

Elektrometrijska ispitivanja vodoizvorišta Makiš

Filip Arnaut, Branislav Sretenović, Vesna Damnjanović, Vesna Cvetkov



Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

[ДР РГФ]

Elektrometrijska ispitivanja vodoizvorišta Makiš | Filip Arnaut, Branislav Sretenović, Vesna Damnjanović, Vesna Cvetkov | IX
Memorijalni naučni skup iz zaštite životne sredine docent dr Milena Dalmacija, Novi Sad, 31.03-01.04.2022. | 2022 ||

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0007030>

Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета
Универзитета у Београду омогућава приступ издањима
Факултета и радовима запослених доступним у слободном
приступу. - Претрага репозиторијума доступна је на
www.dr.rgf.bg.ac.rs

The Digital repository of The University of Belgrade
Faculty of Mining and Geology archives faculty
publications available in open access, as well as the
employees' publications. - The Repository is available at:
www.dr.rgf.bg.ac.rs

ELEKTROMETRIJSKA ISPITIVANJA VODOIZVORIŠTA MAKIŠ

Filip Arnaut¹, Branislav Sretenović¹, Vesna Damnjanović¹, Vesna Cvetkov¹

¹*Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Dušina 7 Beograd, g804-21@rgf.bg.ac.rs*

Izvod

U radu su prikazane mogućnosti metode elektrometrijskog skeniranja, testirane u zoni beogradskog vodoizvorišta „Makiš“, sa ciljem procene njene pouzdanosti u monitoringu zagađenja vode.

Ključne reči: elektrometrijska metoda, zagađenje voda, dimetil-benzen

Uvod

Geofizičko elektrometrijsko skeniranje (ERT) je nedestruktivna metoda koja se zasniva na merenju specifične električne otpornosti [1]. Mogućnost brzog merenja, praktičnost, kao i ekonomska pogodnost, glavni su razlozi zašto se ERT primenjuje u različitim oblastima inženjerstva i nauke kao što su geotehnička i građevinska istraživanja, fundamentalna geološka istraživanja, hidrogeološka istraživanja [2], i dr.

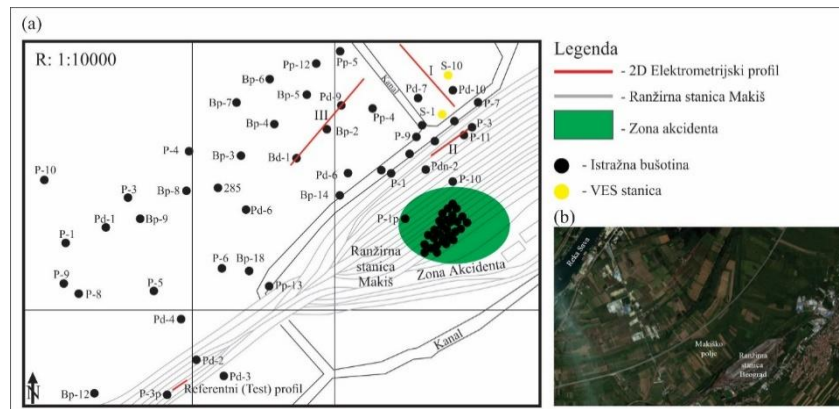
Akcident prolivanja dimetil-benzena koji je doveo je do ozbiljnog zagađenja podzemnih voda trebalo je najpre detektovati a zatim i osmatrati zbog moguće migracije zagađenja prema bunarima za snabdevanje pijaćom vodom, kao i prema glavnom hidrogeološkom akviferu „Makiš“. Akcident je iskorišćen da se testira ERT metoda. Za monitoring zagađenja vode izabrana je navedena metoda jer može da se bez ikakvih rizika primeni u zoni samog izvora zagađenja. Od još većeg značaja je to što metoda pruža podatke i o vertikalnom rasprostranjenju zagađenja ka većim dubinama. „Bušotine“ takođe daju tačne informacije o vertikalnom rasprostranjenju zagađenja, ali ne pružaju, kao ERT metoda, mogućnost dobijanja dovoljno „gustih“ podataka o lateralnom širenju zagađenja. Čak šta više, duboke bušotine u kontaminiranim zonama mogu da prouzrokuju širenje zagađenja naniže, ka akviferu. Osnovni zadatak ispitivanja u slučaju vodoizvorišta Makiš, sačinjenom od peskova i šljunkova na dubinama od 15 do 25 metara [3], bio je određivanje zaštitnih karakteristika pokrivača, kao i hidrogeoloških karakteristika akvifera, koji se nalazi u okviru rečne terase reke Save.

2D geofizička elektrometrijska merenja u zoni zagađenja u oblasti vodosnabdevanja i diskusija rezultata merenja

Sedimenti aluvijona reke Save izgrađeni su od peskova i peskovitih i prašinstih glina zbog čega su visokopropusni, što omogućava migriranje zagađenja naniže [4]. Prirodno tlo je od ranžirne stanice odvojeno drenažnim kanalom koji samo delimično sprečava širenje zagađenja u horizontalnom pravcu prema bunarima za vodosnabdevanje (Slika 1a).

Rezultati plitkog ispitivanja ERT metodom u zoni relativno homogenog peščanog pokrivača koji je nasut u zoni ranžirne stanice (profil II na Slici 2), upoređeni su sa rezultatima koji su dobijeni na nezagađenom test području (test profil na Slici 1). Lokaliteti su izabrani na osnovu rezultata prethodnih ispitivanja u plitkim bušotinama i na osnovu položaja izvora zagađenja u odnosu na regionalni tok podzemnih voda (test profil postavljen je na višoj koti za oko 2 m). Ispitivanja na test području izvedena su sa 32. elektrode koje su na međusobnom rastojanju od 2 m na 5 dubinskih nivoa. Poređena 2D interpretacija, duž test profila i profila koji su postavljeni u zoni zagađenja, jasno pokazuju mogućnost detekcije zagađenja, jer su vrednosti specifične električne otpornosti ρ bile značajno niže u zagađenoj zoni. Kako pokrovni veštački

sloj (nasip od peska i tucanika) nema značajnih lateralnih litoloških promena, ovakav pad vrednosti ρ nedvosmisleno je povezan sa promenom kvaliteta podzemnih voda.



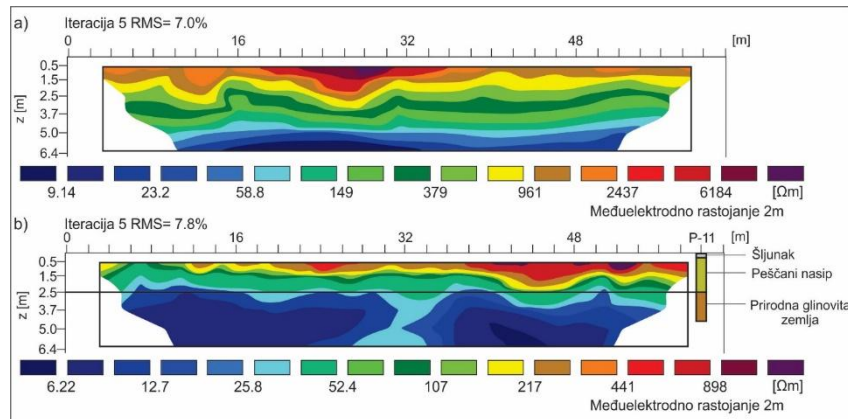
Slika 1. (a) Lokacija: istražnih bušotina, elektrometrijskih 2D profila, i VES stanica (vertikalno električno sondiranje); (b) Satelitski snimak Makiškog polja [5]

Rezultati ispitivanja duž nultog test profila predstavljeni su na slici 2a. Na osnovu poređenja merene i teorijske prividne ρ u 115 tačaka duž nultog test profila, utvrđeno je da srednje kvadratno odstupanje (RMS) iznosi 7%. Vrednost RMS odstupanja je zadovoljavajuća s obzirom na to da je merna nesigurnost 2-3%. Jasno uočljivo prisustvo visokootporne električne nehomogenosti u površinskoj zoni je najverovatnije posledica 3D karaktera. Pored nehomogenosti, nasuti materijal karakterišu i visoke vrednosti ($\rho \approx 10^3 \Omega\text{m}$) bliže površini terena, i nešto manje ($\rho \approx 400 \Omega\text{m}$) na dubini od 3 m. Raspodela ρ odražava prisustvo najpre (po dubini) krupnog tucanika bez zapune, zatim tucanika sa peskovitom zapunom, i konačno, peskovitog materijala. Debljina nasipa varira u rasponu od oko 2,5-3,5 m. Rezultati bušenja na obližnjoj bušotini P-3p potvrđuju da je nasip izgrađen od 0,3 m tucanika, potom od 0,3 m tucanika sa refuliranim peskom, i 1,9 m refuliranog peska, što daje ukupnu debljinu nasutog materijala od oko 2,5 m.

Na Slici 2- dole, predstavljeni su rezultati interpertacije duž prvog dela Profila II, na isti način kao i rezultati duž test profila. RMS je približno isto - 7,8%, međutim, kako u pogledu geometrije, tako i u pogledu raspodele vrednosti ρ , uočava se bitna razlika u izdvojenom 2D modelu poluprostora. Električno viskootpornom pokrivaču (nasuti pesk), odgovaraju generalno niže vrednosti ρ (maksimalno $1,1 \cdot 10^3 \Omega\text{m}$) i manje je debljine (0,5-2,5 m). Već na dubini od oko 2,5-3 m, vrednost ρ naglo opada i pokazuje izraženije lateralne promene u odnosu na test profil. Generalno, uz malo odstupanje, niske vrednosti ρ zadržavaju se i na dubinama od preko 6 m. Na osnovu podataka dobijenih „bušenjem“ u bušotinama P-11 i Pdn-2, koje se nalaze u zoni profila, debljina nasutog materijala kreće se od 1,9 m na P-11 (na 60-om m prvog dela profila II) do 2,3 m na Pdn-2 (na 40-om m od kraja Profila II). Nasip je na bušotini P-11 izgrađen od 0,1 m tucanika i 1,8 m refuliranog peska koji je delimično šljunkovit, dok na bušotini Pdn-2 tucanika nema a nasip je izgrađen od sitnog refuliranog peska sa malo šljunka. Poređenjem vrednosti ρ na prvom delu Profila II, sa odgovarajućim vrednostima ρ na test profilu, uočava se da su one, očigledno, na istim dubinskim nivoima ispitivanja višestruko niže, naročito na dubinama od 2,5-5 m.

S obzirom na veću debljinu tucanika i tucanika sa peskom na nultom test profilu, kao i na nešto veću debljinu nasipa u zoni nultog profila, razumljiv je viši nivo ρ na manjim dubinama. Međutim, prisustvo 0,6 m tucanika i tucanika sa refuliranim peskom u zoni test profila, ne može da prouzrokuje znatniju razliku u ρ na dubinskim nivoima koji odgovaraju refuliranom pesku (do ≈ 3 m) kao i u podinskim glinovitim i glinovito-peskovitim sedimentima (na

dubinama 3-5 m). Usvajajući pretpostavku o relativno sličnom sastavu nasipa od refuliranog peska i približno istom nivou podzemne vode, može da se pretpostavi da je na različite vrednosti ρ presudno uticala znatno snižena vrednost ρ slojne vode u zagađenoj zoni.



Slika 2. (a) Rezultati 2D inverzije duž referentnog test profila;
(b) Rezultati 2D inverzije duž profila u zoni zagađenja podzemnih voda

Ispitivanja ERT metodom izvedena su i u zoni van nasutog peščanog sloja duž profila I (dužine 300 m) u pravcu vodoizvorišta (Slika 3a). Primenjen je *Wenner*-ov raspored elektroda [6]. Minimalno rastojanje između elektroda iznosilo je 10 m a merenja na šest dubinskih nivoa omogućila su da se dosegne dubinski zahvat ispitivanja od oko 30 m, i da se detektuje električno visokootporni sloj (od $\rho \approx 70 \Omega\text{m}$), koji je verovatno izgrađen od šljunkovitog peska (Slika 3a- beli pravugaonik).

Da bi se bolje uočila građa ispitivanog poluprostora rezultati 2D interpretacije koji su prikazani na slici 3 dati su sa uvećanjem vertikalne ose (dubine z). Nižeotporni sloj raspona $\rho \approx 18\text{-}25 \Omega\text{m}$ (glinoviti pesak) oplicava u pravcu vodoizvorišta (od $\approx 13\text{-}7,5$ m), što ukazuje na postepenu lateralnu promenu snižavanjem vrednosti ρ na 110-om metru profila (Slika 3a, crveni pravugaonik). Ovo snižavanje vrednosti ρ odražava povećanje udela glinovite komponente u sedimentima što poboljšava zaštitna svojstva od prodiranja mogućeg zagađenja sa površine u dubljazaležuci akvifer. Smanjenje debljine ovog pokrovnog sloja, sa druge strane, smanjuje i vrednost uzdužne električne provodljivosti (S), koja jednoznačno ukazuje na zaštitna svojstva pokrivača bez uticaja višeznačnosti rezultata interpretacije (princip ekvivalencije). Činjenica da nisu deteknovane vrednosti $\rho < 18 \Omega\text{m}$, potvrđuje da nema prodora zagađenja iz zone ranžirne stanice u široj zoni, ni po dubini, ni prema bunarima vodoizvorišta.

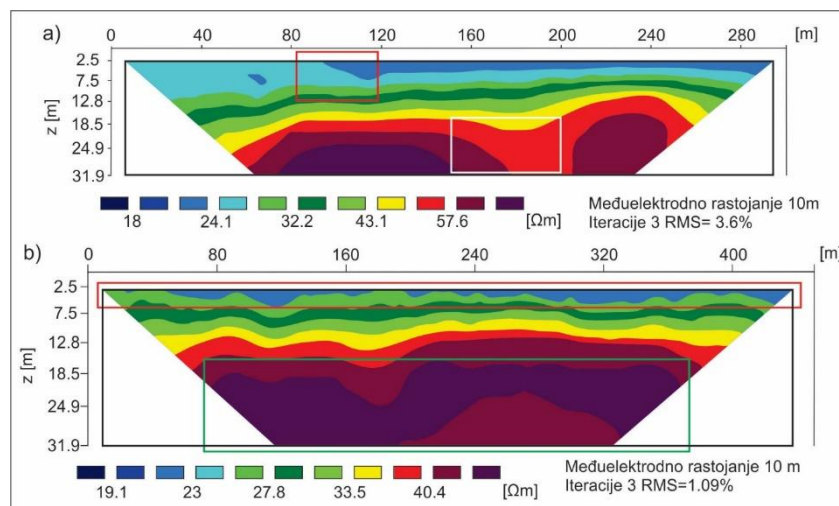
Primenom *Wenner*-ovog rasporeda elektroda sa manjom vrednošću minimalnog rastojanja elektroda ($a < 10$ m), ovaj sloj može da se ispita detaljnije i samim tim bolje definišu zaštitna svojstva pokrivača. U slučaju ovih ispitivanja, izborom $a = 10$ m napravljen je kompromis između detaljnosti izdvojenih sredina u pličoj zoni i maksimalno ostvarenog dubinskog zahvata ispitivanja u cilju definisanja građe dubljih slojeva. Sa povećavanjem dubine uočava se rast vrednosti ρ ($\approx 25\text{-}70 \Omega\text{m}$) što ukazuje na povećanje udela peskovite komponente, odnosno na prisustvo akvifera.

Dvodimenzionalni model (Slika 3a), takođe, otkriva postojanje izrazitih lateralnih litoloških promena na većim dubinama (u zoni između 150-og i 200-tog metra), što je važna informacija za karakterisanje akvifera, odnosno o bočnim promenama udela nižeotporne glinovite i višeotporne peskovite komponente.

Profil III, dužine 450 m (Slika 3b), postavljen je približno normalno na pravac Profila I, na udaljenosti od ranžirne stanice od oko 200-250 m, pri kraju Profila I. Primenjen je *Wenner*-ov dispozitiv sa minimalnim rastojanjem elektroda od 10 m, na šest dubinskih nivoa ispitivanja.

Električno nižeotporni pokrovni sloj (Slika 3b- crveni pravugaonik) sa vrednostima ρ u rasponu od 19-23 Ωm (glinoviti pesak) znatno je tanji u odnosu na Profil I (7,5 m i manje), a njegova zaštitna svojstva od mogućeg zagađenja sa površine terena su znatno manja. Naime, pri istoj vrednosti ρ_1 , zbog manje debljine pokrovnog sloja h_1 , umanjena je vrednost uzdužne električne provodljivosti ($S_1=h_1/\rho_1$). U ovom slučaju primena *Wenner*-ovog rasporeda elektroda sa manjom vrednošću minimalnog rastojanja elektroda ($a=2$ m, na minimum 10 nivoa ispitivanja) je nužna da bi pokrovni sloj bio ispitan detaljnije, tj. da bi zaštitna svojstva pokrivača bila bolje definisana. Uočava se da i duž Profila III nisu detektovane vrednosti $\rho < 19 \Omega\text{m}$, što potvrđuje da nema prodora zagađenja iz zone ranžirne stanice, ni po dubini, ni prema bunarima u široj zoni vodoizvorišta.

Dvodimenzionalni model ukazuje na postojanje kontinualnog električno višeotpornog peskovitog sloja ($\approx 50 \Omega\text{m}$) (Slika 3b, zeleni pravugaonik), koji je na Profilu I detektovan samo u zoni od 70-150 m na dubini 25-30 m. Pored toga, primetno je sniženje vrednosti ρ ispod ovog sloja, što otkriva povećan udeo glinovite komponente u okviru akvifera.



Slika 3. (a) Rezultat 2D inverzije podataka elektrometrijskog skeniranja duž Profila I; (b) Rezultat 2D inverzije podataka geoelektričnog skeniranja duž Profila III

Zaključak

Geofizička elektrometrijska ispitivanja 1D, 2D i 3D pružaju mogućnost brze, efikasne, i ekonomične procene zaštitnih svojstva nižeotpornog pokrivača, kao i eventualnih promena izazvanih mogućim zagađenjem u zoni akvifera u široj zoni vodoizvorišta. 1D elektrometrijsko sondiranje po mreži 50×50 m ukazuju na svojstva zaštitnog pokrivača i akvifera „pre i posle“ izgradnje i eksploatacije budućeg metroa i naselja. U zonama u kojima se na osnovu 1D metodologije otkrije da su osetljivije u pogledu mogućeg zagađenja sa površine terena neophodno je primeniti 2D ispitivanja po pravilnoj mreži 2D profila, pri čemu međusobno rastojanje profila ne bi trebalo da prevazilazi vrednost dvostrukog minimalnog rastojanja između elektroda [7]. Na taj način bi se obezbedila 2D inverzija duž profila, kao i 3D inverzija na osnovu većeg broja paralelnih profila skeniranja.

Navedena metodologija elektrometrijskih ispitivanja redukovala bi obim neophodnog bušenja i omogućila bi da se razreše eventualne neodumice o mogućem uzročniku nižeotpornih zona u okviru akvifera vodoizvorišta “Makiš” (npr. litološke promene ili promene kvaliteta podzemne

vode). Pored toga, ponovljenim ispitivanjima u određenim vremenskim intervalima moglo bi da se dođe do saznanja o eventualnom širenju zagađenja, kao i o promeni nivoa zagađenja.

Literatura

- [1] Bhattacharya, B.B., & Shalivahan, S. (2016). *Geoelectric methods: Theory and Application*. McGraw Hill Education (India).
- [2] Reynolds, J. M. (2011). *An introduction to applied and environmental geophysics*. John Wiley & Sons.
- [3] Tošović, S., Sarić, Z., Gburčik, V., Dopović, D., Matić-Besarabić, S., Tanasković, M., Majstorović, B., Stojanović, R., Marčetić, Lj., Jelača, P., Milutinović, M., Agramović, R., Mandić, M., Mladenović, S., & Pajić, D. (2002). Ekološka valorizacija područja generalnog plana Beograda- Ekološki atlas Beograda. *Direkcija za građevinsko zemljište i izgradnju Beograda. Gradski zavod za zaštitu zdravlja Beograda*.
- [4] Marković, B., Veselinović, M., Anđelković, J., Stevanović, P., Roglić, Č. & Obradinović, Z. (1984). Osnovna geološka karta Jugoslavije 1:100 000, Tumač za list Beograd (K34-113), *Savezni geološki zavod, Beograd*.
- [5] GeoSrbija. (2021). *Nacionalna infrastruktura geoprostornih podataka*, [Online]: <https://geosrbija.rs/>
- [6] Bhattacharya, P.K. & Patra, H.P. (1968). *Direct current geoelectric sounding: Principles and interpretation*. Elsevier publishing company.
- [7] Loke, M.H. (2004). Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys, *Geotomo Software, Res2dinv Software Manual*.