

PRIMENA VENEROVE METODE NA TLO SA TANKIM POVRŠINSKIM SLOJEM VELIKE SPECIFIČNE ELEKTRIČNE OTPORNOSTI

APPLICATION OF THE WENNER METHOD ON SOIL WITH A THIN SURFACE LAYER WITH HIGH ELECTRICAL RESISTIVITY

Stevan STANIŠIĆ, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Srbija
Zoran RADA KOVIĆ, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Specifična električna otpornost tla (ρ) predstavlja ulazni podatak za proračune otpora uzemljivača ili elektroda za HVDC transport električne energije, kao i raspodelu potencijala u okolini uzemljivača. Tlo po pravilu nije homogeno, odnosno njegovo ρ se menja po dubini. Najčešće korišćena metoda za određivanje ρ je Venerova (Wenner) metoda, sa pratećim metodama interpretacije. Merenjem sa dve strujne (struja I) i dve potencijalne elektrode (napon $U(a)$), za različita rastojanja a između elektroda, određuju se „prividne otpornosti“ $R(a)=U(a)/I$, a iz njih „prividne specifične otpornosti“ ρ_a za dubinu a . Iz ovih vrednosti se, primenom metoda interpretacije, izvlači zaključak o promeni realnog ρ sa dubinom.

Venerova metoda je izvedena polazeći od pretpostavke da se struja odvodi iz tačkastog vrha jedne strujne elektrode i stiže u tačkasti vrh druge. Vener je izveo formulu za vezu između $\rho(a)$ i $R(a)$, za koju je dao i uprošćeni izraz za $b \ll a$. U slučaju da postoji vrlo tanak površinski sloj tla čije se ρ značajno razlikuje od sloja ispod (tereni sa isušanim i rastresitim peskovitim površinskim slojem) sprovođenje metoda interpretacije zahteva merenja pri malim rastojanjima a . Za takav slučaj nije moguće praktično ostvariti dovoljno male vrednosti b , potrebne za malo a , da bi upotreba uprošćene formule bila opravdana. Ostaje otvoreno i pitanje uticaja pretpostavke da su izvori tačkasti, umesto stvarnog oblika štapnih elektroda. Cilj ovog rada je da ustanovi ovaj uticaj, koristeći mogućnosti koje pružaju savremeni softverski alati zasnovani na metodi konačnih elemenata (FEM).

Analizirane su karakteristične strukture tla: 1) dvoslojno, uobičajene debljine gornjeg sloja: $\rho_1 = 400 \Omega\text{m}$ ($h_1 = 2,5 \text{ m}$) i $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$, i 2) dvoslojno, sa velikom otpornošću i malom debljinom gornjeg sloja: $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$ ($h_1 = 0,3 \text{ m}$) i $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$. Primenom FEM, kao alternativa merenjima na terenu, određena je raspodela struja i potencijala u modelu mernog sistema. Iz rezultata FEM simulacija se jednostavno dobijaju vrednosti koje se zahtevaju kao rezultati merenja Venerove metode. Posle sprovođenja postupka Venerove metode i tehnika interpretacije rezultata, dobijene su vrednosti karakteristika tla, koje su zatim poređene sa inicijalno zadatim karakteristikama. Analize su vršene za dva slučaja, za tačkaste elektrode (kao u teorijskoj postavci Venerove metode i pratećim metodama interpretacije), kao i za slučaj uobičajeno primenjivanih štapnih elektroda.

Ključne reči: Venerova metoda, specifična otpornost tla, FEM softver, dvoslojno tlo, površinski sloj male dubine, električna karakterizacija tla

ABSTRACT

The ground resistivity (ρ) is the input for calculation of the grounding systems resistance or electrodes for HVDC power transmission, as well as potential distribution in the surrounding soil. As a rule, soil is not homogeneous, i.e. its ρ varies with depth. The most commonly used method for determining ρ is the Wenner method, followed by interpretation methods. By measuring with two current (current I) and two voltage electrodes (voltage $U(a)$), for different distances a between the electrodes the apparent resistances $R(a)=U(a)/I$ are determined. The next step is determination of “the apparent resistivities” ρ_a for each depth a . From these values, by using the interpretation methods, a conclusion can be drawn about variation of real ρ with depth.

Wenner's method was derived with the assumption that the current exits from the tip of one current electrode and flows into the tip of the other. Wenner derived a formula for the relationship between $\rho(a)$ and $R(a)$, for which he also gave a simplified expression for $b \ll a$. In case there is a very thin surface layer of soil where ρ differs significantly from the layer below (terrains with dried and loose sandy surface layer), the implementation of the method of interpretation requires measurements at short distances a . In such a case, it is practically impossible to

achieve sufficiently small values of b , necessary for small a , for the use of a simplified formula to be justified. The question of the influence of the assumption that the sources are points, instead of the actual shape of the rod electrodes, also remains open. The aim of this paper is to analyze this influence, using the possibilities provided by modern software tools based on the finite element method (FEM).

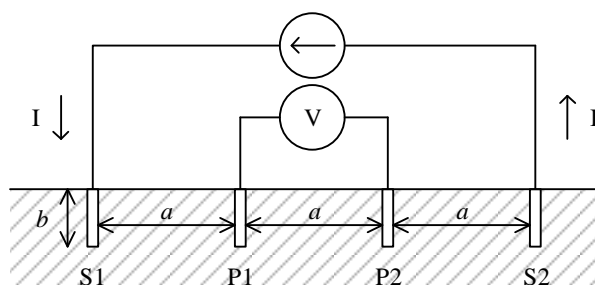
The characteristic soil structures are analysed: 1) common two-layer, with usual upper layer depth: $\rho_1 = 400 \Omega\text{m}$ ($h_1 = 2,5 \text{ m}$) and $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$, and 2) two-layer, with high resistivity and small thickness of upper layer $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$ ($h_1 = 0,3 \text{ m}$) and $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$. Using FEM, as an alternative to field measurements, the distribution of currents and potentials in the measurement system model was determined. From the results of FEM simulations, the values required as the results of measurements of the Wenner method are simply obtained. After performing the procedure of the Wenner method and the results interpretation techniques, the values of the soil characteristics were obtained, which were then compared with the initially assigned characteristics. Analyses were performed for two cases: for point electrodes (as in the theoretical setting of the Wenner method and the accompanying methods of interpretation), as well as for the case of commonly used rod electrodes.

Keywords: Wenner method, soil resistivity, FEM software, two-layer soil, shallow surface layer, electrical characterization of soil

Kontakt informacije o autorima/Author contact:
 Stevan Stanišić, email: ss165035p@student.etf.bg.ac.rs
 Zoran Radaković, email: radakovic@etf.bg.ac.rs

UVODNA TEORIJSKA RAZMATRANJA

Venerova (Wenner-ova) metoda [1] za određivanje specifične otpornosti tla bazira se na merenjima pomoću 4 elektrode pobodne na dubini b , postavljene u liniji, na jednakim rastojanjima a , na način prikazan na slici 1. Strujne elektrode S1 i S2 su povezane na strujni izvor i iz jedne ističe, a u drugu se uliva merna struja. Potencijalne elektrode P1 i P2 povezane su na instrument za očitavanje napona. Očitani napon između potencijalnih elektroda podeljen sa jačinom merne struje daje prividnu otpornost R_a .



SLIKA 1 – Šema za merenje specifične otpornosti zemljišta Venerovom metodom

Polazna pretpostavka u radu [1] je da su **strujni izvori u tlu tačkasti**, postavljeni na dubini b , odnosno da merna struja ističe samo iz tačke S1 i uliva se samo u tačku S2 (obe na dubini b), a ne po spoljnoj površi dela elektrode koji je poboden u tlo. Pomoću analitičkih izraza za raspodelu potencijala u okolini tačkastih strujnih izvora, korišćenjem superpozicije i teorije likova, za homogeno tlo, izveden je izraz za potencijalnu razliku tačaka na dubini b , na pozicijama gde je predviđeno pobadanje potencijalnih elektroda (U_{P1-P2}). Deljenjem ovog napona sa jačinom struje strujnog izvora I dobija se prividna električna otpornost $R_a = U_{P1-P2}/I$, a iz nje, koristeći formulu (1), prividna specifična otpornost ρ_a na dubini a .

$$\rho_a = \frac{4 \cdot \pi \cdot a \cdot R_a}{1 + \frac{2 \cdot a}{\sqrt{a^2 + 4 \cdot b^2}} - \frac{2 \cdot a}{\sqrt{4 \cdot a^2 + 4 \cdot b^2}}} \quad (1)$$

Formula (1) se za $b \ll a$ svodi na:

$$\rho_a = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R_a \quad (2)$$

Povećavanjem a , na prividnu specifičnu otpornost ρ_a sve više utiče specifična otpornost na dubljim slojevima tla. Kada bi tlo bilo idealno 2-slojno, tada bi ρ_a asimptotski težilo ka ρ_1 za sve manja rastojanja merenja a (to se vidi i iz izraza (3)). Za veća rastojanja, raste uticaj ρ_2 na ρ_a . Ove činjenice treba imati na umu kada se formira opseg rastojanja merenja a , jer skup podataka čijom se numeričkom obradom dobijaju parametri ρ_1 , h i ρ_2 mora da bude dovoljno osetljiv na svaki od ovih parametara. Primera radi, ako bi se merenja vršila samo za skup malih vrednosti a , numeričkom obradom podataka bi se dobile dobre vrednosti za ρ_1 , ali kriterijumska funkcija koja se minimizira ne bi bila osetljiva na parametre h i ρ_2 , što znači da ne bi bilo moguće da se oni tačno odrede. Pri projektovanju uzemljivačkih sistema nehomogeno tlo najčešće može da se modeluje kao 2-slojno, gde je gornji sloj dubine h i specifične otpornosti ρ_1 , ispod kojeg je donji sloj beskonačne dubine i specifične otpornosti ρ_2 . Za slučaj takvog tla, Davalibi (Dawalibi) i Blatner (Blattner) su u [3,4] dali metodu za interpretaciju merenja izvedenih Venerovom metodom na osnovu koje mogu da se odrede parametri 2-slojnog horizontalnog tla. Polazna pretpostavka im je bila da se strujne i potencijalne elektrode mogu posmatrati kao **tačke na samoj površini tla**, što je u [4] opravdano time da je b obično manje od 10% od a , čime se obezbeđuje da se elektrode približno ponašaju kao tačke u poređenju sa razdaljinama između elektroda. U [3] je izvedena formula za ρ_a u 2-slojnom tlu, do koje se došlo preko partikularnog rešenja Laplasove jednačine za potencijale tačaka na površini tla na pozicijama gde bi se postavile potencijalne elektrode, a koja zadovoljava granične uslove za 2-slojno tlo:

$$\rho_a = \rho_1 \cdot \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} K^n \left(\frac{1}{\sqrt{1 + (2nh/a)^2}} - \frac{1}{\sqrt{4 + (2nh/a)^2}} \right) \right] \quad (3)$$

gde je K koeficijent refleksije:

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (4)$$

U [3,4] je dalje izložen numerički postupak kojim se iz skupa vrednosti ρ_a dobijenih merenjem Venerovom metodom dobijaju odgovarajući parametri ρ_1 , h i K .

Cilj ovog rada je da ispita šta se događa u slučaju kada postoji gornji sloj velike specifične otpornosti čija dubina nije mnogo veća od dubine pobadanja elektroda. Motivacija za ovo istraživanje je praktični problem izvedbe uzemljivača u takvom tlu u pustinjskim predelima Bliskog istoka [5]. Pretpostavka pod kojom je postavljen izraz (3) u navedenom slučaju tankog površinskog sloja visoke električne specifične provodnosti nije opravdana. Druga pretpostavka u praktičnoj realizaciji metode koja ne važi je da elektrode nisu tačkaste, već štapne, što bi moglo naročito da utiče na rezultat u navedenom tipu tla. Analize su bazirane na rezultatima proračuna koji su izvršeni primenom savremenih softverskih alata zasnovanih na metodi konačnih elemenata (engl. finite element method – FEM).

MODELI ZEMLJIŠTA

U ovom radu su analizirane karakteristične strukture tla:

- 1) 2-slojno, uobičajene debljine gornjeg sloja: $\rho_1 = 400 \Omega\text{m}$ ($h_1 = 2,5 \text{ m}$) i $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$, i
- 2) 2-slojno, sa velikom otpornošću i malom debljinom gornjeg sloja: $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$ ($h_1 = 0,3 \text{ m}$) i $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$.

MODEL U FEM SOFTVERU

Napravljen je 3D model u softverskom paketu baziranom na FEM [6]. Korišćen je modul *Electric Currents*.

Geometrija. Tlo oko elektroda je modelovano kao kvadar dimenzija $240 \times 240 \times 150$ (u metrima). Kvadar je na dubini h od gornje površine podeljen na gornji i donji sloj. Elektrode su za oba tipa zemljišta modelovane na dva načina: 1) kao tačke na dubini b ili 2) kao cilindri visine b i poluprečnika $0,01 \text{ m}$, pobodeni tako da im je gornji bazis u nivou okolnog tla.

Zadavanje fizike i materijala. Odabrana je fizika *Electric Currents*, i primenjena na slučaj jednosmernih struja, kako je to objašnjeno u nastavku teksta.

Potrebno je da se zadaju granični uslovi za zapremine, površine i tačke u geometriji modela. Uslovi koji su na početku zadati automatski:

- *current conservation* – uslov da nema „nestajanja“ struje unutar granica modela i odnosi se na celokupnu zapreminu modela,
- *electric insulation* – uslov kojim se sve spoljašnje površine karakterišu kao idealno izolovane, tj. $\vec{n} \cdot \vec{J} = 0$ (ovo je granični uslov Nojmanovog tipa), i
- *initial values* – vrednost električnog potencijala u početnoj iteraciji u svim tačkama modela (standardna vrednost $V=0$ V).

Dalje, ručno su zadati granični uslovi:

- za sve spoljašnje granice modela osim gornje zadaje se granični uslov Dirihleovog tipa, da je potencijal jednak potencijalu udaljene zemlje – *ground*, tj. $V=0$ V (kada se zada ovaj uslov, on tada poništava uslov *electric insulation*, što znači da *electric insulation* ostaje aktivan samo na gornjoj površini, tj. na granici tlo/vazduh),
- *terminal* – za tačke, odnosno na površine koje u modelu služe za unošenje struje ili napona, tj. za injektiranje i odvođenje merne struje na strujnim elektrodama; za sve simulacije u ovom radu je korišćena jačina struje 1 A.

U modelima gde su elektrode modelovane kao cilindri, strujne su šuplje, na čijim površinama je pomenuti granični uslov *terminal*, a potencijalnim je zadat materijal bakar. Ostatku modela su dodeljene specifične otpornosti za prvi, odnosno drugi sloj tla, u skladu sa dubinom gornjeg (prvog) sloja.

Pravljenje mreže konačnih elemenata. Čitav modelovani domen se deli na mrežu konačnih elemenata, tzv. *mesh*, za koje FEM softver automatski postavlja i rešava jednačine fizike. Bitno je da su elementi dovoljno mali u oblastima najvećeg gradijenta potencijala, odnosno oko elektroda. Elementi mreže su sve krupniji kako se udaljava od postavke sa elektrodama, jer je gradijent potencijala sve manji, a raspodela struje i potencijala u udaljenim tačkama od manjeg značaja. U ovom radu su korišćena standardna podešavanja za pravljenje *mesh*-a od tetraedarskih elemenata uz ručno podešavanje dimenzija u oblastima gornjeg sloja oko elektroda.

Analiza osetljivosti na veličinu elemenata mreže. Za simulaciju čiji će rezultati biti predstavljeni u tabeli 2 smanjene su veličine za sve elemente mreže i to: po 10% i za minimalnu dimenziju i za maksimalnu dimenziju tetraedarskog elementa. Najveće procentualno odstupanje rezultata po apsolutnoj vrednosti iznosi 0,39%.

Uticaj tipa graničnih uslova osetljivosti na granicama domena. Za simulaciju čiji će rezultati biti predstavljeni u tabeli 2 izvršene su dve grupe simulacija, sa graničnim uslovima Dirihleovog tipa ($V=0$ V) i sa graničnim uslovima Nojmanovog tipa (granična površ predstavljena kao idealno izolovana). Iako u pojedinim slučajevima dolazi do značajnije razlike potencijala dobijenih u tački P1, kao i u tački P2, najveće procentualno odstupanje za R_a , koje je direktno srazmerno razlici potencijala u tačkama P1 i P2, iznosi samo 0,48%.

INTERPRETACIJA REZULTATA (FEM SIMULIRANIH) MERENJA

Za potrebe ovog rada napisan je program za izračunavanje parametara 2-slojnog modela tla na osnovu rezultata dobijenih simulacijama u FEM softveru. Program traži za takvim parametrima ρ_l , h i K za koje se postiže minimum funkcije

$$F(\rho_l, h, K) = \sum_{j=1}^n \left[\frac{\rho_a^{\text{mereno}}(a_j) - \rho_a^{\text{računato}}(a_j)}{\rho_a^{\text{mereno}}(a_j)} \right]^2 \quad (5)$$

gde je:

$\rho_a^{\text{mereno}}(a_j) - \rho_a$ dobijeno iz (FEM simuliranih) merenja Venerovom metodom, pri razmaku između elektroda a_j
 $\rho_a^{\text{računato}}(a_j) - \rho_a$ računato preko formule (3), za razmak između elektroda a_j i za vrednost parametara ρ_l , h i K (koji se iterativno menjaju)
 n – broj (FEM simuliranih) merenja Venerovom metodom za različite razmake između elektroda a_j

Za početne ulazne parametre: za ρ_l^0 je zadato ρ_a iz prvog merenja (sa najmanjim a_j), za h^0 vrednost najmanjeg a_j iz merenja i za K^0 vrednost -0,5 ili 0,5 u zavisnosti od toga da li ρ_a u merenjima sa porastom a opada ili raste, respektivno.

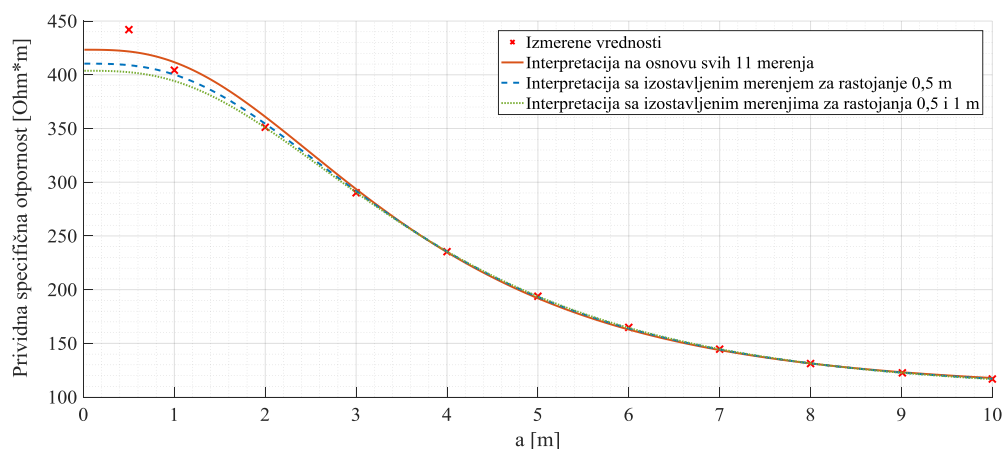
REZULTATI SIMULACIJA

Kod razmatranja razlike u rezultatima treba imati na umu da *mesh* nije isti za dva posmatrana slučaja: elektrode kao tačke, odnosno elektrode modelovane kao cilindri, što može da dovede do male razlike u rezultatima FEM simulacije.

Za prvi tip tla, kod koga je dubina gornjeg sloja tla 2,5 m, kao što se i očekivalo, klasična teorija (Venerova metoda i Davalibijeve metode interpretacije) daju dobre rezultate.

Kod tačkastih elektroda (tabele 1 i 3) primena tačnije formule (1) dovodi do tačnog rezultata, bilo da se kao minimalno rastojanje a uzme 1 m ili 0,5 m. U slučaju ovakvog tla nema potrebe vršiti merenja pri manjim rastojanjima a . Ilustracije radi, za ovaj slučaj su prikazane i vrednosti prividne specifične otpornost ρ_a koje se dobijaju primenom formule (2).

Primena štapnih elektroda dovodi do primetnije, iako još uvek prihvatljivo male, greške, kako je to prikazano u tabeli 4. Na slici 2 su prikazani rezultati izračunavanja parametara u programu u za sve tri varijante primene formule (1), korišćenjem svih 11 merenja za različite vrednosti rastojanja a , posle izostavljanja merenja na rastojanju 0,5 m, kao i posle izostavljanja merenja na rastojanjima 0,5 m i 1 m.

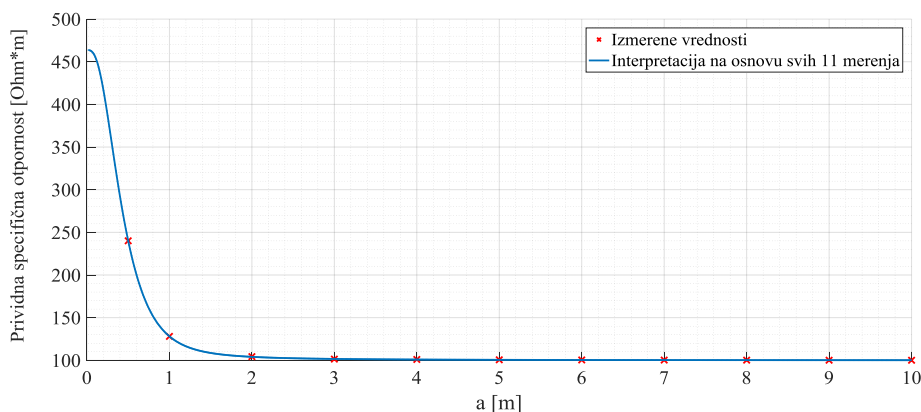


SLIKA 2 – Prikaz postupka određivanja parametara dvoslojnog tla $\rho_1 = 400 \Omega\text{m}$, $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$, $h_1 = 2,5 \text{ m}$

Za drugi tip tla, sa tankim gornjim slojem (0,3 m) velike specifične električne otpornosti (1000 Ωm), situacija je kvalitativno različita. Na slici 3 su prikazane tačke dobijene FEM simulacijom i kriva ρ_a u zavisnosti od a po formuli (3) nacrtana za parametre dobijene preko izraza (5): $\rho_1 = 463,72 \Omega\text{m}$, $h = 0,29 \text{ m}$ i $K = -0,645$. Rezultat je dobijen za tačkaste elektrode postavljene na dubini $b = 0,2 \text{ m}$. Pri minimizaciji sume kvadrata (5) korišćene su vrednosti za isti niz od 11 rastojanja a kao za prvi tip tla. Na slici se vidi da je u svim tačkama $a \geq 1 \text{ m}$ vrednost ρ_a bliska specifičnoj otpornosti donjeg sloja (100 Ωm). Zbog toga je kriterijumska funkcija malo osetljiva na ρ_1 , pa vrednost ovog parametra značajno odstupa od stvarnog (1000 Ωm). Kako bi se postigla odgovarajuća osetljivost, što predstavlja uslov da se mogu estimirati vrednosti parametara tla, učinjene su sledeće dve mere. Prvo, skup FEM simulacija je proširen na još dva rastojanja a (0,25 m i 0,75 m) i parametri ρ_1 , ρ_2 i h_1 određeni pomoću svih 13 (FEM simuliranih) merenja. Drugo, izvršeno je određivanje parametara posle izostavljanja tri najveća rastojanja a (8, 9 i 10 m), a zatim još tri (5, 6 i 7 m). Iz tabela 5 i 6 se vidi neophodnost uvođenja merenja na malim rastojanjima (manjim od 1 m). Uprkos približavanja vrednosti parametara dobijenih estimacijom stvarnim parametrima tla, odstupanja su značajna i ne mogu se karakterisati kao prihvatljiva.

Potreba za uvođenjem merenja na malim rastojanjima (manjim od 1 m) potvrđena je i na osnovu istraživanja ponašanja modela u kome su korišćene štapne elektrode (tabele 7 i 8). Dobijene karakteristike tla su bliže stvarnim nego u slučaju tačkastih elektroda (tabele 5 i 6), osim u slučaju 1 – interpretacija bez rastojanja $a < 1 \text{ m}$, što dodatno podržava prethodno navedenu konstataciju.

Razlog za to je što se u slučaju štapnih elektroda, kumulativno posmatrano, veći deo strujnih linija prostire kroz gornji sloj, zbog čega se kao krajnji efekat javlja značajniji uticaj parametara gornjeg sloja u kriterijumu koji se minimizira (izraz (5)). Na slici 4 su prikazane raspodele struja za slučaj da su elektrode na rastojanju $a = 1 \text{ m}$ i da je ukupna jačina struje 1 A; raspodela je data za oba razmatrana slučaja: da su elektrode tačkaste, na dubini 0,2 m, i da su elektrode štapne, pobijene na dubinu 0,2 m. Svaka strujnica na slici predstavlja istu vrednost struje, odnosno smanjenje rastojanja između strujnica odgovara većoj gustini struje.



SLIKA 3 – Rezultati (FEM simuliranih) merenja i kriva zavisnosti ρ_a dobijena preko izraza (5), za 11 rastojanja identičnih onima na slici 2, za dvoslojno tlo $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$, $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$, $h_1 = 0,3 \text{ m}$

TABELA 1 – Rezultati simulacije za $\rho_1 = 400 \Omega\text{m}$, $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$, $h_1 = 2,5 \text{ m}$, tačkaste elektrode na dubini $b=0,2 \text{ m}$

a [m]	P1 [V]	P2 [V]	R_a [Ω]	ρ_a [Ωm]*	ρ_a [Ωm **]
0,5	53,309	-50,758	104,067	326,935	400,346
1	29,142	-28,993	58,135	365,274	389,341
2	13,573	-13,554	27,127	340,893	346,766
3	7,573	-7,566	15,138	285,352	287,556
4	4,636	-4,638	9,275	233,098	234,114
5	3,065	-3,065	6,130	192,581	193,119
6	2,176	-2,176	4,352	164,049	164,367
7	1,645	-1,644	3,289	144,664	144,871
8	1,310	-1,310	2,620	131,699	131,843
9	1,088	-1,087	2,175	122,995	123,101
10	0,932	-0,932	1,864	117,096	117,178

* - po formuli (2)

** - po formuli (1)

TABELA 3 – Interpretacija rezultata iz tabele 1

	1	2	3
ρ_1 [Ωm]	379,45	399,74	398,42
ρ_2 [Ωm]	97,69	100,23	100,01
h [m]	2,61	2,48	2,49
Greška u odnosu na stvarne karakteristike			
$\Delta\rho_1$ [%]	-5,138	-0,065	-0,395
$\Delta\rho_2$ [%]	-2,31	0,23	0,01
Δh [%]	4,4	-0,8	-0,4

1 – po formuli (2), interpretacija bez tačke 0,5 m

2 – po formuli (1)

3 – po formuli (1), interpretacija bez tačke 0,5 m

TABELA 2 – Rezultati simulacije za $\rho_1 = 400 \Omega\text{m}$, $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$, $h_1 = 2,5 \text{ m}$, cilindrične elektrode pobodne na dubinu $b=0,2 \text{ m}$

a [m]	P1 [V]	P2 [V]	R_a [Ω]	ρ_a [Ωm]*	ρ_a [Ωm **]
0,5	57,503	-57,399	114,902	360,975	442,030
1	30,192	-30,172	60,364	379,281	404,271
2	13,736	-13,736	27,472	345,228	351,176
3	7,653	-7,622	15,275	287,925	290,149
4	4,661	-4,662	9,323	234,325	235,346
5	3,076	-3,078	6,154	193,332	193,872
6	2,182	-2,182	4,365	164,546	164,865
7	1,635	-1,648	3,283	144,379	144,585
8	1,305	-1,302	2,607	131,059	131,202
9	1,080	-1,083	2,163	122,448	122,553
10	0,929	-0,929	1,858	116,736	116,818

* - po formuli (2)

** - po formuli (1)

TABELA 4 – Interpretacija rezultata iz tabele 2

	1	2	3	4
ρ_1 [Ωm]	390,83	423,33	410,38	403,74
ρ_2 [Ωm]	98,13	102,29	100,39	99,45
h [m]	2,56	2,36	2,45	2,49
Greška u odnosu na stvarne karakteristike				
$\Delta\rho_1$ [%]	-2,293	5,833	2,595	0,935
$\Delta\rho_2$ [%]	-1,87	2,29	0,39	-0,55
Δh [%]	2,4	-5,6	-2	-0,4

1 – po formuli (2), interpretacija bez tačke 0,5 m

2 – po formuli (1)

3 – po formuli (1), interpretacija bez tačke 0,5 m

4 – po formuli (1), interpretacija bez tačaka 0,5 i

1 m

TABELA 5 – Rezultati simulacije merenja za $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$, $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$, $h_1 = 0,3 \text{ m}$ za sve elektrode modelovane kao tačke

a [m]	b=0 m				b=0,1 m				b=0,2 m			
	P1 [V]	P2 [V]	Ra [Ω]	ρ_a [Ωm]	P1 [V]	P2 [V]	Ra [Ω]	ρ_a [Ωm]	P1 [V]	P2 [V]	Ra [Ω]	ρ_a [Ωm]
0,25	230,46	-232,67	463,12	727,47	189,31	-165,05	354,37	681,63	92,27	-100,32	192,59	473,02
0,50	68,61	-70,91	139,52	438,31	55,36	-55,86	111,22	372,45	31,99	-30,42	62,41	240,09
0,75	25,37	-25,04	50,41	237,54	21,81	-21,80	43,62	211,77	15,04	-15,05	30,08	157,66
1	12,71	-12,16	24,87	156,27	11,34	-11,49	22,83	145,92	9,54	-9,57	19,12	128,03
2	4,17	-4,17	8,34	104,77	4,15	-4,15	8,30	104,76	4,08	-4,08	8,16	104,31
4	2,01	-2,01	4,02	101,00	2,01	-2,01	4,01	101,00	2,00	-2,00	4,00	100,98
6	1,33	-1,33	2,66	100,41	1,33	-1,33	2,66	100,41	1,33	-1,33	2,66	100,41
8	1,00	-1,00	1,99	100,18	1,00	-1,00	1,99	100,18	1,00	-1,00	1,99	100,18
10	0,80	-0,80	1,59	100,04	0,80	-0,80	1,59	100,04	0,80	-0,80	1,59	100,04

TABELA 6 – Interpretacija rezultata iz tabele 5

	b=0 m				b=0,1 m				b=0,2 m			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
ρ_1 [Ωm]	703,23	885,44	885,14	884	785,98	835,29	835,5	835,56	300,87	604,43	605,72	608,78
ρ_2 [Ωm]	99,6	99,6	99,52	99,17	99,89	99,91	99,96	99,97	99,83	100,52	100,8	101,47
h [m]	0,33	0,31	0,31	0,32	0,3	0,29	0,29	0,29	0,33	0,253	0,25	0,25
Greška u odnosu na stvarne karakteristike												
$\Delta\rho_1$ [%]	-29,68	-11,46	-11,49	-11,6	-21,4	-16,47	-16,45	-16,44	-69,91	-39,56	-39,43	-39,12
$\Delta\rho_2$ [%]	-0,4	-0,4	-0,48	-0,83	-0,11	-0,09	-0,04	-0,03	-0,17	0,52	0,80	1,47
Δh [%]	10	3,33	3,33	6,67	0	-3,33	-3,33	-3,33	10,00	-15,67	-16,67	-16,67

1 – interpretacija bez rastojanja $a < 1 \text{ m}$, 2 – interpretacija sa svih 13 merenja
 3 – interpretacija bez rastojanja $a = 8\text{--}10 \text{ m}$, 4 – interpretacija bez rastojanja $a = 5\text{--}10 \text{ m}$

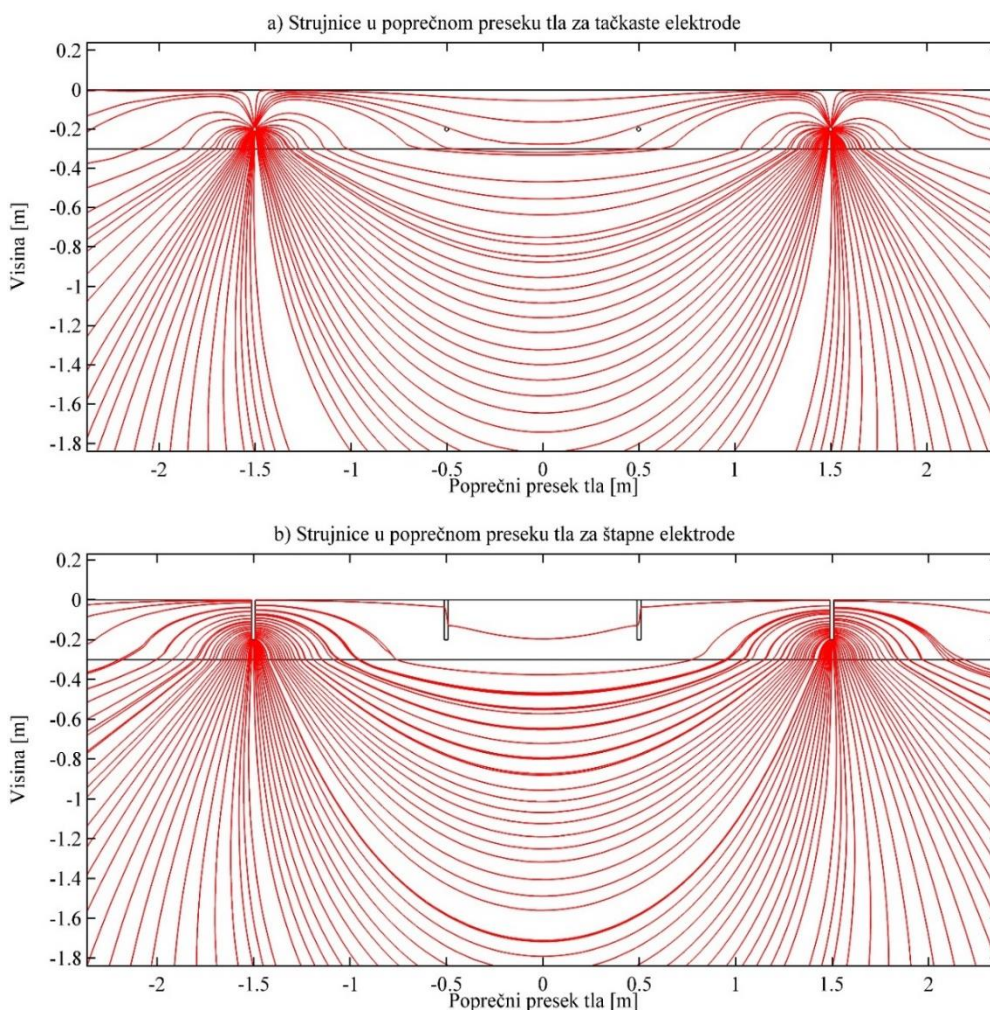
TABELA 7 – Rezultati simulacije merenja za $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$, $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$, $h_1 = 0,3 \text{ m}$ za sve elektrode modelovane kao cilindri pobodeni na dubinu b

a [m]	b=0,1 m				b=0,2 m			
	P1 [V]	P2 [V]	Ra [Ω]	ρ_a [Ωm]	P1 [V]	P2 [V]	Ra [Ω]	ρ_a [Ωm]
0,25	223,31	-223,33	446,64	859,11	160,73	-160,73	321,46	789,52
0,50	63,09	-62,98	126,08	422,18	50,26	-50,40	100,66	387,23
0,75	23,67	-23,67	47,33	229,80	20,12	-20,12	40,23	210,85
1	11,89	-11,60	23,49	150,13	11,02	-10,93	21,95	146,98
2	4,18	-4,32	8,50	107,24	4,17	-4,18	8,34	106,64
3	2,70	-2,70	5,40	101,96	2,72	-2,71	5,43	103,08
4	2,05	-2,04	4,09	102,99	2,03	-2,01	4,04	102,08
5	1,62	-1,62	3,23	101,58	1,61	-1,62	3,24	101,91
6	1,37	-1,35	2,72	102,75	1,19	-1,45	2,64	99,76
7	1,12	-1,11	2,24	98,48	1,14	-1,14	2,28	100,31
8	1,00	-1,00	1,99	100,19	0,92	-1,05	1,97	98,88
9	0,88	-0,89	1,77	99,83	0,78	-0,98	1,76	99,39
10	0,78	-0,79	1,57	98,68	0,79	-0,79	1,58	99,04

TABELA 8 – Interpretacija rezultata iz tabele 7

	b=0,1 m				b=0,2 m			
	1	2	3	4	1	2	3	4
ρ_1 [Ωm]	410,43	1064,3	1071,2	1076,6	367,81	986,18	992,53	998,33
ρ_2 [Ωm]	99,86	100,22	101	101,85	99,57	100,22	101,09	102,15
h [m]	0,37	0,29	0,28	0,28	0,38	0,28	0,29	0,28
Greška u odnosu na stvarne karakteristike								
$\Delta\rho_1$ [%]	-58,96	6,43	7,12	7,66	-63,22	-1,38	-0,75	-0,17
$\Delta\rho_2$ [%]	-0,14	0,22	1,00	1,85	-0,43	0,22	1,09	2,15
Δh [%]	23,33	-3,33	-6,67	-6,67	26,67	-6,67	-3,33	-6,67

1 – interpretacija bez rastojanja $a < 1$ m, 2 – interpretacija sa svim merenjima
 3 – interpretacija bez rastojanja $a = 8-10$ m, 4 – interpretacija bez rastojanja $a = 5-10$ m



SLIKA 4 – Rezultati FEM simulacije za tlo $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$, $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$, $h_1 = 0,3$ m i elektrodu na 0,2 m od površi tla za: a) tačkaste i b) štapne elektrode; u oba slučajja za $a = 1$ m

ZAKLJUČAK

U radu je analizirana primena klasičnih formula i postupaka, ustanovljenih od strane Venera pre više od jednog veka i kasnijih metoda razvijenih od strane Davalibija, na slučaju specifičnog pustinskog tla, karakterisanog tankim površinskim slojem velike specifične električne otpornosti. Ovo je slučaj u kome pretpostavke pod kojima su Vener i Davalibi razvili svoje formule i postupke postaju upitne. Analize u radu su vršene primenom metode konačnih elemenata (FEM), koja je korišćena za izračunavanje zapreminske raspodele jednosmerne

struje i potencijala. Ona se pokazala kao relativno jednostavna i stabilna, za razliku od drugih fizika kao što je mehanika fluida [7].

Na osnovu rezultata analize za dva 2-slojna tla: 1) tlo u kome važe pretpostavke koje su koristili Vener i Davalibi $\rho_1 = 400 \Omega\text{m}$ ($h = 2,5 \text{ m}$) i $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$, i 2) tlo sa velikom otpornošću i malom debljinom gornjeg sloja: $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$ ($h = 0,3 \text{ m}$) i $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$, zaključuje se da formula (1) dovodi do tačnijih rezultata od uprošćene formule (2). U prošlosti je bilo smisla koristiti uprošćenije formule, ali na današnjem stanju računarskih resursa i alata taj se smisao izgubio.

Sledeći zaključak je da rastojanja a na kojima se vrše merenja treba podešavati prema debljini gornjeg sloja. Što je debljina gornjeg sloja manja, treba početi od manjih vrednosti a . Dok je kod tla prvog tipa ($h = 2,5 \text{ m}$) bilo dovoljno krenuti od $a = 1 \text{ m}$, kod tla drugog tipa, sa ekstremno malom debljinom gornjeg sloja ($h = 0,3 \text{ m}$) potrebno je izvršiti (FEM simulirana) merenja i za mala rastojanja a (0,25 m, 0,5 m i 0,75 m), kako bi se imale tačke koje su prikladne za postupak estimacije parametara u izrazu (5). Pored analize dvoslojnog tla $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$ ($h = 0,3 \text{ m}$) i $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$, čiji su rezultati prikazani u radu, izvršene su FEM simulacije i estimacija parametara tla za tlo proračuni za $\rho_1 = 3000 \Omega\text{m}$ ($h = 0,3 \text{ m}$) i $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$. U radu je pokazano da kod tla sa $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$ izostavljanje rezultata (FEM simuliranih) merenja za veća rastojanja (5-10 m), iako se time dodatno povećava osetljivost kriterijumske funkcije koja se minimizira (5), ne dovodi do povećanja tačnosti dobijenih rezultata za ρ_1 i h . Za razliku od toga, kod tla sa $\rho_1 = 3000 \Omega\text{m}$, za isti skup rastojanja $a = 0,25\text{-}10 \text{ m}$, greška estimacije ρ_1 se značajno smanjila, sa -35,49% na 23,81%, posle izostavljanja rezultata merenja za tri najveća rastojanja, odnosno na -7,74 % posle izostavljanja rezultata merenja za šest najvećih rastojanja.

Konačno, kod drugog tipa specificiranog tla pokazalo se da modelovanje stvarnog oblika štapnih elektroda koje se pobijaju u tlo, umesto tačkastih, korišćenih u teorijskim postavkama Venera i Davalibija, dovodi do poboljšanja rezultata.

Konačan zaključak je da se merenja mogu vršiti na standardan način, pomoću štapnih elektroda pobodenih 20 mm u tlo, ali se mora voditi računa o tome da se rastojanja između elektroda pri kojima se vrše merenja prilagode karakteristikama tla. Odluka o tome se može doneti na bazi krivih promene ρ_a dobijenih iz merenja sa rastojanjima između elektroda od 1-5 m (videti slike 2 i 3).

Plan daljeg rada je da se saznanja prikazana u ovom radu primene na rezultate merenja u pustinjskim predelima na Bliskom istoku [5] i time poboljša tehnika realizacije uzemljenja u specifičnim i uslovima postavljanja u tlo sa velikom specifičnom električnom otpornošću tankog površinskog sloja tla. Tačna identifikacija karakteristika gornjeg sloja je bitna za određivanje raspodele potencijala na površi tla, a samim tim i na vrednosti napona dodira i koraka. Pored toga, proverice se i očekivanje da ovakav gornji sloj nema toliko značajan rezultat na otpornost uzemljivača kao što utiče na napon dodira i koraka.

LITERATURA

- [1] F. Wenner, „A Method of measuring Resistivity“, Natinola Bureau of Standards, Scientific Paper 12, N0. S-258, 1916, p. 499
- [2] IEEE guide for safety in AC substation earthing, IEEE Standard 80-2000, 2000.
- [3] F. Dawalibi, „Transmission Line Grounding“, EPRI Research Project 1494-1, Final Report EL 2699, Oct. 1982.
- [4] F. Dawalibi, C. J. Blattner, „Earth Resistivity Measurement Interpretation Techniques“, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol: PAS-103, Issue: 2, Feb. 1984.
- [5] Z. Radakovic, M. Jovanovic, V. Milosevic, N. Ilic, „Application of Earthing Backfill Materials in Desert Soil Conditions“, IEEE Transection on Industry Applications (Special Issue on Grounding Systems), Vol. 51 (2015), Issue 6, pp. 5288-5297 (DOI: 10.1109/TIA.2015.2424688)
- [6] COMSOL Multiphysics Reference Manual, Version 5.5, COMSOL AB, 2019.
- [7] S. Stanišić, M. Jevtić, M. B. Das, Z. Radaković, „FEM CFD versus lumped thermal model of kiosk substation with the oil immersed distribution transformer“, Facta Universitatis, Series: Electronics and Energetics, Vol. 31 (2018), No 3, 411-423 (DOI 10.2298/FUEE1803411S)