJMOVI O SEIZMOLOGIJI

Ukoliko postoji pretpostavka da se na nekom arheološkom lokalitetu nekada davno dogodio zemljotres, jer određeni tragovi na to ukazuju, za arheologe bi bilo poželjno da budu informisani i o osnovnim pojmovima koji se koriste u seizmologiji što bi bilo korisno tokom daljih iskopavanja i istraživanja.

Pod zemljotresima ili trusovima podrazumevaju se podrhtavanja ili vibracije na Zemljinoj površini koje izazivaju razni uzročnici na manjim ili većim dubinama Zemljine kore. Poseban slučaj potresa su podmorski, koji imaju svoj uzrok ispod morskog dna i prenose se na masu vode mora ili okeana (cunami).

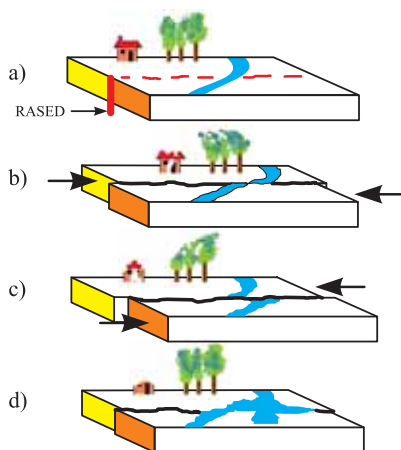
Zemljotresi se prate i beleže pomoću specijalnih instrumenata – seizmografa, a indikacije u vidu oscilacija se nazivaju seizmogrami. Osnovni princip rada seizmografa je izvođenje osetljivog klatna iz ravnotežnog položaja usled podrhtavanja tla. Na klatnu se nalazi pisaljka koja oscilacije beleži na papirnoj traku koja se lagano kreće (slika 139). Savremeni seizmografi i danas imaju klatno ali se potresi beleže i memorišu u digitalnoj formi.



Slika 139. Seizmograf.

Prema načinu nastajanja zemljotresi mogu biti tektonski, vulkanski, urvinski i veštački.

Zemljotresi tektonskog porekla su najbrojniji, najsnažniji i oblast njihovog dejstva je velika. Oni nastaju iznenadnim pomeranjem blokova koji čine osnovnu građu Zemljine kore. Pomeranje blokova nastaje usled narušavanja ravnotežnog stanja i pri tome se oslobađa ogromna seizmička energija. Ta energija izaziva pomeranje blokova koji se dodiruju rasednim zonama, gde se stvara trenje. Usled trenja duž graničnih površi između pokrenutih blokova, nastaje trešnja koja u blokovima izaziva mehanička – elastična oscilovanja, koja se šire kroz stensku masu i dopiru do Zemljine površine (slika 140).



Slika 140. Proces deformacija na površini terena prilikom zemljotresa.

- Normalno stanje;
- Pojavljaju se velika naponska stanja kod stena, podrhtavanje tla i prve deformacije duž rasedne zone;
- Dolazi do deformacija na površini terena i rušenja objekata, potoci gube korita i voda se izliva;
- Zemljotres je završen, oslobođena je energija i deformacije na površini terena su završene.

Vulkanski zemljotresi vezani su za vulkansku aktivnost, tj. za eksplozivno izbijanje magme ili lave iz vulkanskog kanala ili grotla. Potres može nastati i usled urušavanja i sleganja vulkanskog kratera. Oblast dejstva takvih zemljotresa nije velika, iako potres na užem području može imati veliku razornu moć.

Urvinski zemljotresi nastaju rušenjem svodova podzemnih pećina (u karstu), klizanjem nagnutih zemljišnih slojeva itd. Ovi zemljotresi mnogo su slabiji od tektonskih i vulkanskih i imaju samo lokalni značaj.

Veštački zemljotresi su oni koje izaziva čovek svojim aktivnostima, od padova teških predmeta, preko eksplozija u rudnicima do podzemnih eksplozija atomskih bombi, gde se količina oslobođene energije približava onim količinama energije koje se razvijaju kod prirodnih zemljotresa.

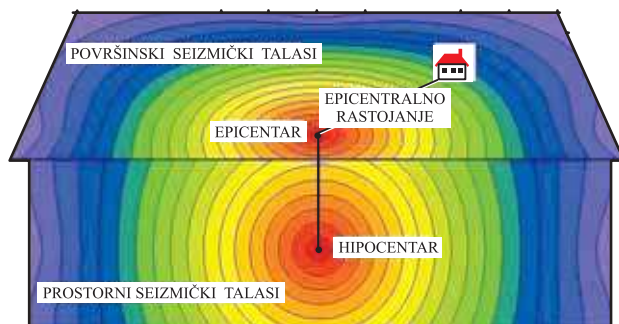
Ognjište zemljotresa ili žarište – fokus zemljotresa, odnosno hipocentar je oblast u unutrašnjosti Zemlje gde dolazi do drobljenja i plastičnih deformacija stenskih masa usled narastanja pritiska i odakle polaze seizmički talasi koji se prostiru na sve strane kroz stensku masu.

Dubina hipocentra, ognjišta, ili fokusa je vertikalno odstojanje od žarišta do površine zemlje. Žarišta zemljotresa nalaze se na raznim dubinama. Na osnovu svojih dubina, ona se dele na plitka (od 0 do 60 km), normalna (od 60 do 120 km), srednje dubine (od 120 do 300 km) i duboka žarišta (od 300 do 700 km). Najveća do sada zabeležena dubina hipocentra iznosi 700 km.

Epicentar zemljotresa je projekcija hipocentra na Zemljinu površinu (slika 141). Hipocentralno vreme je vreme početka potresa u žarištu. To vreme se računa po Griniču.

Epicentralno vreme je vreme početka zemljotresa u epicentru, i računa se takođe po Griniču.

Epicentralno rastojanje je rastojanje bilo koje tačke na Zemljinoj površini od epicentra zemljotresa.



Slika 141. Hipocentar, epicentar i epicentralno rastojanje.

Intenzitet ili jačina zemljotresa je veličina koja karakteriše posledice dejstva zemljotresa na bilo kom mestu.

Određivanje stepena intenziteta ne zasniva se na merenjima, već na opisivanju posledica i procenjivanju istraživača pri čemu se koriste opisne skale. Kod nas je u upotrebi skala sa dvanaest stepena – tzv. Merkali-Kankani-Siberg (MCS).

## Škala seizmičkog intenziteta – MKS (Intenzitet u stepenima)

- I *Neosetan zemljotres*, registruju ga samo instrumenti.
- II *Jedva osetan zemljotres*, moguće je osetiti ga na višim spratovima zgrada.
- III *Lak zemljotres*, neko od ljudi ga oseti, podrhtavanje tla podseća na podrhtavanje usled prolaska teškog vozila. Lagano se klata predmeti koji vise.
- IV *Umeren zemljotres*, oseća se u kućama, prozori zveckaju, grede na tavanima krckaju, nameštaj škripi, predmeti koji vise ljuljaju se, tečnosti u sudovima se pokreću.
- V *Dosta jak zemljotres*, budi ljude iz sna, zgrade se protresaju iz temelja, životinje su uznemirene, predmeti se klata, tečnosti iz otvorenih sudova prosipaju se, časovnici sa klatnom se zaustavljaju. Moguća su laka oštećenja na zgradama, stvaraju se pukotine na dimnjacima i menja se izdašnost na izvorima vode.
- VI *Jak zemljotres*, izaziva paniku kod ljudi koji istrčavaju iz kuća, stvaraju se manja oštećenja na zgradama, u vlažnom tlu stvaraju se pukotine do 1 cm. U planinskim predelima moguće su pojave klizišta, javljaju se promene izdašnosti kod izvora i promene nivoa vode u bunarima.
- VII *Silan zemljotres*, to je zemljotres koji izaziva oštećenja građevina, ljudi masovno beže iz kuća i mnogi teško održavaju ravnotežu usled trešnje, ruše se dimnjaci i stvaraju se pukotine u zidovima. Na mestima gde putevi zasecaju padine moguća su stvaranja klizišta, cevovodi se oštećuju, na vodenim površinama se obrazuju talasi, voda se muti usled dizanja mulja sa dna, nivo vode u bunarima se menja, kao i izdašnost izvora.
- VIII *Štetan zemljotres*, to je zemljotres koji izaziva jaka oštećenja zgrada, grane na drveću se lome, nameštaj po kućama se pomera ili prevrće, stvara se opšti strah i panika kod ljudi. Pukotine u tlu imaju širinu nekoliko cm. Presahli bunari se pune, a puni mogu da presuše.
- IX *Ograničeno razoran zemljotres*, stvara se opšta panika i izazivaju se opšta oštećenja na zgradama koje se mogu delimično ili totalno rušiti, spomenici i stubovi padaju. Podzemne cevi se lome, železničke šine se krive, podvodne vode se izlivaju na površinu, a pukotine u tlu mogu biti i do 10 cm. U brdskim krajevima mogući su veliki odroni stena i aktiviranje mnogih klizišta.
- X *Razorni zemljotres*, ovaj zemljotres izaziva opšte rušenje zgrada, na nasipima i branama dolazi do kritičnih oštećenja, u tlu se pojavljuju pukotine do 1 m. Na obalama reka formiraju se velika klizišta, voda iz kanala, jezera i reka se izliva, može doći do formiranja novih jezera.

- XI *Pustošni zemljotres*, izaziva katastrofu, zgrade, mostovi, brane, željeznički i drugi putevi postaju neupotrebljivi. Određivanje ovog intenziteta zemljotresa iziskuje posebna izučavanja.
- XII *Katastrofalni zemljotres*, to je zemljotres koji izaziva promenu reljefa, pravi ogromne štete i izaziva potpuno rušenje svih objekata iznad i ispod zemlje. Obrazuju se nova jezera, a reke menjaju pravce svojih tokova. Određivanje ovog intenziteta zemljotresa iziskuje posebna izučavanja.

### *Skala po Rihтеру – skala magnituda*

Jačina zemljotresa u njegovom žarištu u zemljinoj kori (odnosno hipocentru) se izražava takozvanom magnitudom u Rihтеровim jedinicama, bez ograničenja u veličini (skala je otvorena ka najmanjim i najvećim zemljotresima). Svaki zemljotres po ovoj skali sa 4,5 jedinica se registruje na svim seizmološkim stanicama sveta (oko 14 000). U tabeli 4, prikazani su efekti zemljotresa koji se manifestuju u epicentralnim oblastima i prosečna učestalost pojave, u zavisnosti od njihove jačine u Rihтеровim jedinicama.

Efekat zemljotresa na građevinskim objektima se izražava u skalama intenziteta, koje najčešće imaju 12 podeoka. Kod nas su u paralelnoj upotrebi MCS (Merkali-Kankani-Siberg) i MSK-64 (Medvedev-Sponhauer-Karnik) skale, koje su numerički približno ekvivalentne savremenoj evropskoj makroseizmičkoj skali (EMS98).

Opis	Magnituda po Rihтеру	Efekti zemljotresa	Učestalost pojave
Mikro	<2,0	Mikrozemljotresi, ne osećaju se.	8 000 događaja u toku dana
Veoma mali	2,0 – 2,9	Ne osećaju se, ali su zabeleženi.	1 000 događaja u toku dana
Mali	3,0 – 3,9	Često se osete, retko prave štetu.	49 000 događaja u toku godine
Lagan	4,0 – 4,9	Primetna trešnja, šteta nije značajna.	6 200 događaja u toku godine
Umeren	5,0 – 5,9	Veća šteta na loše konstruisanim objektima, u manjim regionima.	800 događaja u toku godine
Jak	6,0 – 6,9	Destruktivan zemljotres do 150 km oko epicentralnog područja.	120 događaja u toku godine
Veliki	7,0 – 7,9	Velika šteta na većim područjima.	18 događaja u toku godine
Vrlo snažni	8,0 – 8,9	Ozbiljna šteta u oblastima 1 500 km oko epicentralnog područja.	1 događaj u toku godine.
Retko snažni	9,0 – ili veći	Pustošenje u oblastima više hiljada km oko epicentralnog područja.	1 događaj u toku 20 godina.

Tabela 4. Magnitude po Rihterovoj skali i efekti zemljotresa.

Skala po Rihteru ima 10 opisnih stepeni. Svaki zemljotres po ovoj skali sa 4,5 stepeni obavezno se oseti u celom svetu. U tabeli 4 dati su stepeni sa magnitudama (veličina oslobođene energije), efekti koje po tim stepenima zemljotresi proizvode blisko u epicentrima i prosečna učestalost pojave.

Vrlo snažni zemljotresi se događaju jednom u toku godine. Jedan od poslednjih takvih zemljotresa je Veliki čileanski zemljotres, koji se dogodio 22. maja 1960. godine sa 9,5 stepeni po Rihterovoj skali.



## LITERATURA

- Bevan, B. W., *Geosight Technical Report No. 6, February 2000*, Geosight USA, 2000.
- Breiner, S., *Application manual for portable magnetometers*, 18134-01 REV. A, Geometrics CA, 1973.
- Bülow, G. v., Schüler, T., Geophysical and archaeological research at Gamzigrad – Report of the 2004–2007 campaigns, *Старинар* LVII (2007), Beograd 2009, 231–249.
- Gaffney, C., Gater, J., *Revealing the buried past – Geophysics for Archaeologists*, Tempus Publishing Ltd., Wiltshire 2003.
- Dortman, N. B. (red.), *Fizičeskaja svojstva gornih porod i poleznih iskopaemih: spravočnik geofizika*, Nedra, Moskva 1984.
- *Elektrorazvedočnij praktikum: učebnoe posobie*, Izdatelstvo Voronežnogo Universiteta, Voronež 1979.
- Gaffney, C., Gater, J., Ovenden, S., *The Use of Geophysical Techniques in Archaeological Evaluations*, IFA Paper No. 6, Institute of Field Archaeologists, University of Reading 2002.
- Heiland, C. A., *Geophysical Exploration*, Prentice-Hall Inc, New York 1940.
- Hermann, L., Pattantyús-Á., M., Prónay, Zs., Törös, E., Combined geophysical investigation on Buda Castle Hill, paper presented in the poster session at the 56th EAEG European Meeting in Vienna (Austria), June 6–10, 1994.
- Jakosky, J. J., *Exploration Geophysics: Second edition*, Trija Publishing Company, Newport Beach, California, 1960.
- Jovanović, B., *Rudna Glava, najstarije rudarstvo bakra na Centralnom Balkanu*, Bor–Beograd, 1982.
- Kearey, P., Brooks, M., *An introduction to geophysical exploration*, Blackwell scientific Publications, Oxford 1968.
- Marchisio, M., Onofrio, L. D., De Falco, A., Frediani, L., Guidoni, F., New tomografic techniques (micro-seismical and geoelectrical) for the non-destructive testing on masonry structures, *International Symposium (NDT-CE 2003) Non-destructive testing in Civil Engineering* 2003.
- Mašin, J., Valek, R., *Prehled užite geofyziky pro geology*, Statni pedagogicke nakladatelstvi, Praha 1963.
- Nikitskij, V. E., Glebovskij, J. S. (red.), *Magnitorazvedka: spravočnik geofizika*, Nedra, Moskva 1990.
- Semenov, A. S., *Elektrorazvedka metodom estestvennogo pola*, Nedra, Moskva 1968.
- Simpson, D., Peterson, R., *Archaeo-geophysical investigation the Emmanuel Churc and former Glasgow Street location of the Curch Portsmouth, Virginia*, Report of cultural Resources Investigations 04-010, AMEC Earth & Environmental, Inc, Luisville, Kentucky, 2004
- Vukadinović, M., Vasić, R., *Primena georadara na putevima, u geotehnic i kontroli masivnih konstrukcija*, Građevinski kalendar za 2001, Savez građevinskih inženjera i tehničara, Beograd 2001, 132–154.
- Vukadinović, M., *Rezultati geofizičkog istraživanja metodom geoelektričnog skeniranja na arheološkom lokalitetu Manastir Drenča*, Dokumentacija Zavoda za zaštitu spomenika kulture u Kraljevu, Kraljevo 2005.

- Vukadinović, M., 2005, *Rezultati geofizičkih istraživanja metodom geoelektričnog skeniranja i geoelektričnog sondiranja na arheološkom nalazištu Kale - Krševica*, Zbornik narodnog muzeja XVIII-1, Beograd, 291-307.
- Wynn, J. C., *A Review of Geophysical methods Used in Archaeology*, *Geoarchaeology: An international Journal*, Vol. 1 (1986), No. 3, 245-257.

## SUMMARY

Momir Vukadinović

### Applied Geophysics in Archaeology

This book is intended for archaeologists for the purpose of examining the possibilities of applying geophysical methods in archaeological field surveys. The author's intention was to provide important and useful answers to some of the frequent questions on archaeological methods in geophysics. They were based on the available information from technical literature, and also from the personal experience. This book will introduce archaeologists to the basic principles of geophysical methods and their specifics, so they can be used in an adequate way to solve certain archaeological tasks in an useful way.

The implementation of geophysical methods is based on field measurements, which are conducted exclusively by electronic instruments. Geophysical field surveys are non destructive. Modern electronic measuring instruments are portable and they are based on digital field data collection, which enables recording large number of data in a relatively short time. This was mostly enabled by fast growing computer technology, and also development of data processing software.

Geophysics, a relatively new science, is the physics of the Earth and its environment in space. More precisely, its subjects include physical fields and physical characteristics of the Earth. Geophysical methods are used to measure physical fields such as gravitational field, electrical resistivity, dielectric constant, intensity of magnetic field, the velocity of seismic waves, temperature, etc. Adequate geophysical methods are based on physical characteristics such as gravity, electric, magnetic, seismic, electromagnetic and many others.

Basically, by using geophysical methods in archaeology, it is possible to establish field anomalies, which are caused by remains of material culture below the surface of the ground. By analysing the anomaly field, we can establish the position of surveyed materials (depth, thickness, number of layers, etc.), as well as the size of characteristics by which we can differentiate the surveyed materials.

The implementation and success of geophysical surveys in archaeology depends on several factors. Firstly, there should be a clearly defined survey objective, i.e. archaeological issue that needs to be solved by a geophysical method. Secondly, geophysicists should be able to offer the most optimal solution to an archaeological issue in a timely and cost effective way. Therefore all necessary information should be available, to allow the best methodology to be chosen, and the plan made before the start of the fieldwork. Such plan should contain

clearly defined survey objectives, description of the proposed and applied methodology and the reporting plan.

In other words, geophysical methods can indicate the presence of archaeological remains under the ground, and there are three options – 1D, 2D or 3D images of subsurface (Fig. 1). The first option is 1D – one dimensional, by getting the depth of cultural layer. The other option is 2D – two dimensional, by getting two dimensional imaging of archaeological remains under the ground. The third option is 3D – three dimensional imaging, complete defining of the borders of archaeological remains under the ground.

Using geophysical methods in archaeology, apart from the detection of various objects under the ground, can also offer the basic information about the presence of geophysical materials, which may contain archaeological remains. In the same way, geophysical methods can detect the presence of man made materials in natural homogeneous environment, as well as to establish the continuity or discontinuity of the layers.

At the description of gravity method, there is an example of abandoned mine shaft at one deserted mine in England, conducted by Terradat (Fig. 8).

When describing magnetic methods, there is an example of measurements with contour map of anomalies in the earth's magnetic field at the site of Felix Romuliana (Gamzigrad) near to Zaječar, Serbia (Fig. 31).

For seismic refraction there are two examples from the local practice. The first one is experimental 2D terrain model with the remains of the wall below the ground surface (Fig. 46). The other example is the result of the measurements according to the profile REF-1, at the Lower Town of Belgrade Fortress (Fig. 70).

As for resistivity imaging method, there are several examples, such as two dimensional electrical imaging on profile 2 at the site of Drenča Monastery, near Župski Aleksandrovac in Serbia (Fig. 59).

For self potential method, that can be applied in archaeometallurgy, there is an example from Prljuša – Mali šturac, Rudnik mountain in Serbia (Fig. 81). Self potential method has been applied for the purpose of detecting mineralization as well as prehistoric mine shafts.

For induced polarisation method there is an interesting example of two dimensional induced polarisation imaging by ABEM from Sweden, conducted at Östra Ödarslöv in south Sweden (Fig. 86). This method can be used for detecting metal objects under the ground surface.

As an example of seismic tomography, we can see measuring done on the wall of Lucca cathedral in Tuscany, Italy (Fig. 92).

For electrical resistivity tomography there is an example of measuring moist wall of one medieval stone building at Vicopisano, Italy (Fig. 94).

Speaking about correlation of electromagnetic and electrical measurements, there is an example of Felix Romuliana (Gamzigrad) site in Serbia (Fig. 105).

For Ground Penetrating Radar – GPR method, there is an example of geological field measurement and Detection Gravel sites, according to GSSI (Fig. 111).

For hand drill with soil sampler equipment, there is an example from Kale – Krševica near Bujanovac in Serbia (Fig. 118).

As a special appendix there is a seismology earthquakes. Richter magnitude scale has been used to demonstrate the effect of earthquakes (Table 4).

As archaeology is becoming more and more multidisciplinary, it is certain that some of the methods of applied geophysics will be a standard part in planning archaeological surveys in the future. Therefore, the author hopes that this book will help understand the possibilities and limitations of certain geophysical methods, depending on the implementation and research objectives. By using geophysics, the archaeologists are also offered new learnings and information about the physical characteristics of materials surrounding archaeological sites.

Translated by Tatjana Arutyunov

Primena geofizike u arheologiji

*Momir Vukadinović*

Izdavač

*Zavod za zaštitu spomenika kulture Kraljevo*

*Narodni muzej Kraljevo*

Za izdavača

*Gordana Gavrić*

*Dragan Drašković*

Recenzenti

*Prof. dr Branislav Glavatović*

*dr Dragana Antonović*

Lektura i korektura

*mr Ana Gvozdrenović*

Prevod na engleski

*Tatjana Arutyunova*

Grafički urednik

*Dragan Pešić*

Grafička priprema

*Jovan Antonić*

Štampa

*Duga*

Tiraž

*300 primeraka*

CIP - Каталогизација у публикацији  
Народна библиотека Србије, Београд

550.83:902.3

550.3

ВУКАДИНОВИЋ, Момир, 1950-

Primena geofizike u arheologiji / Momir  
Vukadinović. - Kraljevo : Zavod za zaštitu  
spomenika kulture : Narodni muzej, 2011  
(Vrnjačka banja : Interklima). - 153 str. :  
ilustr. ; 24 cm. - (Biblioteka Posebna  
izdanja / Zavod za zaštitu spomenika kulture,  
Kraljevo i Narodni muzej, Kraljevo)

Tiraž 300. - Bibliografija: str. 149-150.

ISBN 978-86-85179-32-7 (NM)

а) Археологија - Геофизички методи б)  
Геофизика

COBISS.SR-ID 183886604