

## *Principi in možnosti meritev električne upornosti tal v arheologiji*

POPE, K. O. and VAN ANDEL, T. H. 1984 "Late Quaternary alluviation and soil formation in the Southern Argolid: its history, causes and archaeological implications", *Journal of Archaeological Science* 11, 281-306.

STOIANOVITCH, T. 1976 *French Historical Method. The Annales Paradigm*. Cornell University Press.

TRIGGER, B. G. 1984 "Archaeology at the crossroads: What's new?" *Annual Review of Anthropology* 13, 275-300.

John Bintliff

Prevod: Predrag Novaković

Pri opisovanju električnih upornostnih metod v arheologiji smo se omejili na temeljne principe, terminologijo in teoretično podlago meritev. Poznavanje teoretičnega ozadja in nekaterih omejitev pri tej metodi arheološkega terenskega pregleda je nujno pri načrtovanju meritev in pravilnem vrednotenju dobljenih rezultatov. Izbiro elektrodnih dispozitivov, ki jih bomo obravnavali v tem prispevku, je narekovala oprema za tovrstne meritve, ki jih uporabljamo na Oddelku za arheologijo Filozofske fakultete (geoelektrično kartiranje), in predvideno dopolnjevanje zdajšnje konfiguracije z dodatnimi elektrodnimi dispozitivi za geoelektrično sondiranje.

Specifično upornost tal pri arheoloških geofizikalnih prospekcijskih meritvah tako, da prek točkovnih galvanskih kontaktov (v večini primerov se uporablja enosmerni tok) pošiljamo električni tok v zemljo. Ta se v tleh prevaja elektrolitsko, kar pomeni, da električni tok prevajajo v vodnih raztopinah raztopljeni delci z električnim nabojem (ioni in razni koloidni delci). Zaradi tokov nastanejo v zemlji napetosti, ki jih merimo na potencialnih elektrodah. Ponavadi uporabljamo dve tokovni in dve potencialni elektrodi. Iz ugotovljene jakosti toka in merjene potencialne diference z upoštevanjem geometrijske razporeditve tokovnih in potencialnih elektrod izračunamo specifično upornost določenega volumna tal (to velja za tla uniformne sestave). Tako dobimo kvantitativne rezultate, ki pa imajo, kot bomo videli v nadaljevanju, pri upoštevanju visokih osnovnih vrednosti šumov meritev, anizotropnosti in nehomogenosti tal pogosto le omejen pomen.

Specifična upornost je fizikalna lastnost snovi, podobno kot npr. teža, toplotna, optična in električna prevodnost. Specifično upornostjo bi lahko kvantitativno opisali fizikalno lastnost tal le tedaj, če bi bila ta popolnoma homogena sestava, kar pa je zelo redko, skoraj nikoli. Izpeljava fizikalnih enačb za pogoje "potovanja" električnega toka med obema tokovnimi elektrodama v tleh bi bila prezahtevna in ne bi mogla jamčiti pravilnega izračuna specifične upornosti tal. Rešitev, ki se ponuja kar sama, je: za naše pogoje dela uporabimo enačbo za izračunavanje specifične upornosti, ki velja za homogen medij. Izrazu specifična upornost dodamo še navidezna in dobimo termin navidezna specifična upornost ( $A$ ). Navidezna specifična upornost je le pojem za fiktiven

parameter. Ne pomeni povprečne specifične upornosti, temveč le integralno vrednost, ki nima nobenega fizikalnega pomena. Prava specifična upornost je lahko le v redkih izjemah enaka navidezni specifični upornosti.

Splošna (Wennerjeva) enačba navidezne specifične upornosti:

$$S_a = 2/R \left( \frac{1}{\frac{1}{AX} + \frac{1}{BX} + \frac{1}{AY} + \frac{1}{BY}} \right) (A)$$

$S_a$  - (navidezna) specifična upornost

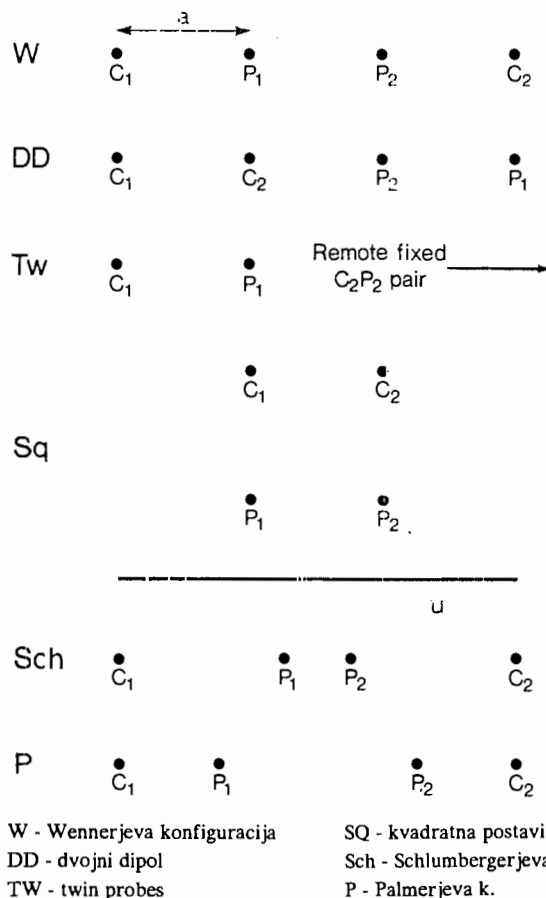
$R$  - izmerjena upornost

$AX, BX, AY, BY$  - razdalja med tokovnimi (A, B) in potencialnimi elektrodami (X, Y) (sl. 2).

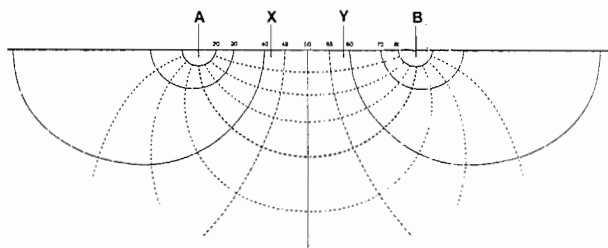
Z metodo navidezne specifične upornosti želimo odkriti navzočnost anomalnih prevodnosti različnih oblik. To so lahko zidovi, jarki, nasipi, horizontalne in vertikalne plasti. Arheološka interpretacija se opira na spremembe v specifični upornosti tal, ki so nastale zaradi človekovega delovanja. Prav ta povezava med specifično upornostjo tal in človekovim delovanjem, ki je pri vrednotenju rezultatov meritev in s tem prospekcijske metode kot take ključnega pomena, je vse prej kot preprosta. Interpretacijo nekoliko poenostavi dejstvo, da nas v večini primerov (geoelektrično kartiranje) zanimajo le relativne spremembe v upornosti tal.

Obstaja vrsta elektrodnih dispozitivov za upornostne meritve. Izbiri najprimernejšega vselej narekuje namen meritev in ne konkretne razmere (geološka sestava) na terenu. Pri upornostnih meritvah v arheologiji so se pokazale kot najbolj uporabne elektrodne razvrstitve, ki jih združujemo v skupino dispozitivov za merjenje potencialnih diferenc (sl. 1).

Kot elektrodno razvrstitev za merjenje potencialnih diferenc, ki se ji obeta lepa prihodnost tudi v arheologiji v anglosaksonskih območjih večinoma uporabljajo Wennerjevo elektrodno razvrstitev (sl. 2). Če pogledamo "evolucijo" elektrodnih dispozitivov in celotni razvoj upornostnih meritev, bomo to našli prav na začetku danes še zelo razvejanega razvojnega niza. Prednost te postavitve so: širok spekter uporabnosti, možnost kvantifikacije, preprosta geometrija postavitve (linearna)



Slika 1



A, B - tokovni elektrodi

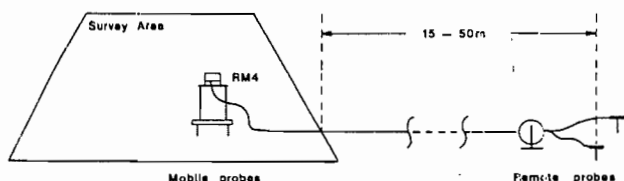
X, Y - potencialni elektrodi

... - teoretična smer potovanja električnega toka za homogen medij

---- - ekvipotencialne ploskve

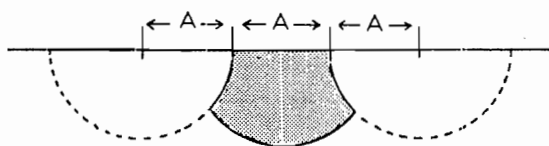
Slika 2 Wennerjeva elektrodna konfiguracija

tokovnih in potencialnih elektrod, kar bistveno poenostavi matematične račune pri končni interpretaciji rezultatov. Navsezadnje je pomembno tudi, da obstajajo za to metodo priročniki in tabele za tovrstne terenske pregledne v arheologiji. Druga metoda, ki jo bomo opisali, sodi prav na konec razvojnega niza elektrodnih postavitvev in je že visoko specializiran arheološki pripomoček. Ker v slovenski geološki terminologiji še ni izraza za to postavitvev, bomo uporabljali kar angleškega: twin probes (sl. 3). V nadaljevanju bomo na kratko opisali obe uporabni metodi in prikazali možnosti, ki jih dajeta kot prospekcijski orodji v arheologiji.



Slika 3 Elektrodna konfiguracija twin probes

Pri Wennerjevi elektrodni postavitvi uporabljamo štiri kolinearno postavljene elektrode z enako medsebojno razdaljo. Zunanji dve sta tokovni, notranji dve pa potencialni. Volumen tal, za katerega pri vsakokratni elektrodni postavitvi izmerimo specifično upornost, leži na sredini elektrodnega dispozitiva do globine  $A$  m (sl. 4). Z Wennerjevo elektrodno postavitvijo lahko študiramo spremembe specifične upornosti tal v odvisnosti od globine (sondiranje) ali od lateralnih sprememb (kartiranje). V obeh primerih lahko uporabimo isti elektrodni dispozitiv. Temeljni princip je: če nas zanimajo spremembe upornosti tal v vertikalni smeri, postopoma povečujemo razdaljo med tokovnimi in potencialnimi elektrodami; če želimo raziskovati lateralne spremembe v določeni globini, se stalna potencialna in tokovna dispozitiva premikata vzdolž iste profilne linije.



Slika 4

Za Wennerjevo elektrodno postavitvev se enačba (navidezne) specifične upornosti poenostavi (razdalje med elektrodami so enake):

$$S_a = 2//AR \quad (B)$$

$S_a$  - (navidezna) specifična upornost

$A$  - razdalja med elektrodami (sl. 3)

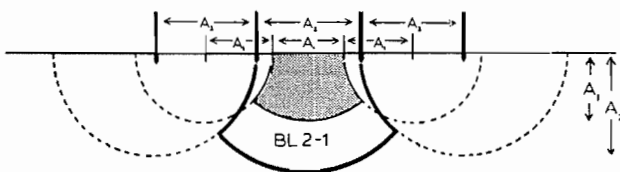
$R$  - izmerjena upornost

Danes zelo razširjena elektrodna konfiguracija za geoelektrično kartiranje je twin probes. Ta metoda je namenjena zgoj za geofizikalne prospekcije v arheologiji. Kot mnoge druge uporabne metode so tudi to razvili iz klasične Wennerjeve elektrodne postavitve. Od nje se razlikuje v tem, da sta oba para elektrod med seboj zelo oddaljena (v primerjavi z medsebojno oddaljenostjo tokovne in potencialne elektrode za vsak par). En par elektrod ostane ves čas meritev na istem mestu, medtem ko drugi par premikamo in z njim merimo relativne spremembe v upornosti tal. Z večjo oddaljenostjo med elektrodama paroma dosežemo, da medsebojna prostorska orientacija obeh parov elektrod med meritvami ne vpliva na izmerjene vrednosti upornosti. Tako se izognemo zamudnosti Wennerjeve metode pri geoelektričnem kartiranju, kjer je potrebna natančna prostorska orientacija linijske postavitve vseh štirih elektrod, pri vsakem premiku elektrod na novo merno točko. Pridobimo torej hitrost pri izvajanju meritev, ne moremo pa kvantificirati rezultatov. Z metodo twin probes vselej merimo le relativne vrednosti upornosti tal, kar pri običajnih arheoloških terenskih pregledih ni posebna omejitev. Pri podrobnejšem preučevanju konkretnega arheološkega najdišča pa je priporočljivo uporabljati obe postavitvi. Ker delamo z relativnimi vrednostmi, so anomalna področja višjih ali nižjih vrednosti upornosti, ki lahko predstavljajo arheološke objekte, izražena v odstotkih glede na višino izmerjenega ozadja. Zaradi tega je zelo pomembno, da pri tej metodi z meritvami zajamemo večjo površino od tiste, kjer pričakujemo pozitivne rezultate. Po možnosti z meritvami pokrijemo del terena, kjer so tla nastajala z naravnimi pedogenetskimi procesi. To nam omogoči jasno ozadje z minimalnimi oscilacijami in s tem tudi jasne kontraste z arheološkimi ostalinami.

Da natančno opravimo meritve v arheologiji, imamo dovolj učinkovita orodja tudi za razčlenjevanje plasti v vertikalni smeri (sondiranje). Pri horizontalnih plasteh in homogeni sestavi problem interpretacije zajame le določanje ene same neznane funkcije, in to specifične upornosti kot funkcije globine. Teorija upornostnih meritev nas uči, da paketu plasti (horizontov) različnih upornosti ustreza samo ena upornostna krivulja in strnjeno: določeni upornostni krivulji ustreza samo ena razporeditev plasti in upornosti. Čeprav ta trditev vselej ne vzdrži ostrejšega preskusa v naravi, pa je ena od ključnih postavk pri interpretaciji rezultatov geoeletričnega sondiranja.

Ena od teh metod, ki jo v arheologiji lahko široko uporabljamo, je Barnesova metoda sondiranja. Ta temelji na dejstvu, da se z večanjem razdalje med elektrodami pri Wennerjevi elektrodni konfiguraciji linearno povečuje tudi debelina plasti (sl. 5) (izraz plast uporabljamo le pogojno, v geofizikalnem smislu pomeni prostornino medija (tal), ki ga določa električno polje. Lahko ga sestavlja ena ali več geoloških ali arheoloških plasti), katere upornost merimo. Električno upornost vsake takšne plasti izračunamo po enačbi:

$$1/RI = (1/Rn) = 1/(Rn-1) \quad (C)$$



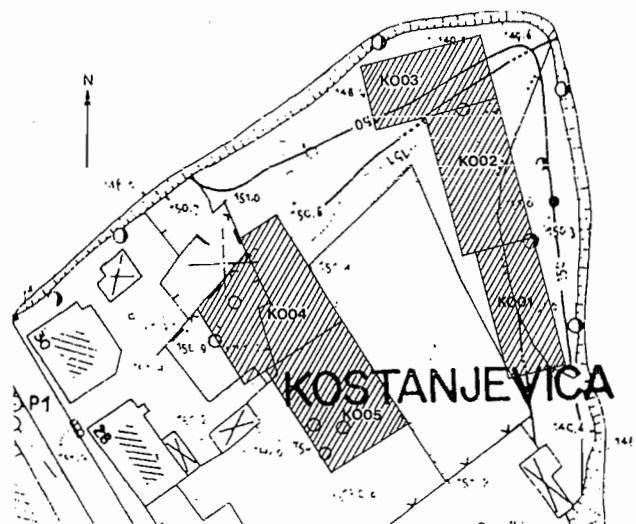
Slika 5 Barnesova metoda geoeletričnega sondiranja

Glede na izračunane vrednosti navidezne specifične upornosti ( $A$ ) v različnih globinah lahko sklepamo na sestavo in s tem tudi na genezo posameznih horizontov tal. Tako ločimo med seboj horizonte, ki pripadajo v večjem delu obdelovalni površini, horizonte, ki vsebujejo arheološki material, in horizonte tal, ki so nastali

med naravnimi pedogenetskimi procesi. Ob tem dobimo še prostorsko razširjenost posameznih horizontov. S to metodo uspešno z reduciramo šume, ki jih povzročajo površinske ali zelo blizu površja ležeče plasti (npr.: pri oranju zrahljana prst vsebuje več zraka med strukturnimi agregati in s tem zvečuje upornost tal, ki lahko "zakrije" odziv globlje ležečih arheoloških ostalin).

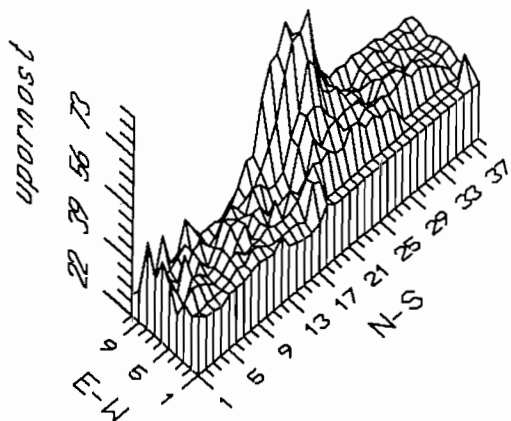
Kljub spopolnjenosti geofizikalnih metod in njihovi navidezni samozadostnosti dobimo najpopolnejšo informacijo o arheološkem potencialu (v najširšem smislu) določenega terena s kombinacijo geološkega (pedološkega) kartiranja, arheoloških in geofizikalnih prospekcij ter nazadnje arheoloških izkopavanj.

Za kratek povzetek takšnega arheološkega terenskega pregleda, ki časovno sicer ni koordiniran, je pa vezan na isti prostor in se rezultati arheoloških izkopavanj (M. Slabe, 1963) in geofizikalnih meritev (twin probes) medsebojno potrjujejo in dopolnjujejo, smo si izbrali Kostanjevico na Krki. Arheološko najdišče leži na severozahodnem delu otoka (sl. 6).



Slika 6 Geofizikalni terenski pregled smo opravili po sektorjih (K001-05)

Otok je zgrajen iz holocenskih aluvialnih naplavin, ki sestojijo zvečinoma iz glin in glinastega preperelega materiala z redkimi prodniki. Za širšo okolico je značilen visok nivo potalnice in s tem visok odstotek vlage v tleh. Erozijska terminanta je tu že dosežena in kras ne sega globlje kot dno struge reke Krke. Glina ima zaradi svoje teksture (velikost delcev, izražena v odstotkih oziroma relativnih razmerjih) in strukture (mineralna sestava, razporeditev posameznih mineralov) lastnost, da vsebuje visok odstotek vlage tudi v sušnih obdobjih (kapilarni dvig in retencijska voda). Tako razlagamo nizke vrednosti upornosti ozadja (tla) na celotnem območju. Te vrednosti so se zaradi prej omenjenih dejstev spreminjale s topografijo terena. Na nižje ležečih delih so bile izmerjene tudi nižje vrednosti upornosti tal (sl. 7).



Slika 7 Sektor K001, K002

Visoka vlažnost tal v večini primerov olajša interpretacijo rezultatov zaradi večjega kontrasta med arheološkimi ostalinami (zidovi) in ozadjem. Velika količina vode, ki je bila v tleh daljše obdobje, pa zmanjša odzivnost arheoloških objektov pri tovrstnih meritvah. Zaradi tega dopuščamo možnost, da je del le-teh ostal še vedno neodkrit. Računalniški grafični izpisi upornosti meritev potrjujejo te rezultate in jih na nekaterih mestih dopolnjujejo, predvsem glede prostorske razsežnosti nekaterih arheoloških struktur.

Sektor K001, K002 (sl. 7, 8): Najvišje vrednosti upornosti tal so bile izmerjene na topografsko najbolj dvignjenem delu terena na meji med sektorjema. Na podlagi grafičnega prikaza sklepamo, da gre za ostanke zidov. Proti vzhodu se anomalija visoke upornosti nadaljuje zunaj začrtanega sektorja (K002). Veliko bolj nejasno je izražena linija B, ki verjetno prav tako pomeni arheološke ostaline.

Sektor K003 (sl. 8): Edina anomalija nizkih vrednosti upornosti (nižjih od ozadja) (C) se ujema z velikostjo in smerjo pri izkopavanjih odkritega jarka.

Sektor K004, K005 (sl. 9, 10): Zelo jasno izstopajo tri območja pozitivnih anomalij: D, E in F. Polkrožno anomalijo visokih upornosti tal (D) in območje E pripisujemo arheološkim ostalinam, struktura F pa verjetno pomeni del obstoječe infrastrukture.

Temeljna uporabljena literatura:

Objavljena dela:

CLARK, A. 1990; *Seeing beneath the Soil (Prospecting methods in archaeology)*. B. T. Batsford Ltd., 176 p., London.

CHRISTOPHER, C. 1982; *Handbook on Soil Resistivity Surveying*, Center for American Archeology Press, 676 p., Evanston.

GRIFFITHS, D. H., KING, R. F. 1965; *Applied Geophysics for Engineers and Geologists*. Pergamon Press, 223 p., London.

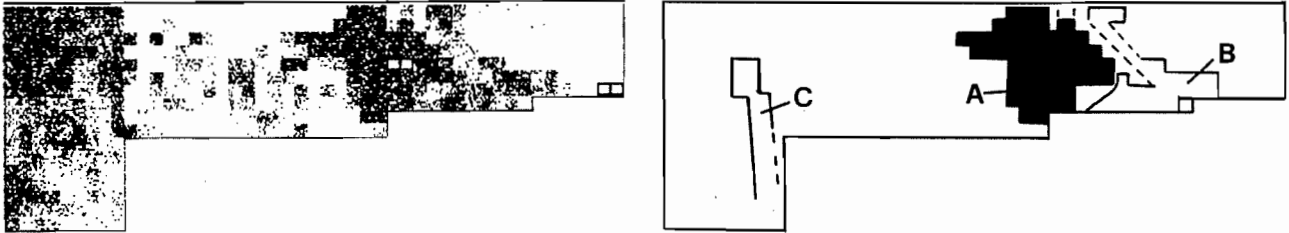
JAKOSKY, J. J. 1960; *Exploration Geophysics*. Trija Publishing Company, 1017, p., Newport Beach.

SHARMA, P. V. 1976; *Geophysical methods in geology. Methods in Geochemistry and Geophysics 12*. Elsevier, 415 p., Amsterdam.

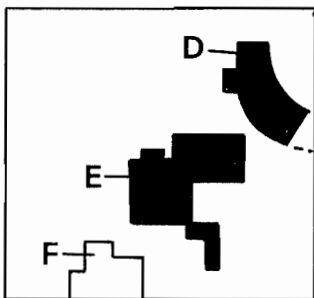
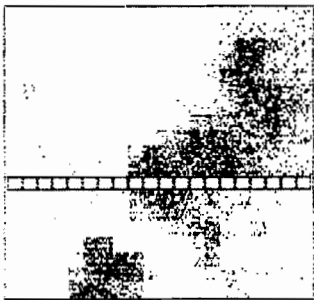
Neobjavljeno delo:

SLABE, M. 1989; *Kostanjevica na Krki* (arheološka raziskovalna akcija, avgust 1986). Hrani se v arhivu Ljubljanskega regionalnega zavoda za varstvo naravne in kulturne dediščine.

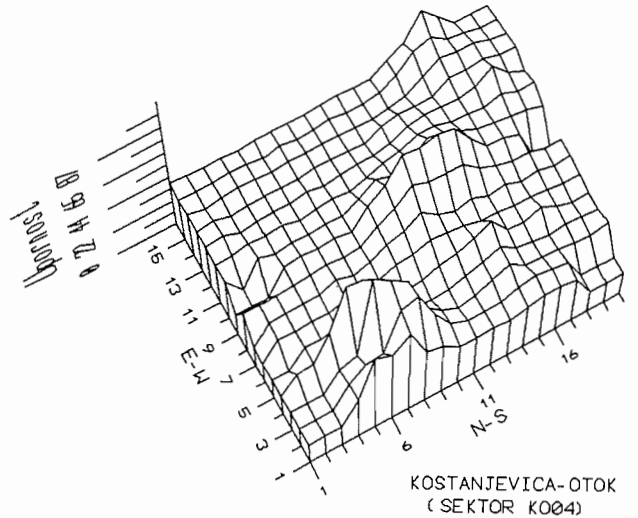
Branko Mušič



Slika 8 Sektor K001, K002 in K003



Slika 9 Sektor K004 in K005



Slika 10