

# PRIMENA MODERNIH FEM SOFTVERA ZA ODREĐIVANJE OTPORA UZEMLJENJA, NAPONA DODIRA I NAPONA KORAKA

S. STANIŠIĆ, Informatika a.d., Srbija  
Z. RADAKOVIĆ, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Srbija

## 1. UVOD

U poslednjih nekoliko godina, softveri zasnovani na metodi konačnih elemenata (Finite Element Method – FEM) postali su pristupačni i sve su rasprostranjeniji u rešavanju različitih inženjerskih problema. Može se reći da je pojava ovakvih softvera doprinela velikom pomaku u raznim oblastima inženjerske prakse, jer je zasnovana na rešavanju osnovnih jednačina fizičkih procesa. Softveri bazirani na metodi konačnih elemenata najčešće su "multiphysics" tipa i njima se obično mogu rešavati različiti procesi (raspodela električnog i magnetnog polja, hidraulički problemi, prenos toplote, mehanika itd.). Time se u izvesnoj meri prevazilazi potreba za specijalizovanim programima u pojedinačnim inženjerskim oblastima.

U radu se prikazuje primena FEM softvera na rešavanje raspodele potencijala u tlu u koje je postavljen uzemljivač. Osnovne veličine koje su od interesa za sisteme uzemljenja su: otpor uzemljenja, napon dodira i napon koraka. U jednoj od naših prethodnih publikacija [1] je dat prikaz kompletne procedure za proveru bezbednosti pri nastanku zemljospoja u elektrodistributivnim mrežama. U ovom radu akcentat je na primeni FEM softvera za određivanje otpora uzemljenja ( $R_g$ ) i relativne vrednosti potencijalnih razlika dodira ( $E_d$ ) i koraka ( $E_k$ ) u odnosu na potencijal uzemljivača prema udaljenoj referentnoj tački – napon uzemljivača ( $U_u$ ):  $k_{dT} = E_t / U_u$  i  $k_{dS} = E_s / U_u$ .

U radu se prikazuju rezultati proračuna za nekoliko tipičnih topologija uzemljivača realne geometrije, postavljenih u homogeno i u dvoslojno tlo, u cilju prikaza ogromnih praktičnih mogućnosti koje pruža primena FEM softvera u inženjerskoj praksi uzemljenja.

## 2. UVODNA TEORIJSKA RAZMATRANJA

U standardima i priručnicima za projektovanje se za niz realnih uzemljivača mogu naći formule za proračun otpora uzemljenja, napon dodira i koraka.

### 2.1. Formule za otpor uzemljenja

U radu su korišćene sledeće poznate i široko rasprostranjene formule za izračunavanje otpora rasprostiranja uzemljivača koji se nalazi u homogenom tlu specifične električne otpornosti  $\rho$ : za cevni uzemljivač (sa gornjim bazisom u visini površine tla) formula (59) iz [2], za konturni uzemljivač formule (62.2) do (62.4) iz [3], Sverakova formula za uzemljivačku pravougaonu mrežu [2], Schwarz-ova formula za uzemljivačku pravougaonu mrežu [4] i Schwarz-ova formula za ukupan otpor uzemljivačke pravougaone mreže u kombinaciji sa cevima [4].

### 2.2. Formule za računanje napona dodira i koraka

Prema IEEE standardu [2], teorijska osnova za određivanje napona dodira (napona između stopala i ruke), kao rezultat proticanja struje kvara kroz uzemljivač, zasniva se na primeni Tevenenove teoreme. Ekvivalentni Tevenenov generator je priključen između tačke stajanja i tačke dodira (slika 1). Na slici 2 je prikazana ekvivalentna šema po kojoj se izračunava napon dodira. Potencijalna razlika dodira je jednaka naponu između tačke stajanja i tačke dodira, ali u slučaju da osoba prikazana na slici 1 nije u dodiru sa uzemljivačem (ovaj napon će se označiti kao potencijalna razlika dodira -  $E_d$ ).  $E_d$  je jednak razlici potencijala uzemljivača i potencijala tačke na površini tla u kojoj osoba stoji. Za određen broj topologija uzemljivača u literaturi postoje relativno jednostavni i relativno tačni analitički izrazi za izračunavanje napona uzemljivača i potencijala tačke na površini tla u kojoj osoba stoji; druga mogućnost za određivanje ovih potencijala je primena specijalizovanih softvera ili generalnih softvera baziranih na FEM metodi.

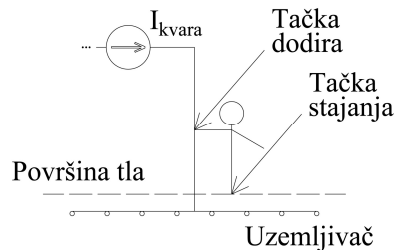
Na slikama 1 i 2 pojedini simboli imaju sledeća značenja:

$E_d$  – potencijalna razlika dodira

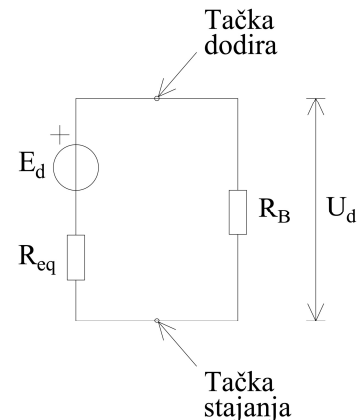
$U_d$  – napon dodira

$R_B$  – otpor tela čoveka, po našim propisima 1000  $\Omega$ .

$R_{eq}$  – Ekvivalentni otpor između uzemljenog objekta i tačke na površini tla.



Slika 1 - Napon kome je izložena osoba pri zemljospoju



Slika 2 - Zamenska šema za izračunavanje napona između ruke i stopala pri zemljospoju (slika 1)

Prema standardu [2], otpor  $R_{eq}$  jednak je polovini prelaznog otpora kružne ploče (otpora između površi ploče i udaljene referentne tačke) kojom se modeluje jedno stopalo ( $R_F$ ):  $R_{eq} = R_F/2$ . Ova uprošćena metoda je prihvatljiva sa praktičnog stanovišta, a u skladu je i sa Tevenenovom teoremom - Tevenenov otpor  $R_{eq}$  je jednak paralelnoj vezi dva otpora koja se vidi posmatrano iz tačaka dodira i stajanja: 1)  $R_1$  - između dva stopala i uzemljivača i 2)  $R_2$  - redna veza otpora

(impedanse) sistema od tačke dodira do referentne zemlje i od tačke stajanja do referentne zemlje. Imajući u vidu realne vrednosti pojedinačnih impedansi, 1) otpor  $R_2$  je približno jednak prelaznom otporu dva stopala, dok  $R_2$  ima veliku vrednost, pa se ova paralelna grana može zanemariti. Prema [2],  $R_F = \rho/(2 \cdot D)$ , gde je  $\rho$  specifična otpornost tla (pretpostavlja se da je tlo homogeno), a  $D=0.16$  m prečnik kružne ploče kojom se modeluje stopalo. Relativna dostupnost opštih softvera baziranih na FEM metodi omogućava širem krugu inženjera i istraživača da se bave istraživanjem i proverom osnovnih postavki modela iz [2]. Pre više od 25 godina Dawalibi i njegovi saradnici [5] su vršili jednu takvu analizu korišćenjem sopstvenog softvera. Pokazano je da je  $R_{eq}$  približno jednako prelaznom otporu dva paralelno vezana stopala u slučajevima homogenog tla, ali da u slučaju dvoslojnog tla dolazi do značajnog odstupanja. Odstupanja su veća (iznose 65.6%) za slučaj da je otpornost gornjeg sloja, debljine 0.6m, manja od otpornosti donjeg sloja. Slučaj iz [5] je uzet kao referentni primer za primenu FEM metode i softvera, jer su postojali rezultati sa kojim su se mogli uporediti. Detaljni prikaz rezultata primene FEM-a, koji su bliski rezultatima objavljenim u [5], planiran je za objavljivanje u narednim publikacijama autora. Jedan od značajnih elemenata postupka iz [2] je usvajanje pretpostavke da je otpor dva paralelno vezana stopala jednak polovini otpora jednog stopala. Rezultati ove analize i poboljšanje formule za otpor jednog stopala, kao i otpor dva paralelno vezana stopala usled međusobnog uticaja stopala će biti prikazani u narednoj publikaciji.

Pored navedenog, u literaturi i standardima postoje različiti pristupi u pogledu načina određivanja otpornosti  $R_B$  (konstantna vrednost ili zavisna od napona dodira), kao i uvažavanju otpora obuće. U pristupu u [2] zanemaruje se prelazni otpor između ruke i elektroprovodnih delova povezanih sa uzemljivačem, kao i otpor obuće prema tlu.

### 2.3. Formule za računanje potencijalnih razlika dodira i koraka na osnovu geometrije uzemljivača

U standardnoj inženjerskoj praksi koja je prethodila pojavi modernih FEM alata, razvijene su analitičke formule, u kojima su figurisali koeficijenti koji se određuju iz jednačina, očitavanjem sa grafika ili iz tabela, pomoću kojih je za niz realnih uzemljivačkih sistema bilo moguće odrediti potencijalnu razliku dodira i potencijalnu razliku koraka, u definisanim tačkama ili njihove maksimalne vrednosti u definisanom domenu. U standardu [2] se mogu naći izrazi za maksimalne vrednosti napona dodira i koraka za uzemljivačku mrežu, sa ili bez vertikalnih elemenata. Formule ovog tipa imaju ograničenu tačnost i postoje za ograničen skup topologija uzemljivača,

njihovih dimenzija i karakteristika tla. Pored toga, postoje i namenski računarski programi, poput CYME GRID, kojima se može odrediti raspodela struja i potencijala u tlu i na površi tla. Primenom ovakvih programa, na niz slučajeva, a potom obradom dobijenih vrednosti, formirane su gore pomenute analitičke formule i koeficijenti u grafičkoj ili tabelarnoj formi.

### 3. OPIS FEM MODELOVANJA

Za sve FEM simulacije u ovom radu je korišćen softver *COMSOL Multiphysics* i odgovarajući modul *AC/DC – Electric Currents* (ec). Modelovanje i izvođenje simulacija u ovom softveru se sastoji iz četiri koraka:

1. pravljenje geometrije razmatranog primera u grafičkom editoru,
2. tzv. zadavanje fizike, tj. graničnih uslova i materijala,
3. pravljenje *mesh*-a,
4. izvođenje same simulacije.

Nakon izvođenja simulacije sledi obrada rezultata, tj. definisanje željenih podataka i načina njihovog prikaza.

#### 3.1. Geometrija

Model ima dva dela: sam uzemljivač i okolni domen koji predstavlja zemljište oko uzemljivača. Uzemljivač je modelovan kao šupljina u okolnom zemljištu, jer raspodela polja unutar samog uzemljivača nije od značaja. Okolni domen je formiran u obliku polulopte (ravan deo predstavlja površinu tla), sa ciljem da se struja u simulaciji ravnomerno širi u prostor oko uzemljivača (kao što bi to bilo i u realnom zemljištu). Činjenica je da bi poluelipsoid predstavljao prirodniji domen za slučaj da uzemljivač sadrži vertikalne elemente, ali se može usvojiti i polusfera, ukoliko je dovoljno velikog poluprečnika. Jedan od koraka optimizacije modela (smanjenje broja čvorova i posledično smanjenje potrebnih računarskih resursa) je usvajanje poluelipsoida umesto polulopte. Veličina poluprečnika polulopte je odabrana upoređivanjem rezultata serije simulacija, za niz različitih poluprečnika. Iz serije simulacija se vidi se da je potrebno napraviti dovoljno veliki domen da bi pad napona koji pravi struja kvara koja se odvodi sa uzemljivača počeo asimptotski da teži nekoj vrednosti. Oko opisanog polusfernog domena je dodat i takozvani *infinite* domen – ljuska konačne debljine koja imitira rasprostiranje domena do u beskonačnost. Uvođenje infinite domena granična površina polusfere ostatak tla „vidi“ kao beskonačan, iako je ljuska infinite domena konačne debljine. Za dvoslojnu predstavu zemljišta bi se samo unela horizontalna ravan razgraničenja gornjeg od donjeg sloja na odgovarajućoj dubini, odnosno daljini od ravne površine polulopte i u delu iznad i ispod ravni razgraničenja unele specifične električne otpornosti gornjeg i donjeg sloja, respektivno. Ukoliko postoji simetrija uzemljivača (a samim tim i simetrija u raspodeli struje kvara), domen je moguće podeliti tako da se vrši simulacija samo za umanjen model (polovinu/četvrtinu/osminu itd.) čime se štedi vreme i značajno smanjuju potrebni računarski resursi.

#### 3.2. Zadavanje fizike i materijala

Zadavanje fizike se vrši tako što se dodaju granični uslovi za zapremine, površine i tačke. Na početku pravljenja modela, automatski su zadati uslovi: *current conservation* – uslov da nema „nestajanja“ struje unutar granica modela i odnosi se na celokupnu zapreminu modela, *electric insulation* – uslov kojim se površine obeležavaju kao idealno neprovodne i *initial values* – početni uslovi za električni potencijal (na primer vrednost 0 V za sve tačke modela). Inicijalni uslov za neprovodne površine u softveru važi za sve spoljašnje površine modela. Međutim, kada se uslov *ground* zada za sve granice polulopte osim gornje (uslov da referentna zemlja uvek ima konstantnu vrednost potencijala 0 V) on tada „prepisuje“ uslov *electric insulation* na tim površinama. Na taj način uslov o neprovodljivosti ostaje aktivan samo na gornjoj površini. Poslednji uslov koji se dodaje je *terminal*. On se zadaje na površinama koje u modelu služe za unošenje struje ili napona, tj. za injektiranje struje kvara sa površina šupljina koje predstavljaju provodnike. U svim testovima u ovom radu je korišćena struja od 1 A, iz sasvim jednostavnog razloga da je tada dobijeni napon uzemljivača jednak otporu rasprostiranja. Napon pri bilo kojoj drugoj struji odvođenja sa uzemljivača je jednak naponu dobijenom množenjem napona iz FEM simulacije i te realne struje.

S obzirom na to da su elektrode materijala u modelu šupljine, njima nisu dodeljivane nikakve materijalne osobine. Ostatku modela su dodeljene specifične otpornosti zemljišta koje se modeluje.

#### 3.3. Pravljenje mesh-a

Mesh predstavlja elemente na koje se deli domen, a za koje FEM softver automatski postavlja i rešava fizičke jednačine. Postoje razne opcije i mnogo načina da se napravi mesh. U radu je za oblik elemenata odabran tetraedar kao najstandardniji i najčešće korišćen oblik za različite fizičke pojave modelovane u FEM softveru. Bitno je da mesh bude dovoljno sitan u oblastima u neposrednoj okolini provodnika uzemljivača. Takođe je, ukoliko računarski resursi to dopuštaju, zgodno da elementi mesh-a budu što manji u oblasti od površine

elektroda do površine tla (da bi se dobila što tačnija predstava o potencijalima tačaka na površini iznad uzemljivača). Mesh je sve krupniji kako se udaljava od uzemljivača, jer je gradijent potencijala sve manji, a raspodela struje i potencijala u udaljenim tačkama od manjeg značaja. Valja pomenuti problem izvođenja FEM simulacija kod većih i komplikovanijih uzemljivačkih sistema, jer zbog većih dimenzija broj mesh elemenata raste. Posledica povećanja broja elemenata mesh-a je znatno duže vreme trajanja simulacija i potreba za većim računarskim resursima u vidu veličine i brzine RAM memorije.

### 3.4. Izvođenje simulacije

Ovde nema naročitih komentara, osim da je odabran režim koji odgovara stacionarnom stanju, tj. određuje se otpor uzemljivača kada kroz njega protiče jednosmerna struja. Dakle, u ovom radu nije tretiran tranzijentni otpor rasprostiranja uzemljivača.

## 4. PRIMERI PRIMENE

### 4.1. Elementarni oblici uzemljivača: cev u homogenom tlu

Pregledom literature smo pronašli da za ovaj oblik uzemljivača postoji samo formula (1), za cev postavljenu u homogeno tlo i pobodenu tako da joj je gornji bazis u nivou površine tla. Formule za izračunavanje maksimalne vrednosti potencijalne razlike dodira i potencijalne razlike koraka, za homogeno i dvoslojno tlo, koje važe za mrežne i za kombinovane uzemljivače kod kojih dužina pojedinačnih vertikalnih elemenata nije veća od 3 m su objavljene u [6].

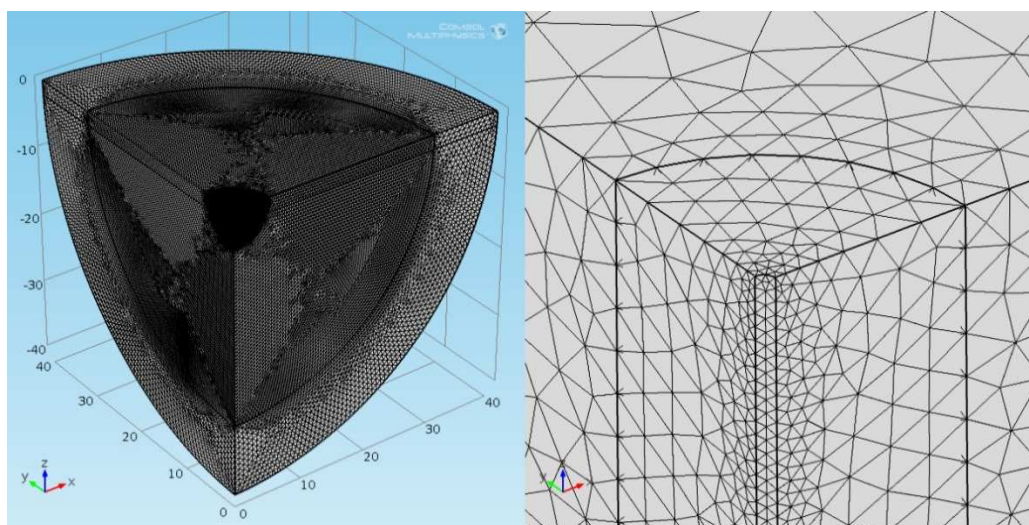
Kao primer je uzeta cev dužine  $L=3.6$  m i prečnika kružnog poprečnog preseka  $d=19$  mm u homogenom tlu specifične otpornosti  $\rho=100 \Omega\text{m}$ . Na slici 3 je, ilustracije radi, prikazan formirani mesh. Iz formule za cevni uzemljivač se za otpornost dobija vrednost  $R_c=27.96 \Omega$ . Primenom FEM softvera se za otpornost cevi dobija  $R_c=27.7 \Omega$  (obzirom da su proračuni rađeni za struju kroz uzemljivač 1A, vrednost otpora je jednaka vrednosti  $U_u$ ). Ovi podaci (zajedno sa izračunatim vrednostima potencijalnih razlika dodira i koraka iz FEM-a) prikazani su u tabeli 1. U tabeli 1, kao i u ostalim tabelama u radu, date su maksimalne vrednosti potencijalne razlike dodira i koraka.

TABELA 1 – Vrednosti za cevni uzemljivač u homogenom tlu ( $L=3.6$  m,  $d=19$  mm,  $\rho=100 \Omega\text{m}$ )

	$R_c$ [ $\Omega$ ], $U_u$ [V]	$E_d$ [V]	$E_k$ [V]	$k_{dt}$ ( $E_d/U_u$ )	$k_{ds}$ ( $E_k/U_u$ )
Formule iz standarda [2]	27.96	/	/	/	/
FEM	27.7	24.16*	19.18**	0.87	0.69
Odstupanje [%]	-0.93	/	/	/	/

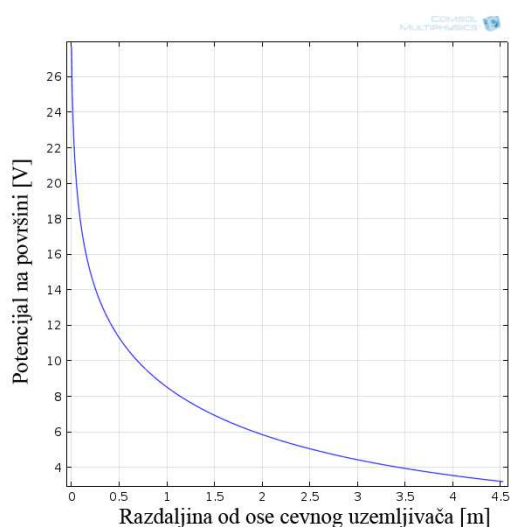
\* - Stajna tačka na 4 m od ose cevi

\*\* - Stajne tačke na 0 m i 1 m od ose cevi

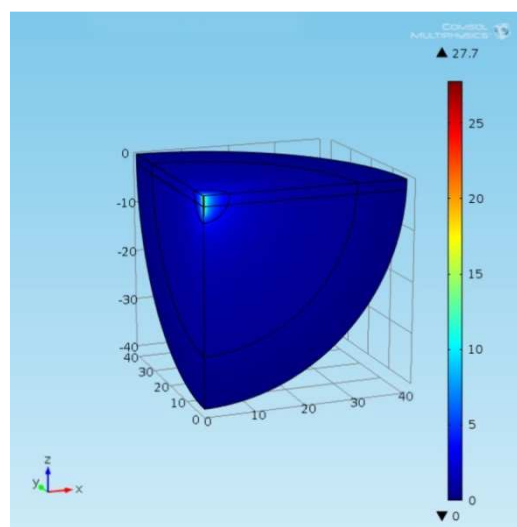


Slika 3 - Prikaz mesh-a na primeru cevnog uzemljivača; sa leve strane je prikazan čitav domen, a sa desne uvećan deo u okolini gornjeg bazisa cevi na površini tla

Na slici 4 je prikazana raspodela potencijala na površini tla duž rastojanja od ose cevi. Iz nagiba promene potencijala se jasno vidi da će potencijalna razlika koraka biti najveća za tačke na rastojanjima 0 i 1 m od ose cevi. Što se tiče potencijalne razlike dodira, sa slike se jednostavno zaključuje da će on rasti sa porastom rastojanja izloženih elektroprovodnih delova opreme od mesta ukopavanja cevi. U tabeli 1 je navedena vrednost za potencijalnu razliku dodira pod pretpostavkom da oprema ne može biti udaljenija više od 4 m od ose cevi. Na slici 5 je prikazana raspodela potencijala (potencijal po domenu, gde je referentna zemlja na nultom potencijalu; na slici se vidi se da se skoro čitav pad napona dešava u prvih desetak metara), koja se dobija kao rezultat primene FEM softvera i iz koga se jednostavno dolazi do raspodele potencijala na površi tla, a time i do potencijalne razlike dodira i potencijalne razlike koraka, kao i faktora  $k_{dt}$  i  $k_{ds}$ . Na razmatranom jednostavnom primeru uzemljivača se može naslutiti nivo detalja proračuna električnog polja i raspodele potencijala, koji mogu da budu korisni za razumevanje pojave. Vizuelizacija može da posluži za odabir optimalne konfiguracije uzemljivača. Činjenica je da FEM softver nije potreban ako postoje analitičke formule za relevantne karakteristike uzemljivača. Osnovna prednost FEM softvera je da se mogu vršiti proračuni za proizvoljnu konfiguraciju uzemljivača i karakteristike tla, pri čemu se ne očekuju ozbiljna ograničenja i problemi sa konvergencijom. Drugim rečima, oni se nameću kao ozbiljna opcija ukoliko se razmatra uzemljivač za koji ne postoje analitičke formule, ili su geometrijske karakteristike takve da ispadaju iz opsega važenja analitičkih formula.



Slika 4 – Potencijal na površini tla u zavisnosti od udaljenosti od ose cevnog uzemljivača



Slika 5 – 3D prikaz promena potencijala po zapremini domena

#### 4.2. Elementarni oblici uzemljivača: kvadratna kontura u homogenom tlu

Za ovaj primer je uzet uzemljivač u obliku kvadratne konture veličine  $a \times b = 5 \times 5$  metara, poprečnog preseka trake  $p \times q = 40 \times 4 \text{ mm}^2$ , ukopana na dubini  $h = 0.6 \text{ m}$  u homogeno zemljište specifične otpornosti  $\rho = 100 \Omega \text{m}$ .

U tabeli 2 su prikazane vrednosti koje se dobijaju primenom formula za otpor uzemljenja iz [3] i postupka za potencijalne razlike dodira i potencijalne razlike koraka iz standarda [2], kao i iz FEM simulacija.

TABELA 2 – Uporedni rezultati za konturni uzemljivač u homogenom tlu

	$R_c [\Omega], U_u [V]$	$E_d [V]$	$E_k [V]$	$k_{dt} (E_d/U_u)$	$k_{ds} (E_k/U_u)$
Formula (1)	8.58	3.56	2.02	0.41	0.24
FEM	8.89	3.42* / 4.79**	1.85***	0.38* / 0.54**	0.21***
Odstupanje [%]	3.61	-3.93 / 34.55	-8.42	-7.32 / 31.71	-12.5

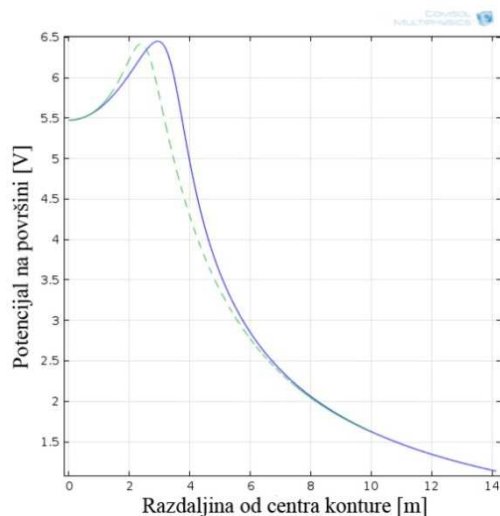
\* - Stajna tačka u centru konture

\*\* - Stajna tačka 4.54 m od centra konture idući po dijagonali (ugao se nalazi u tački 3.54 m)

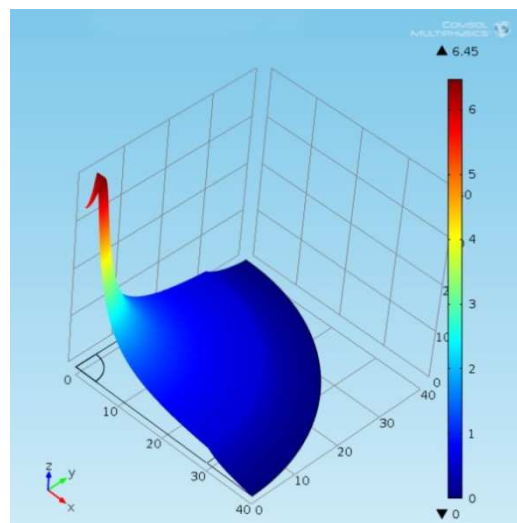
\*\*\* - Najveća potencijalna razlika koraka, između tačaka 3.4 m i 4.4 m od centra konture idući po dijagonali

Na slici 6 je data promena potencijala na površi tla iznad konturnog uzemljivača za struju 1 A, od centra konture a) u pravcu normale od centra konture ka stranici (zelena linija) b) u pravcu po dijagonali (plava linija).

U tabeli 2 su date dve vrednosti za potencijalne razlike dodira, za stajne tačke u centru konture i 1 m izvan konture idući po dijagonali. Na slici 7 je prikazana 3D zavisnost raspodele potencijala na površini tla iznad konture, kao zavisnost vrednosti potencijala od x i y koordinate.



Slika 6 – Potencijal na površini zemlje u zavisnosti od razdaljine od centra konture idući po normali (isprekidano) i po dijagonali (puna linija) u odnosu na stranice konture



Slika 7 – Potencijal na površini zemlje iznad konture posmatrano u visinskoj 3D predstavi

#### 4.3. Uzemljivač za transformatorske stanice 10/0.4kV u urbanim sredinama

U ovom primeru analiziran je uzemljivač za transformatorske stanice 10/0.4 kV, koji se instalira u urbanim sredinama, sa kablovskom mrežom, preuzet iz [7]. Ovaj uzemljivač (prikazan na slici 8) sastoji se iz spoljne pravougaone konture veličine 10×9 metara i tri poprečne trake na međusobnom rastojanju 2.5 m. Traka je preseka 40×4 mm<sup>2</sup> i ukopana na dubini h=0.6 m. U uglovima spoljne konture su pobodene 4 cevi prečnika d=19 mm i dužine L=9.6 m, sa gornjim bazisom spojenim sa konturom.

Rezultati proračuna pokazuju da je Sverak-ova formula manje tačna u odnosu na Schwarz-ovu, kao i da je vrednost otpora dobijenog pomoću svake od formula manja od vrednosti koju daje FEM i koja se može smatrati tačnom (referentnom). Potencijalne razlike dodira i koraka su računati za stajnu tačku 1 m van spoljne konture u pravcu dijagonale, pri čemu se pri proračunu potencijalne razlike koraka drugo stopalo nalazi iznad ugla spoljne konture.

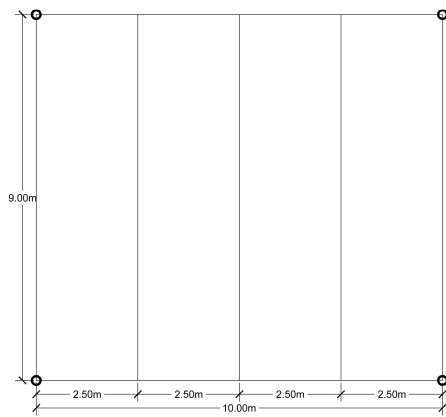
Na slici 9 je prikazana promena potencijala tačaka na površini tla za slučaj homogenog tla i to od centra mreže po normali na kraću stranicu konture (plava tačkasta linija), po normali na dužu stranicu konture (zelena isprekidana linija) i po dijagonali mreže (crvena puna linija). Za sva tri pravca je prikazana zavisnost potencijala sa rastojanjem od centra do 1 m udaljenosti izvan konture idući po odgovarajućoj liniji.

TABELA 3 – Uporedni rezultati za mrežni uzemljivač u jednoslojnom zemljištu

	$R_c$ [ $\Omega$ ], $U_u$ [V]	$E_d$ [V]	$E_k$ [V]	$k_{dt}$ ( $E_d/U_u$ )	$k_{ds}$ ( $E_k/U_u$ )
Sverak-ova formula	5.16	0.36	0.71	0.07	0.14
Schwarz-ova formula	3.86			0.09	0.18
FEM	3.02	0.25* / 0.92**	0.41**	0.08* / 0.3**	0.14**
Odstupanje [%]	-41.47/-21.76	-30.56* / 155.6**	-42.25**	/	/

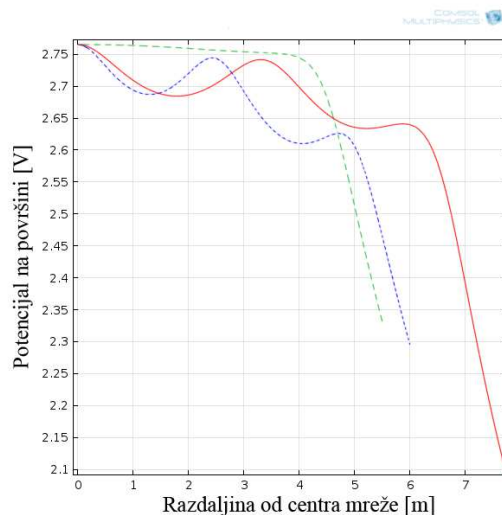
\* - Stajna tačka u centru konture

\*\* - Stajna tačka za potencijalnu razliku dodira 1 m van spoljne konture u pravcu dijagonale, a za potencijalnu razliku koraka je prvo stopalo iznad ugla konture, a drugo kao za potencijalnu razliku dodira



Slika 8 – Izgled mrežnog uzemljivača sa cevima u uglovima

Sledeći slučaj na koji je primenjen FEM je isti uzemljivač postavljen u isto tlo, samo što je nasut sloj  $\rho_s=2000 \Omega\text{m}$  debljine  $h_s=10 \text{ cm}$ . Raspodela potencijala na površini tla je približno ista kao da nasipanja nema. Poznato je da se nasipanjem sloja visoke električne otpornosti poboljšava bezbednost, odnosno smanjuje napon dodira i koraka. Ovaj efekat se numerički iskazuje preko ekvivalentnog otpora proticanju struje između uzemljivača i površi stopala ( $R_{eq}$ ), za koji je sa praktičnog stanovišta prihvatljivo da se smatra da je jednak prelaznom otporu dva paralelno vezana stopala ( $R_f/2$ ). Nasipanjem tankog sloja velike električne otpornosti se stvara dodatna komponenta u prelaznom otporu dva paralelno vezana stopala, nastala kao rezultat proticanja struje kroz dodatni tanki sloj.



Slika 9 – Potencijal na površini zemlje u zavisnosti od razdaljine od centra mreže idući po dužoj (tačkasto) i kraćoj normali (isprekidano), u odnosu na stranice konture i idući po dijagonali (puna linija)

#### 4.4. Elementarni oblici uzemljivača: kvadratna kontura u dvoslojnom tlu

Konačno, poslednji slučaj analiziran FEM softverom je kvadratna kontura veličine  $a \times b = 5 \times 5$  metara, poprečnog preseka trake  $p \times q = 40 \times 4 \text{ mm}^2$ , ukopana na dubini  $h = 0.6 \text{ m}$  u dvoslojno tlo: gornji sloj specifičnog električnog otpora  $\rho_1 = 183 \Omega\text{m}$  i debljine  $h_1 = 1.2 \text{ m}$  i donji sloj specifičnog električnog otpora  $\rho_2 = 15.3 \Omega\text{m}$ . Na slici 10 je data promena potencijala na površi tla iznad konturnog uzemljivača pri proticanju struje  $1 \text{ A}$ , i to od centra konture: u pravcu normale od centra konture ka stranici (isprekidana zelena linija) i u pravcu po dijagonale (puna plava linija). U tabeli 4 su uporedno prikazane vrednosti za slučaj homogenog i dvoslojnog tla, iz kojih se kvantitativno vidi koliko utiče smanjenje specifične otpornosti tla ispod dubine  $1.2 \text{ m}$ .

TABELA 4 – Upoređivanje vrednosti za konturni uzemljivač u homogenom i dvoslojnom tlu

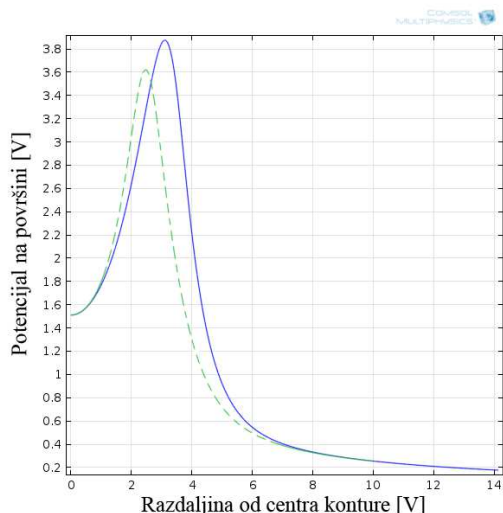
	$R_c [\Omega]$	$E_d [\text{V}]$	$E_k [\text{V}]$
Homogeno, $\rho=183\Omega\text{m}$	16.3	6.23*/8.77**	3.39**
Dvoslojno, $\rho_1=183\Omega\text{m}$ $h_1=1.2 \text{ m}$ , $\rho_2=15.3 \Omega\text{m}$	8.17	6.66*/6.84**	2.14***

\* - Stajna tačka u centru konture

\*\* - Prva stajna tačka iznad ugla (na 3.54 m od centra konture); za stajne tačke 3.54 m i 4.54 m dijagonalno od centra konture se javlja maksimalna potencijalna razlika dodira za homogeno tlo

\*\*\* - Prva stajna tačka na 3.37 m od centra konture; za stajne tačke 3.37 m i 4.37 m dijagonalno od centra konture se javlja maksimalna potencijalna razlika dodira za dvoslojno tlo

Ova poslednja primena pokazuje da primenom FEM softvera ni kompleksnija struktura tla ne predstavlja poteškoću, tako da razvoj i primena jednostavnijih inženjerskih postupaka zasnovanih na analitičkim izrazima, tabelama i graficima nije od prvorazrednog interesa, kao što je bio slučaj u prošlosti. U vezi sa tim, pomenimo da je jedan takav inženjerski postupak objavljen u [8] i [9], kao proširenje Schwarz-ovih formula za slučaj mrežnih uzemljivača sa cevima.



Slika 10 – Potencijal na površini zemlje u zavisnosti od razdaljine od centra konture u pravcu normale (isprekidano) na stranicu konture i po dijagonali (puna linija)

i nameće se kao moguć pristup za rešavanje praktičnih problema u oblasti uzemljivača. Opšti softveri bazirani na primeni FEM metode se nameću kao savremena alternativa specijalnim programima za projektovanje uzemljivača i izračunavanje otpora uzemljenja, napona dodira i koraka. Konačno, za bilo koje numeričke metode u bilo kojoj oblasti inženjerskog rada je poželjno izvršiti eksperimentalne provere, pa to važi i za primenu FEM metode u oblasti uzemljenja. Treba napomenuti da je matematički aparat za rešavanje raspodele električnog polja i potencijala relativno jednostavan, u odnosu na druge inženjerske oblasti, pa se ovde ipak očekuje da FEM metoda daje tačne proračunske rezultate za bilo koji oblik uzemljivača i karakteristike tla. Približne jednostavne formule i preporuke kako izvesti uzemljivače na konkretnoj lokaciji i u konkretnoj električnoj mreži, zbog jednostavne i brze primene, i dalje ostaju od interesa u široj projektantskoj praksi. Softveri bazirani na FEM metodi se mogu primeniti i za razvoj približnih jednostavnih inženjerskih formula.

## 5. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan deo mogućnosti koje pruža primena programa zasnovanih na metodi konačnih elemenata (finite element method – FEM) za određivanje raspodele potencijala u okolini uzemljivača - izvedene veličine iz raspodele potencijala su otpor uzemljenja, napon dodira i napon koraka. Kao ilustracije softvera baziranog na FEM metodi, izvršeno je modelovanje sledećih elementarnih uzemljivača: cevnog u homogenom tlu, konturnog u homogenom tlu i konturnog u dvoslojnom tlu. Pored toga, analiziran je i mrežnog uzemljivač sa cevima, kao realan uzemljivač u transformatorskim stanicama 11/0.4 kV, koji se instalira u urbanim sredinama, sa kablovskom mrežom, na području Bliskog istoka. Za slučajeve za koje smo u literaturi našli približne formule, rezultati primene FEM proračuna su upoređeni sa rezultatima koji se dobijaju primenom približnih formula. Iskustvo sa primenom softvera baziranog na FEM metodi nedvosmisleno ukazuje na ogromni potencijal

## 6. LITERATURA

1. Radakovic Z, Paunovic N, Milosevic V, Jovanovic M, „Generating simple-to-apply comprehensive engineering recommendation for earthing safety in systems with solidly earthed neutral“, *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 9, No. 16, str. 2517-2525, 2015.
2. *IEEE guide for safety in AC substation earthing*, IEEE Standard 80-2000, 2000.
3. Kostić M, „Teorija i praksa projektovanja elektroenergetskih instalacija“, drugo, prošireno izdanje, *Akademsko misao*, Beograd, 2005.
4. Schwarz S, „Analytical expressions for the resistance of grounding systems“, *AIEE Transactions. Part III: Power Apparatus and Systems*, Vol. 73, No. 2, 1954.
5. Dawalibi F. P, Southey R. D, Baishiki R.S, „Validity of conventional approaches for calculating body currents resulting from electric shocks“, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 5, No. 2, str. 613-626, 1990.
6. Nahman J, Đorđević V, Salamon D, „Nonuniformity correction factors for maximum mesh-voltages of combined grid-multiple rods electrodes“, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 11, No. 3, str. 1343-1348, 1996.
7. Technical recommendation for earthing systems in AADC distribution network, finalni dokument studije Consultancy services for earthing study in AADC network, koju je izradio Energo Consult L. L. C., Consulting Engineers, za potrebe Al Ain Distribution Company, Al Ain, Ujedinjeni Arapski Emirati, 2013.
8. Nahman J, Salamon D, „Analytical expression for the resistance of rod beds and of combined grounding systems in nonuniform soil“, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 1, No. 3, str. 90-96, 1986.
9. Nahman J, Salamon D, „Analytical expressions for the resistance of grounding grids in nonuniform soil“, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-103, No. 4, str. 880-885, 1984.