

# Simulacija Wennerove metode korištenjem programskog paketa ANSYS

---

Ćulap, Franjo

Master's thesis / Diplomski rad

2023

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:170726>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-23**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIP JURAJ STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Sveučilišni studij**

**SIMULACIJA WENNEROVE METODE  
KORIŠTENJEM PROGRAMSKOG PAKETA ANSYS**

**Diplomski rad**

**Franjo Čulap**

**Osijek, 2023.**

## Sadržaj

1.	UVOD .....	1
1.1.	Zadatak diplomskog rada.....	1
2.	OPĆENITO O UZEMLJENJU .....	2
2.1.	UZEMLJENJE.....	2
2.2.	NAPON DODIRA I NAPON KORAKA.....	3
2.3.	MODELI TLA ZA PRORAČUN UZEMLJENJA.....	6
2.3.1.	Model za jednoslojnog tla .....	6
2.3.2.	Model dvoslojnog horizontalnog tla .....	7
2.3.3.	Model višeslojnog tla .....	8
2.3.4.	Ostali modeli tla .....	9
2.4.	PRIMJER IZRAČUNA OTPORA UZEMLJENJA KOD ŠTAPNOG UZEMLJENJA 10	
3.	SPECIFIČNI OTPOR TLA.....	13
3.1.	TEHNIKE MJERENJA SPECIFIČNOG OTPORA TLA .....	13
3.2.	IZVOĐENJA MJERENJA .....	13
3.2.1.	Postavke mjerenja .....	14
3.2.2.	Razmaci između sondi .....	14
3.2.3.	Otpornost kontakata .....	14
3.2.4.	Dodatne preporuke .....	15
3.3.	TIPIČNE KRIVULJE KOD SPECIFIČNOG OTPORA TLA.....	15
4.	NEGALVANSKE METODE .....	17
4.1.	AKUSTIČNE METODE .....	17
4.2.	ELEKTROMAGNETSKE METODE.....	19
5.	NAJPOZNATIJE GALVANSKE METODE KOD MJERENJA SPECIFIČNOG OTPORA TLA .....	25
5.1.	WENNER-OVA METODA KOD MJERENJA SPECIFIČNOG OTPORA TLA... 25	
5.1.1.	Primjer mjerenja Wenner-ovom metodom kod dvoslojnog modela tla .....	27
5.2.	SCHLUMBERGER-OVA METODA KOD MJERENJA SPECIFIČNOG OTPORA TLA 32	
5.3.	DIPOL-DIPOL METODA MJERENJA SPECIFIČNOG OTPORA TLA.....	34
6.	PROGRAM ANSYS .....	36
7.	WENNER-OVA METODA U ANSYS SUSTAVU .....	37
8.	ZAKLJUČAK .....	66
9.	PREGLED LITERATURE .....	67

POPIS UPOTRIJEBLJENE LITERATURE .....	68
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA .....	70
POPIS KORIŠTENIH KRATICA .....	72
10. SAŽETAK.....	73
11. ABSTRACT.....	74
12. ŽIVOTOPIS .....	75

# 1. UVOD

U ovom diplomskom radu biti će odrađena simulacija u sustavu pod nazivom ANSYS. Simulacija će biti specifične otpornosti dvoslojnog tla na primjeru Wenner-ove metode.

Na početku diplomski će rad da sadrži teoriju, a ona će da govori općenito sve o uzemljenju, specifičnom otporu tla, negalvanskim metodama i najpoznatijim galvanskim metodama. Kod uzemljenja imamo kako napon može da utječe na čovjeka i kakve sve modele tla imamo. Za specifični otpor tla imaju metode mjerenja i njihova izvođenja. Kod negalvanskih metoda imamo opis dviju metoda, a to su akustične i elektromagnetske metode. Za najpoznatije galvanske metode su spomenute Wenner-ova metoda (koja je najšire opisana, jer je glavni zadatak bio nju najviše znati), Schlumberger-ova metoda i dipol-dipol metoda mjerenja specifičnog otpora tla.

Za sami kraj diplomskog rada je ostavljeno malo teorije o programu ANSYS, te na kraju kako sami zadatak koji je zadan, a to je kako dobiti specifični otpor tla Wenner-ovom metodom s pomoću ANSYS-a.

## 1.1. Zadatak diplomskog rada

U diplomskom radu potrebno je izložiti teoriju kojom se objašnjavaju galvanske metode mjerenja otpornosti tla. Opisati poznatije metode mjerenja otpornosti tla kao što su Wennerova metoda, Schlumberger ova metoda, Dipol-Dipol metoda. Opisati prednosti i nedostatke svake pojedine metode. Posebnu pažnju potrebno je usmjeriti na Wennerovu metodu. Navesti izraze za prividni otpor tla mjeren Wennerovom metodom za dvoslojno tlo. U dogovoru s mentorom odabrati primjer višeslojnog tla za analizu. Na odabranom primjeru opisati sve korake pri korištenju programskog paketa ANSYS. Izlaganje je potrebno poduprijeti izračunima, grafičkim prikazima, shemama i prema mogućnosti mjerenjima.

## 2. OPĆENITO O UZEMLJENJU

### 2.1. UZEMLJENJE

Uzemljenje se može objasniti da je to galvanski spoj gdje se između metalnoga dijela, koji je uzemljen i zemlje preko uzemljivača. Metalni dio koji je uzemljen može da predstavlja neko postrojenja ili električni uređaj ili neku točku koja se nalazi u mreži koja može daje pod naponom. Kod uzemljenja uzemljivači predstavljaju metalni dio koji je ukopan u zemlju. Uzemljenje se vrši radi ovih razloga:

- a. kako bi osigurao sigurnost živih bića tijekom normalnih ili poremećenih stanja nekog električnog sustava
- b. kako bi rad postrojenja, mreža, električnih uređaja i instalacija bio ispravan
- c. kako bi tijekom prijelaznog stanja osigurao rad bez kvarova tako da stabilizira napon
- d. kako bi osigurao sigurnost ljudi za vrijeme napona, koji se javlja pri najvećim vrijednostima struje zemljospoja u uzemljivačkom sustavu

Jednadžba koja se dešava u izrazu 2-1 predstavlja zbroj otpora rasprostiranja  $R_r$  i otpora zemljovoda  $R_{zv}$  koji daje otpor uzemljenja  $R_z$  [1].

$$R_z = R_r + R_{zv} \quad (2-1)$$

Definicija za otpor rasprostiranja  $R_r$  je da je to otpor koji se struji pruža kada ona prolazi kroz dio zemlje koji se je smješten između prostora gdje će se ta struja širiti kroz presjek tla, koji je već određen, tako da gustoća koja je struja imala postaje jako mala i uzemljivača. Neutralna zemlja, daleka zemlja ili referentna zemlja, u električnom smislu, je naziv za slojeve zemlje izvan te granice. Zaključak je da se kod otpora rasprostiranja  $R_r$  zapravo otpor koji se nalazi između neke neutralne zemlje i samog uzemljivača.

Otpor zemljovoda je jako male vrijednosti kada se uspoređuje s otporom uzemljenja. Iz tog razloga se može da se zanemari i onda se otpor uzemljenja se može usporediti da je približno jednak otporu rasprostiranja. Gdje će onda glasiti da je  $R_z \approx R_r$ .

Otpor uzemljenja se mjeri na način da se ispituje uzemljivač i sustav uzemljenja, ali kod otpora rasprostiranja ne. Dok za izračun otpora uzemljenja se može dobiti otpor rasprostiranja

$R_r$ , ali se tim izračunom ne može dobiti otpor uzemljenja  $R_z$ . Stoga, iz tehničkih razloga napraviti će se pogreška te će se otpor  $R_r$  poistovjetiti s otporom  $R_z$ .

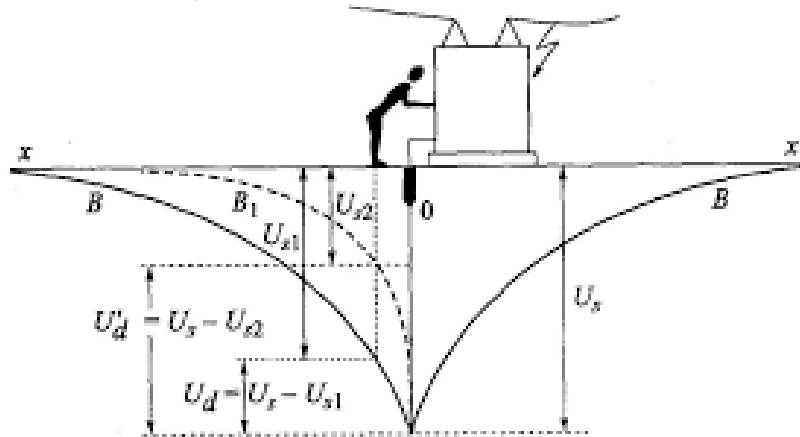
Otpor uzemljenja se računa na način da se podijeli napon uzemljenja koji je prikazan oznakom  $U_z$ , između uzemljivača i neutralne zemlje na kojoj se nalazi uzemljivač i struje koja je prikazana oznakom  $I_z$ , koja prolazi kroz uzemljivač i onda ulazi u zemlju jednadžbom [1]:

$$R_z = U_z / I_z \quad (2-2)$$

## 2.2. NAPON DODIRA I NAPON KORAKA

Pošto je ljudska zaštita najvažnija kod uzemljenja, mora se paziti na napona dodira i na napon koraka, koji pri bilo kakvom poremećaju u električnom sustavu ne smiju prekoračiti dopuštene vrijednosti.

Dodirni je napon dio napona uzemljivača koji osoba može premostiti dodirom na udaljenosti od 1 m [1]. Kod dodirnog napona se po proračunima smatra da je neopasan po ljudski organizam, ali naravno ovisit će o duljini trajanja tog ljudskog ili životinjskog dodira, također vrsti te električne struje. Što je manji napon i vrijeme trajanja dodira, to su veće šanse da će unesrećena osoba preživjeti. Naponi koji se smatraju da su bezopasni su trajni napon. On kod izmjenične struje može da bude jednak ili manji od 50 V ili kod korištenja istosmjerne struje može da bude 120 V za postrojenja niskog napona. Kod postrojenja visokog napona je napon do 65 V. Slika 2.1. predstavlja primjer što se dešava s raspodjelom napona kod dodirnog napona. Može se zaključiti da što je udaljenost  $x$  veća krivulja raspodjele potencijala  $B$  je manja.



**Slika 2.1.** Raspodjela potencijala oko uzemljivača i dodirni napon [2]

Izraz 2-3 predstavlja koliko bi dodirni napon bio kada bi čovjek stajao na udaljenosti od 1 m te dodirivao dio postrojenja uzemljenog uzemljivača [1]:

$$U_d = U_s - U_{s1} \quad (2-3)$$

U ovom izrazu  $U_d$  predstavlja napon dodira, dok  $U_s$  predstavlja ukupni napon, a  $U_{s1}$  potencijal na udaljenosti od 1 m.

Dopušteni dodirni napon koji neka osoba može da podnese je [3]:

- osoba od 50 kg

$$E_{50} = (1000 + 1.5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (2-4)$$

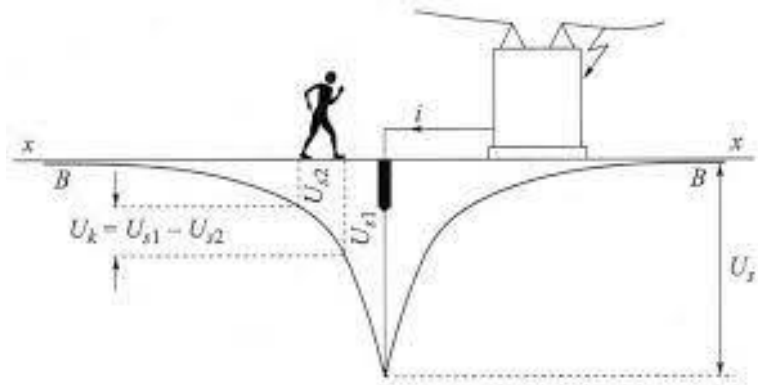
- osoba od 70 kg:

$$E_{70} = (1000 + 1.5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (2-5)$$

Napon koraka dio je napona uzemljivača koji osoba može premostiti korakom duljine 1 m [1]. Kada se napon koraka pojavi, onda se to desi na način da se u okolici uzemljivača, na kojem se desio napon koraka, proteče električna struja kroz uzemljenjem. Na taj način nastaje



potencijalna razlika koja se dešava između tla na kojem osoba ili životinja hoda i uzemljivača. Kao što je napon dodira, tako i napon koraka ovisi vrsti uzemljivača koje se koriste, o udaljenosti od uzemljivača i njihovoj pravcu i duljini koraka. Dopuštene vrijednosti za napon koraka su također iste kao i za napon dodira. Slika 2.2. je primjer kako može doći do napona koraka. Napon koraka se može još definirati kao razlika potencijala koja se javi između dok osoba hoda u blizini uređaja kojem uzemljivač da provode struju.



**Slika 2.2.** Raspodjela potencijala oko uzemljivača i napona koraka [2]

Napon koraka ( $U_k$ ) možemo dobiti preko izraza 2-6, dok će  $U_{s1}$  biti potencijal koji stvorio na lijevoj nozi, a  $U_{s2}$  će biti potencijal koji stvorio na desnoj nozi. Dolazi se do zaključka da je napon koraka jednak razlici potencijalima koji se stvaraju između nogu [1]:

$$U_k = U_{s1} - U_{s2}. \quad (2-6)$$

Dopušteni napon koraka koja neka osoba može da podnese je [3]:

- osoba od 50 kg

$$E_{korak50} = (1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0.116}{\sqrt{t_s}}. \quad (2-7)$$

- osoba od 70 kg

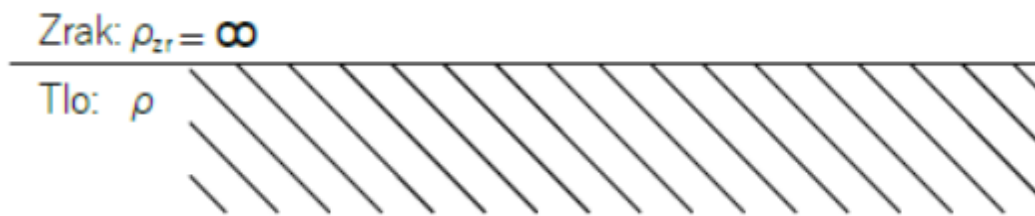
$$E_{korak70} = (1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}. \quad (2-8)$$

## 2.3. MODELI TLA ZA PRORAČUN UZEMLJENJA

### 2.3.1. Model za jednoslojnog tla

U slučaju jednoslojnog modela tla postoji samo jedna granica diskontinuiteta specifične električne vodljivosti, tj. granica tlo-zrak [4].

Na početnoj slici 2.3. možemo vidjeti prikaz jednoslojnog tla.



Slika 2.3. Model jednoslojnog tla [5]

Primjer jednoslojnog modela tla je homogeno tlo koje ima konstantnu otpornost tla pa makar se smanjivala ili povećavala dubina mjerenja.

Specifična otpornost koja se dobiva iz modela jednoslojnog tla se može izračunati na način da se iz aritmetičke sredine svih prethodno izmjerenih vrijednosti prividne otpornosti tla, te se to može vidjeti u izrazu 2-9 [5]:

$$\rho = \frac{\rho_{a(1)} + \rho_{a(2)} + \rho_{a(3)} + \dots + \rho_{a(n)}}{n} \quad (2-9)$$

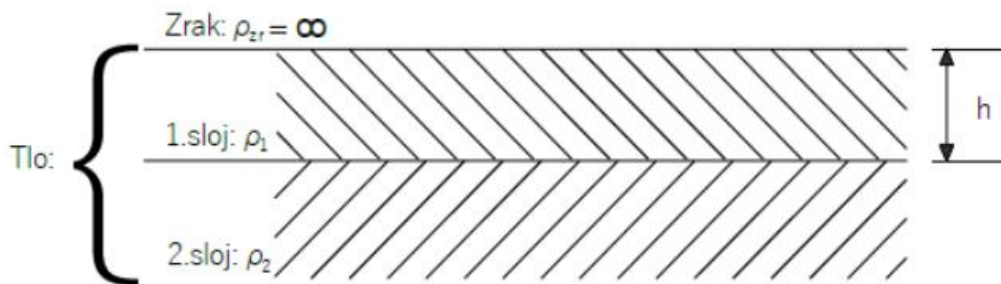
Dok otpornost jednoslojnog tla se može prikazati preko izraza 2-10 [5]:

$$\rho = \frac{\rho_{max} + \rho_{min}}{2} \quad (2-10)$$

Jednoslojni model tla se ne koristi često u praksi. U praksi je koristimo samo kada je prividna otpornost tla ima blaga odstupanja.

### 2.3.2. Model dvoslojnog horizontalnog tla

Na slici 2.4. vidimo model koji predstavlja model dvoslojnog horizontalnog tla.



Slika 2.4. Model dvoslojnog horizontalnog tla [5]

Ako dolazi do značajnijih odstupanja u mjerenju specifičnog otpora tla kako dubina postaje veća (mjerenjem veće dubine mora i razmak između sonde biti veći), može se zaključiti da je tlo heterogeno i da se treba upotrijebiti višeslojni model tla.

Kada se analizira više mjerenja specifičnog otpora tla na mnogim dubinama dolazi se do parametara  $\rho_1$  i  $\rho_2$  koji predstavljaju specifični otpor tla za jedan i drugi sloj. Parametar  $h$  pokazuje do koje dubine dolazi prvi sloj horizontalnog tla.

Parametre dvoslojnog horizontalnog tla mogu se i odrediti analitički na način da se koriste određene formule i matematičke funkcije. Za mjerenje prividnog specifičnog otpora tla u dvoslojnom horizontalnom tlu se koristi Wenner-ov izraz pod 2-10 i po izrazom 2-11 [3]:

$$\rho_a = \rho_1 \cdot \left\{ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} K^n \left[ \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2nh}{a}\right)^2}} - \frac{1}{\sqrt{4 + \left(\frac{2nh}{a}\right)^2}} \right] \right\} \quad (2-10)$$

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (2-11)$$

gdje je:

$\rho_a$  pod izrazom 2-10 predstavlja prividni specifični otpor dvoslojnog horizontalnog tla kod Wenner-ovog mjerenja tla koji se izražava mjernom jedinicom  $\Omega\text{m}$ .  $K$  je koeficijent refleksije koji se dobije oduzimanjem  $\rho_2$  - specifični otpor drugog sloja tla ( $\Omega\text{m}$ ) od  $\rho_1$  - specifični otpor prvog sloja tla (oba su specifična otpora  $\rho_1$  i  $\rho_2$  izražena mjernom jedinicom  $\Omega\text{m}$ ) kroz zbroj ta dva ista specifična otpora tla, te  $a$  predstavlja razmak među sondama kod Wenner-ovog mjerenja.

Parametri dvoslojnog horizontalnog tla određuju se na način da se nađe minimum funkcije gdje suma  $N$  obuhvaća sva mjerenja [5]:

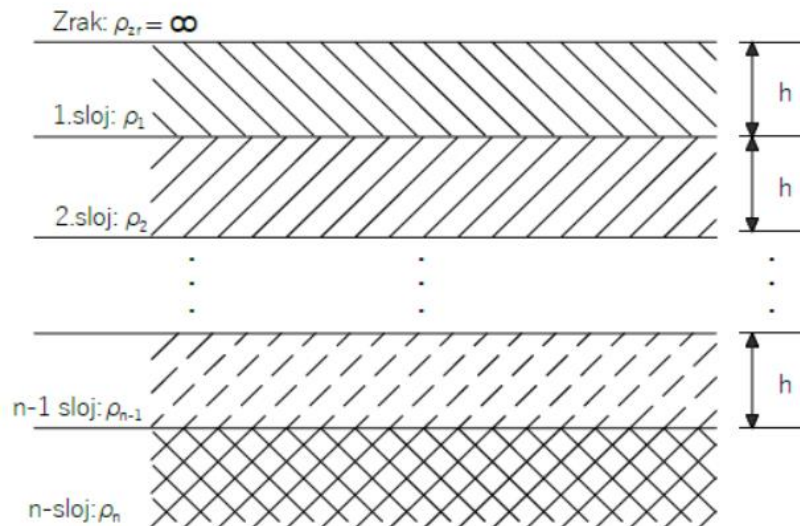
$$f(\rho_1, \rho_2, h) = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{(\rho_{mi} - \rho_{(i)})^2}{\rho_{mi}^2} \right] \quad (2-12)$$

U izrazu 2-12 imamo dvije nove oznake, a to su  $\rho_{mi}$  koja predstavlja izmjerenu vrijednost specifičnog otpora tla za razmak između sonde koja se označuje sa oznakom  $a$  te pritom  $\rho_{mi}$  ima mjernu jedinicu  $\Omega\text{m}$ , dok je  $\rho_{(i)}$  računski vrijednost specifičnog otpora tla za razmak između sondama sa istom mjernom jedinicom  $\Omega\text{m}$ .

### 2.3.3. Model višeslojnog tla

Lako je moguće da se kod mjerenja tla pojave nejednolike strukture tla ili bolje rečeno više slojeva tla različitog specifičnog otpora. Kod takvih se slojeva tla karakterizira određena debljina sloja, te također i određeni specifični otpor sve dok se ne dođe do zadnjeg  $n$ -tog sloja koji ima neograničenu debljinu. Za razliku od jednoslojnog i dvoslojnog modela tla, određivanje parametara je puno teže kod modela višeslojnog tla, te traži da se mora upotrebljavati puno složenije matematičke funkcije i računalni programi.

Ispod na slici 2.5. može se vidjeti primjer višeslojnog modela tla koji ide do sloja  $n$ .



**Slika 2.5.** Model višeslojnog horizontalnog tla [5]

#### 2.3.4. Ostali modeli tla

Pod ostale modele tla vrlo se često pojavljuju vertikalni model tla, koji mogu biti višeslojni ili dvoslojni. Također se ubrajaju i oni modeli tla gdje će s promjenom dubine eksponencijalno mijenjati i sami specifični otpor. Kod vertikalnog modela se može reći da se on sastoji od više slojeva. Ti su slojevi različite otpornosti te su naspram same površine vertikalno orijentirani. Također vertikalni slojeve se može uočiti tako što se promatra krivulja prividnog specifičnog otpora, koja je u ovisnosti o razmaku između sonde. Kada se odredi prividni specifični otpor kod svakog pojedinog vertikalnog modela tla ( $\rho_1$ ,  $\rho_2$ ) onda se izračunava nadomjesni ekvivalentni specifični otpor koji je u izrazu (2-13) predstavljen predznakom  $\rho_e$  [5]:

$$\rho_e = \frac{S \cdot \rho_1 \cdot \rho_2}{S_1 \cdot \rho_2 + S_2 \cdot \rho_1} \quad (2-13)$$

Iz izraza 2-13  $\rho_e$  (nadomjesni ekvivalentni specifični otpor mjerne jedinice  $\Omega\text{m}$ ) se dobije umnoškom  $S$  (koji je zbroj površina prvog vertikalnog sloja  $S_1$  i površina drugog vertikalnog sloja  $S_2$  mjerne jedinice  $\text{m}^2$ ), te  $\rho_1$  i  $\rho_2$  (prividni specifični otpori prvog i drugog vertikalnog sloja mjerne jedinice  $\Omega\text{m}$ ), gdje se onda podijeli sa zbrojem umnoška  $S_1$  (površina prvog

vertikalnog sloja mjerne jedinice  $m^2$ ) i  $\rho_2$ , te  $S_2$  (površina drugog vertikalnog sloja mjerne jedinice  $m^2$ ) i  $\rho_1$ .

Na slici 2.6. prikazan je model ostalih tla.



**Slika 2.6.** Model ostalih tla [5]

#### **2.4. PRIMJER IZRAČUNA OTPORA UZEMLJENJA KOD ŠTAPNOG UZEMLJENJA**

Štapni uzemljivači su uzemljivači koji se okomito ukopavaju, te koji su duljine od 1 m do 3 m, te se oni nalaze 50 do 70 cm (ovisno o području gdje se ukopava) u zemlji zbog zone zamrzavanja. Dobili su ime, jer su štapnog oblika. Za štapne uzemljivače koji su čelično pocinčane cijevi, promjer im je 38 mm i debljina im može najmanje biti 3,5 mm, dok kod bakrenih cijevi promjer im je 30 mm, a debljina 2,5 mm. Na slici 2.7. može se vidjeti prikaz štapnog uzemljivača.



**Slika 2.7.** Pojednostavljen prikaz okomito ukopanog štapnog uzemljivača [6]

Kod štapnog uzemljivača njegov se otpor uzemljenja se računa na način da su poznate vrijednosti dubine ukopa  $t$  (dubina od površine zemlje do gornjeg ruba uzemljivača), duljine  $l$  i promjera  $d$  prema formuli (2-14) [1]:

$$R_z = \frac{\rho_z}{2\pi l} \cdot \left( \ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \left( \frac{4t_h + l}{4t_h - l} \right) \right) \quad (2-14)$$

Ovdje u izrazu 2-14  $t_h$  predstavlja kao dubina polovice duljine štapnog uzemljivača, s time da se gleda površina tla. To se predstavlja formulom 2-12 [1]:

$$t_h = t + \frac{l}{2} \quad (2-15)$$

Otpor uzemljenja armirano-betonskog stupa promjera  $d$  ukopanog na duljinu temeljne stope  $l$  [1]:

$$R_z = \frac{1,75\rho_z}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d} \quad (2-16)$$

U izrazu 2-16 d predstavlja promjer ili ekvivalentni promjer armiranog-betonskog stupa, dok je l dubina ukopa odnosno duljina armiranog-betonskog stupa koji je ukopan u zemlju.

Prema odabranim vrstama uzemljivača prikazanim u ovom poglavlju te pripadajućim izrazima za otpor rasprostiranja uzemljivača lako je uočljivo da je otpor rasprostiranja uzemljivača direktno proporcionalan specifičnom otporu tla. Iako su odabrani relativno jednostavni primjeri uzemljivača bez izuzetka navedeno vrijedi i za sve vrste uzemljivača. Iz toga razloga potrebno je dobro poznavati iznos specifičnog otpora tla na lokaciji ukopavanja uzemljivača. Više detalja o specifičnom otporu tla i tehnikama mjerenja specifičnog otpora tla dano je u narednom poglavlju.



### 3. SPECIFIČNI OTPOR TLA

#### 3.1. TEHNIKE MJERENJA SPECIFIČNOG OTPORA TLA

Da bi se došlo do proračuna uzemljenja potrebno je da se zna specifični otpor tla, jer je to glavni parametar koji služi da bi izračunali to uzemljenje. Grubu aproksimaciju specifičnog otpora tla daju procjene temeljene klasifikacijom tla, koje može biti pjeskovito, stjenovito ili glinovito. Za što preciznije podatke potrebno je učiniti puno mjerenja. Otpornost koja se dešava u tlu se mijenja što se ide na veću dubinu što je važno kada se određuje ekvivalentni model tla. On je jako potreban za proračun uzemljenja i očitavanje za električna svojstva tla. Prije mjerenja poželjno je učiniti procjenu karaktera tla, te biti upoznat sa zemljopisnim i vremenskim podacima o području mjerenja, te postoje li smetnje koje mogu utjecati na rezultate, kao što mogu na primjer biti metalne konstrukcije. Kod mjerenja za specifični otpor tla pušta se struja koja prolazi kroz dvije strujne sonde, dok će unutarnje sonde koje se nalaze između tih dviju strujnih sondi da mjere napon. Nakon što se izmjereni napon i zna puštena struja, onda se pomoću Ohm-ovog zakona može izračunati vrijednost otpora. Nadalje s izračunatom vrijednošću otpora može se dalje računati vrijednost prividnog specifičnog otpora tla koja je prikazana mjernom jedinicom  $\Omega m$ . Ako dođe do promjene razmaka između sondi, onda će da dođe i do mijenjanja volumena tla, tako da se povećava se, potom mu određujemo otpornost. Otpornost je konstantna što se tiče homogenog tla i izravno se određuje tako da se obrađuju mjerenja. Prividni specifični otpor tla, koji se još naziva i prividna otpornost, se pojavljuje kod tla koje se sastoji od više slojeva s različitim otpornostima, nije homogeno (najčešće u praksi), te se dobije izvršenim mjerenjima slojeva. Analizom izmjerenih rezultata prividnih otpornosti, koji mogu biti grafički ili analitički, uz korištenje softverskih programa, kao što su CDEGS, CYMGR i još mnogi, konstruira se tlo točnih vrijednosti otpornosti i dubina pojedinih slojeva.

#### 3.2. IZVOĐENJA MJERENJA

Da bi provođenje bilo što preciznije mjerenja mora se dobro poznavati: postavke mjerenja razmaci između sonda otpornost kontakta i dodatne preporuke.

### **3.2.1. Postavke mjerenja**

Mjerenje se većinom izvodi na način poprečnih paralelnih linija. Taj način se manifestira tako da područje na kojem se radi iscrt paralelnim linijama, gdje bi se odradilo više mjerenja otpornosti tla duž svake pojedine linije vodeći računa da se ne pogriješi razmak između sondi.

Provođenjem mjerenja nekoliko puta duž svake linije, tako da se razmak između sondi mijenja svaki puta, može se saznati se kako će da se mijenja otpornost tla prilikom mijenjanja dubine, dok će za vrijeme mjerenja provedena uz duž više linija pokazati da se otpornost tla mijenja diljem područja na kojem se on istražuje.

Mijenjanjem razmaka između sondi oponaša se bušenje, stoga se ta metoda istraživanja može još nazvati i geoelektrično sondiranje. Po završetku mjerenja u jednom pravcu, poželjno je također i mjeriti u pravcu koji je okomit na početni pravac, te onda dobivene rezultate iz tih mjerenja usporediti. Ako se tijekom usporedbe očita da su za istovjetne razmake između sondi približno jednaka to ukazuje na horizontalnu slojevitost tla. Ujedno, ako biti ikakvih razlika u rezultatima koja se rade za mjerenje za istovjetne razmake između sondi, dva vertikalna pravca, onda će to ukazivati na vertikalnu slojevitost tla.

### **3.2.2. Razmaci između sondi**

Raspon razmaka koji može biti između sondi, može da varira od manjih kao što su 1 metar pa i na manje, čime se može utvrditi otpornost kod gornjeg sloja tla, koje su važne za izračunavanje napona koraka i dodirnih napona radi sigurnosti živih bića koja mogu biti u blizini uzemljivača, pa i do većih razmaka za određivanje otpornosti u dubljim slojevima tla za određivanje otpora kod rasprostiranja uzemljivača. Mjerenje kod veoma velikim razmaka između sondi zna jako često predstavljati problem.

### **3.2.3. Otpornost kontakata**

Ako je tlo jako visoke otpornosti, prilikom mjerenja kod velikih razmaka između sondi, otpornost kontakata onda može da bude problem. Kod takvih se slučajeva rješenje je da se

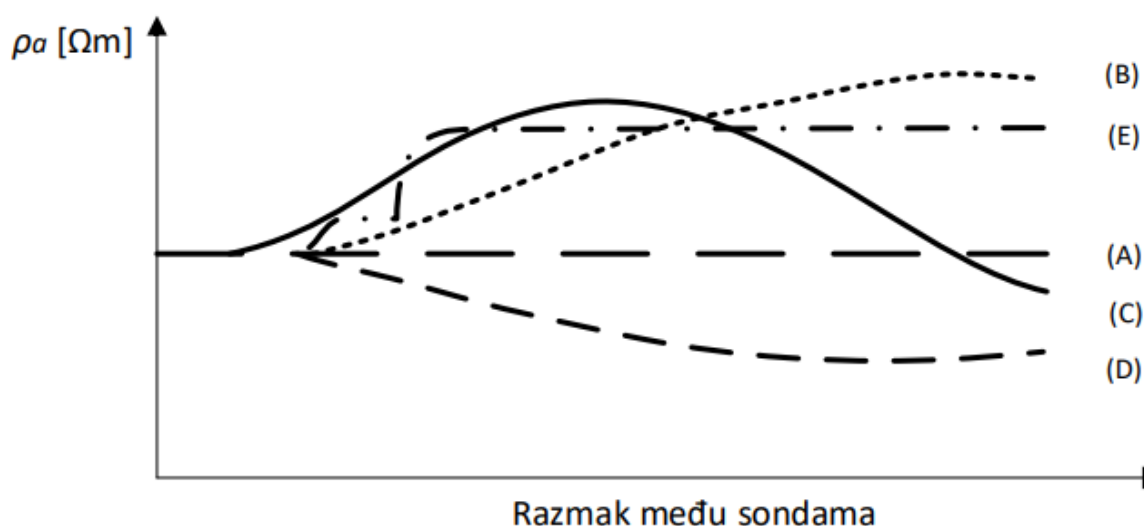
strujne sonde zabiju po mogućnosti što je dublje ili tlo koje se nalazi oko te sonde natopiti slanom vodom, što će da osigura puno bolji kontakt sonde i same zemlje, te time smanjujemo zračni raspor, a neće da utječe na samo mjerenje ili se može dodati još koja sonda u paralelni spoj.

### 3.2.4. Dodatne preporuke

Za dodatne preporuke, uvijek bi bilo poželjno da se mjerna oprema provjeri, kalibrirana i adekvatno podesi na vrijeme, to jest prije samog mjerenja da se ne bi uništila oprema. Tijekom izvođenja mjerenja, mora se grafički prikazati ovisnost između razmaka kod sonde i same prividne otpornosti tla, pri čemu ljudi koji provode mjerenje mogu da uoče svake anomalije i da identificiraju sva problematična područja.

### 3.3. TIPIČNE KRIVULJE KOD SPECIFIČNOG OTPORA TLA

Kod crtanja krivulje prividnog specifičnog otpora tla po razmaku između sonde, vidi se na slici 3.1. da za svako drugačije tlo imamo i drugačije podatke.



Slika 3.1. Tipične krivulje prividnog specifičnog otpora tla [5]

Promatrajući kretanje krivulje A uočava se da prividna otpornost tla, prilikom promjene razmaka između sonde, zapravo ne mijenja, te ostaje konstantna, te se može zaključiti da se radi o homogenom tlu.

Krivulja B prikazuje tlo koje na početnim slojevima je niže otpornosti, a nakon toga se nalazi sloj koje je veće otpornosti i nalazi se ispod njega.

Krivulja C prikazuje tlo koje ima sloj veće otpornosti između dva sloja niske otpornosti.

Krivulja D prikazuje se tlo čiji je početni sloj veće otpornosti od dubljeg sloja.

Krivulja E prikazuje sloj koji na početku ima nisku otpornost iznad sloja visoke otpornosti s okomitim diskontinuitetom.

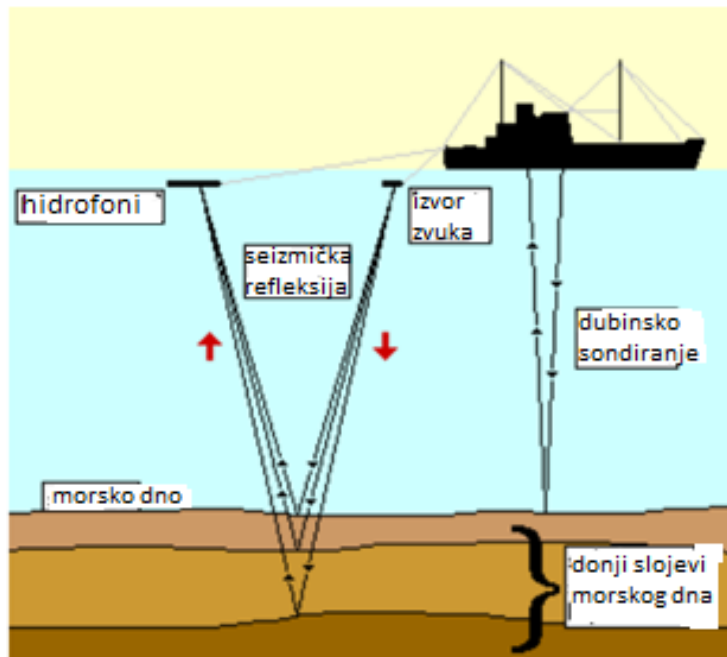
## 4. NEGALVANSKE METODE

### 4.1. AKUSTIČNE METODE

Kako bi se našli nafta i zemni plinovi ispod slojeva zemlja koristi se akustična metoda na način da se slojevi morskog dna se ispituju preko metode seizmičke refleksije i preko seizmičkog loma. Dubinsko sondiranje (eng. *echosounder* (odsada u tekstu će se koristiti kao ES)) je vrsta seizmičke refleksije koja se koristi najviše za traženje nafte u tlu. ES se može također koristiti i za mjerenje dubine vode. Visokofrekvencijski ES, koji ima frekvenciju i do 12000 Hz, se koristi za mjerenje dubine kod morskog dna. Ovaj proces se događa na način da se zvučni impuls pošalje s broda i onda se taj zvuk se reflektira morskog dna (odbija se) i onda se vraća na brod. Vrijeme koje je potrebno tom zvuku da pređe put od dna pa natrag prema brodu se koristi za izračunavanje udaljenosti od vrha vode do morskog dna. Niskofrekvencijski ES, koji imaju frekvenciju od 1000 do 6000 Hz, mogu prijeći malu udaljenost koja je otprilike do 100 metara, te na taj način se može proučiti gornji slojevi sedimenta.

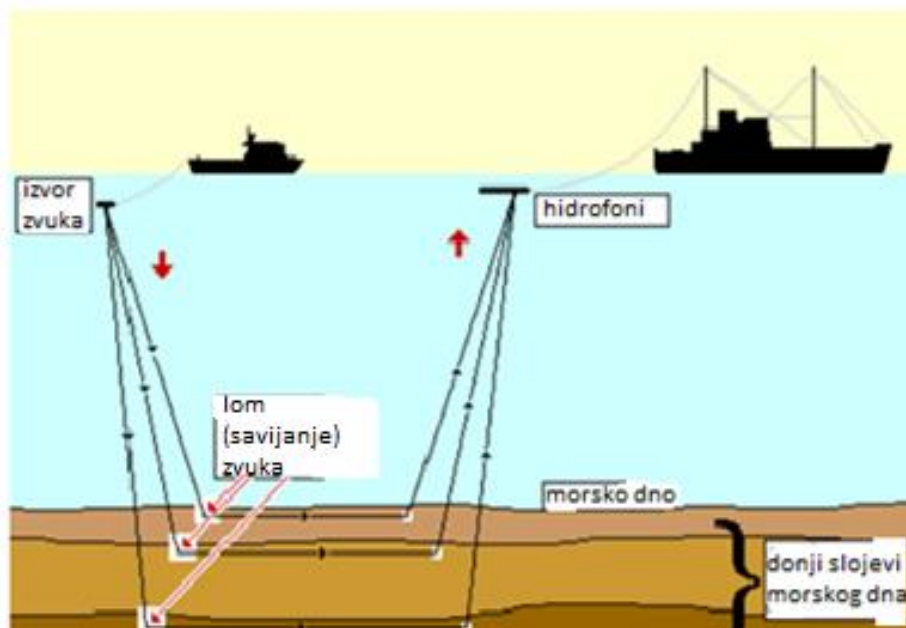
Seizmička refleksija naspram ES koristi puno jače zvučne signale, te također koristi niže zvučne frekvencije koje su iznosa od 10 do 50 Hz, a to je sve iz razloga da bi se moglo vidjeti dublje ispod morskog dna. Zvučni impuls se dobije na način da se iz zračne puške koja se vuče iza broda brzo oslobađa komprimirani zrak. Zvuk koji je oslobođen iz zračne puške putuje do morskog dna, te se onda dio tog zvuka reflektira od morskog dna, dok se dio zvuka prodire u morskog dna. Prodiranje koje vrši zvuk iz zračne puške može da prodre od 20 do 30 km ispod, ovisno o tome kako je niz dizajniran. Brod koji vuče hidrofone za sobom detektira i prima zvukove koji se reflektiraju do površine (koriste jako velik broj hidrofona da bi primili i zvukove iz dubljih dijelova Zemlje). Vrijeme koje je potrebno zvuku za povratak do hidrofona se može koristiti kod pronalaženje debljine slojeva u morskog dnu i njihovih položaja (koliko je nagnut, ravan ...).

Slika 4.1. prikazuje seizmičku refleksiju zvuka koji od izvora zvuka do hidrofona.



**Slika 4.1.** Seizmička refleksija zvuka [7]

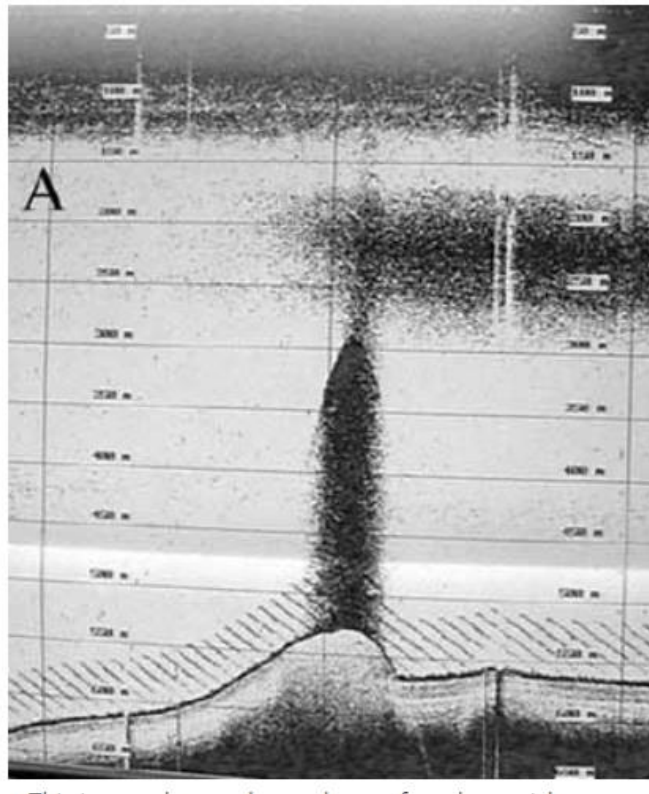
Za razliku od seizmičke refleksije, seizmički lom bolje otkriva slojeve morskog dna. Zvučni impulsi koji ulaze u morsko dno se mogu lomiti ili savijati dok prelaze u različite slojeve morskog dna. Takav prelomljeni zvučni impuls slijedi drugačiji put, to jest složeniji put. Seizmičkim lomom može se odrediti gustoća slojeva. Slika 4.2. prikazuje seizmički lom zvuka prilikom udara u morsko dno.



**Slika 4.2.** Seizmička lom zvuka [7]

Seizmička refleksija i lom mogu se također obaviti i na još jedan način, a to je preko instrumenta koji se spusti na morsko dno koji se naziva Seizmometar oceanskog dna (eng. *Ocean Bottom Seismometer* (OBS)). Kod ovog instrumenta se koristi zvuk iz umjetnih i prirodnih izvora. Značajke u slojevima morskog dna koje ukazuju na to da bi nafta i plin mogli biti sadržani u stijenkama uključuju kupole soli i kapljice [7].

Slika 4.3. predstavlja kako izgleda kada nafta i plin se oslobode iz kupole soli.



**Slika 4.3.** Oslobađanje nafte i zemnog plina iz kupole soli [7]

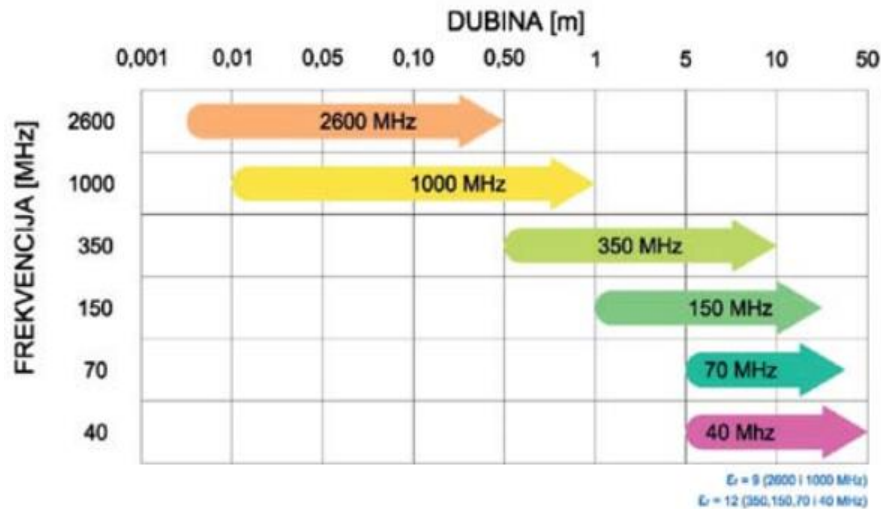
## 4.2. ELEKTROMAGNETSKE METODE

*Ground Penetration Radar* geofizička je metoda brzog i jednostavnog dijagnosticiranja geoloških i geotehničkih parametara tla i stijenske mase te eksploatacijskih parametara ležišta, rudnika i površinskih kopova [8].

*Ground Penetration Radar* (odsada u tekstu će biti skraćeno s GPR) uređaji su uređaji koji rade u određenom spektru frekvencija koji ima raspon od 40 MHz do 3,0 GHz, te im to

dopušta da koriste različite penetracije i nivoe rezolucije. Kada se koristi visoka frekvencija, to jest frekvencija koja prelazi preko 1 GHz, onda se postiže jako dobra rezoluciju koja može biti do nekoliko milimetara, dok je s nižim frekvencijama drugačije. Prilikom korištenja nižih frekvencija penetracija u zemlji je u rasponu od 50 m dubine i ima puno lošiju rezoluciju.

Na slici 4.4. može se vidjeti kolika je dubina penetracije GPR-uređaja prilikom različitih frekvencija.



**Slika 4.4.** Dubina penetracije GPR-uređaja na pojedinim frekvencijama u vapnenačkoj stijeni [8]

GPR je metoda gdje se dobivaju tomografski presjeci kroz tlo. Može se reći da GPR uređaj radi na skoro istom principu kao što i radi običan radar, ali kod njega se usmjereni elektromagnetski impuls emitira u ispitivani medij, te na taj način može da prati i analizira odziv. Na slici 4.5. može se vidjeti jedan od načina korištenja GPR.

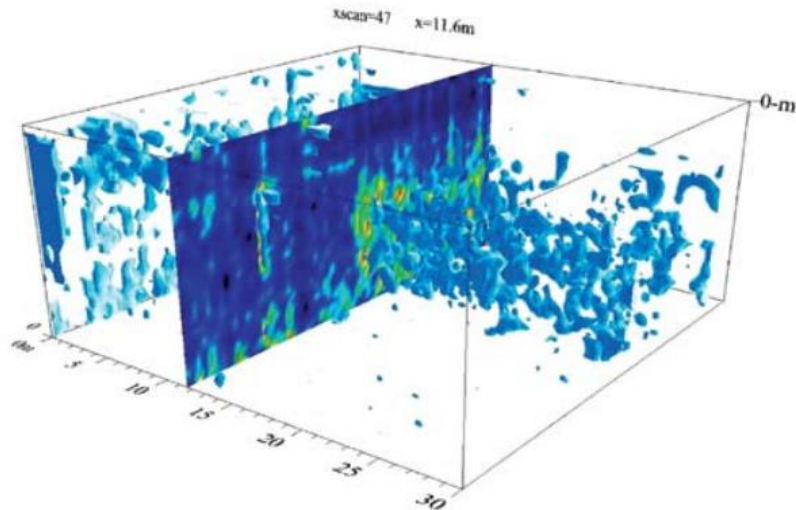




**Slika 4.5.** Primjer korištenja GPR [9]

Kod analiziranja odziva elektromagnetskog impulsa dolazi se do mnoštvo podataka koji će s detekcijom omogućavati točno pozicioniranje, varijacijama koji se dešavaju u sustave, te također kod same građe tla i stijena i mnogih drugih.

Može se i poslije provesti numerička analiza rezultata, koja će da uspostavi relacije između vremenskih odziva, te faznog pomaka i magnitude refleksije. Ova analiza se može odraditi kada se primjenjuju filtera, koji služe za uklanjanje elektromagnetskih šumova i također neželjenih odziva koji se stvaraju, te na kraju se dobije 3D prikaz podzemlja u zoni gdje su provedena ispitivanja. Taj 3D prikaz je vidljiv na slici 4.6.



**Slika 4.6.** 3D interpretacija anomalija u tlu u kubusu 30x30x10m (b<sub>x</sub>l<sub>x</sub>h) koje predstavljaju diskontinuitet u tlu (stijeni) ispunjenu aluvijem [8]

Rezolucija i dubina penetracije koja se dešava kod GPR-sustava su obrnuto proporcionalne. Razlog tome je zbog prirode širenja elektromagnetskog vala koja se dešava kroz provodljiv medij. Ako se želi ostvariti veća dubina penetracije, koristiti će se GPR-sustav samo što onda mora da bude na nižoj frekvenciji, iako će se onda zbog toga dobiti manja rezolucija. Iako to zapravo izgleda jako loše, rezolucije koje su u sadašnjosti moguće s obzirom na dubinu penetracije, jako su odgovarajuće većini zahtjeva koje zahtijevaju inženjeri.

Kod GPR radara mogu se razlikovati dvije rezolucije, a to su vertikalna rezolucija i horizontalna rezolucija. Vertikalna rezolucija je rezolucija kod koje sustav ima sposobnost da nađe razliku između dva bliska objekta, koje se nalaze u smjeru rasprostiranja tih radarskih impulsa, dok horizontalna rezolucija je rezolucija kod koje sustav ima sposobnost da razlikuje dva bliska objekta koja bi se nalazila na istoj udaljenosti od samog GPR uređaja, a taj smjer je okomit na smjer rasprostiranja GPR radarskog impulsa.

I vertikalna i horizontalna rezolucija su dominantne u funkciji centralne frekvencije uređaja, dok je samo horizontalna rezolucija dominantna u funkciji dubine ili drugim riječima to je udaljenost tog objekta od same antene GPR sustava.

Kod grube procjene vertikalne rezolucije  $R_v$  je negdje oko jedne četvrtine valne duljine centralne frekvencije sustava koja ima oznaku  $\lambda$ , a horizontalna rezolucija se izražava sljedećom formulom [8]:

$$R_h = \frac{\lambda}{4} + \frac{D}{2\varepsilon - 1} \quad (4-1)$$

$$R_{hl} = \frac{1}{2}R \quad (4-2)$$

U izrazu (4-1) i izrazu (4-2) su predstavljene sljedeće oznake:

$R_h$  - horizontalna rezolucija koja je u smjeru polaritet antene

$R_{hl}$  - horizontalna rezolucija koja je poprečna na polaritet antene

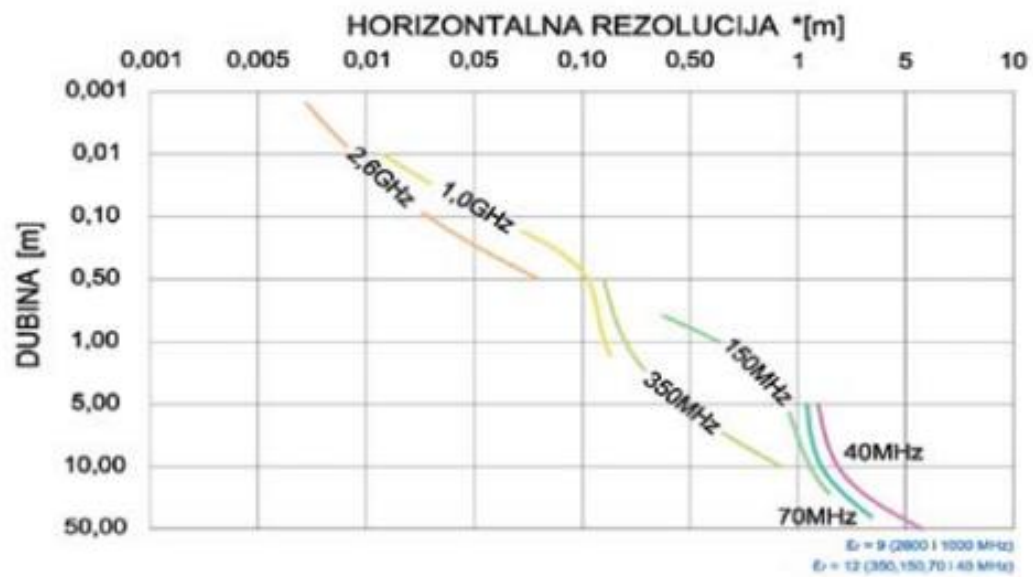
$\lambda$  - valna duljina centralne frekvencije GPR-radara

$D$  - dubina na kojoj se ocjenjuje rezolucija

$\varepsilon$  - dielektrična konstanta medija

Za navedene izraze (4-1) i (4-2) može se vidjeti da je kod vertikalne rezolucije sustava stabilnija po dubini, dok kod horizontalne rezolucije sustava bitnije degradira dubinu na kojoj se mora provoditi prikupljanje koje je obavljeno GPR sustavom, to jest bitnije pada kako se povećava dubina. Kako je rezolucija koja se koristi kod radarskog sustava sve gora za veće dubine, ovaj sustav opet može da detektira plohe diskontinuiteta, pukotine i kaverne, no neće se moći razlučiti objekti koji su blizu jedan drugome naspram promatrane dubine.

Na slici 4.7. može se vidjeti kako izgleda prikaz kod horizontalne rezolucije GPR-uređaja prema dubini na kojoj ide i centralnoj frekvenciji.

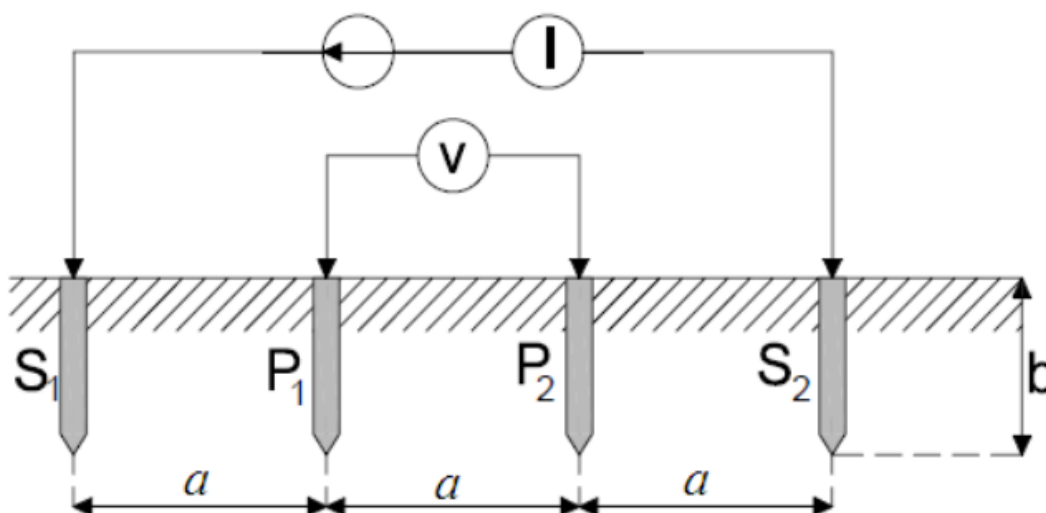


Slika 4.7. Horizontalna rezolucija GPR-uređaja prema dubini i centralnoj frekvenciji [8]

## 5. NAJPOZNATIJE GALVANSKE METODE KOD MJERENJA SPECIFIČNOG OTPORA TLA

### 5.1. WENNER-OVA METODA KOD MJERENJA SPECIFIČNOG OTPORA TLA

Slika 5.1. predstavlja prikaz kako bi trebalo izgledati postupak Wenner-ove metode i sami razmaci između sonda koje moraju biti isti.



**Slika 5.1.** Shema Wenner-ove metode mjerenja specifičnog otpora tla [5]

Kod prikaza slike 5.1. kod Wenner-ove metode za mjerenje specifičnih otpora tla u upotrebi su uvijek četiri sonde ili elektrode, koje su postavljene u istom pravcu, te moraju da budu na istim udaljenostima koje su na slici 5.1. označene s  $a$ , dok oznaka  $b$  označava dubinu koliko je sonda ukopana u tlo. Strujne sonde su na Wenner-ovoj metodi vanjske sonde, dok su one unutarnje potencijalne ili naponske. Ako su elektrode razmjerno male u odnosu na njihovu međusobnu udaljenost tretiramo ih kao točkaste uzemljivače [10]. Puštanjem struje kroz sonde dolazi do javljanja potencijala na strujnim sondama S<sub>1</sub> i S<sub>2</sub>. Takva razlika koja se

javi u potencijalima se onda mjeri voltmetrom. Voltmetar mora biti spojen na unutarnje sonde ( $P_1$  i  $P_2$ ) kako bi mogao da izmjeri.

Wenner-ova metoda mjerenja specifičnih otpora tla je prikladan za određivanje parametara dvoslojnog tla. Za ovo mjerenje se uzima posebno specijalizirani baterijski napajani mjerni uređaj. Mjerni uređaj u sebi sadrži strujni izvor sinusno promjenjive struje kojemu je frekvencija različita od mrežne, tj. od 50/60 Hz, koja se ne podudara s mogućim harmonicima mreže, filter kojim se izdvaja izmjenični mjerni napon frekvencije strujnog izvora mjereno voltmetrom, a koji potiskuju ostale frekvencije te ampermetar [11].

Kod proračuna specifičnog otpora potrebno je znati koliki je otpor tla  $R$ , koji se dobije ispitnom strujom  $I$  i naponom  $U$  koji se prikazuje na voltmetru. Za prividni specifični otpor tla koji se računa prilikom korištenja Wenner-ove metode je prikazan prema formuli (5-1) [5]:

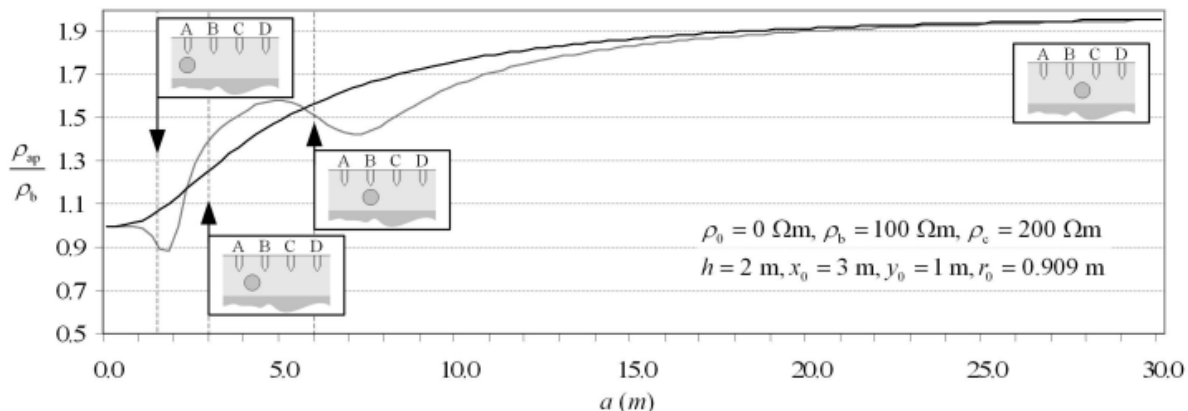
$$\rho_a = \frac{4 \cdot \pi \cdot a \cdot R}{1 + \frac{2 \cdot a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (5-1)$$

Ako dubina zabijene sonde, koja je predstavljena oznakom  $b$ , puno manja naspram razmaka između sonde  $a$ , kao na primjeru  $a > 20b$ , onda se za formulu (5-1) može pojednostaviti na formulu (5-2) za računanje prividnog specifičnog otpora [5]:

$$\rho_a = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R \quad (5-2)$$

$a$  je već naznačeno da je to razmak između sondi sa mjernom jedinicom  $m$ , dok je  $R$  vrijednost izmjerenog otpora sa mjernom jedinicom  $\Omega$ .

Na slici 5.2. može se vidjeti kako bi izgledalo da je Wenner-ova metoda korištena u dvoslojnom tlu gdje je donji sloj tla veće otpornosti nego gornji dio tla.



**Slika 5.2.** Prikaz prividnog specifičnog otpora tla Wenner-ovom metodom na dvoslojnom tlu [12]

Ako je prostor između sonde veći, to automatski znači da će i volumen tla biti veći, a time će se onda i dobiti veća dubina tla koja će biti uključena u mjerenje. Vrijednost koja se dobije za prividni specifični otpor je srednja vrijednost specifičnog otpora za volumen tla koji se mjeri od površine tla do dubine, koja će biti ekvivalentna udaljenosti koja se nalazi između sonde.

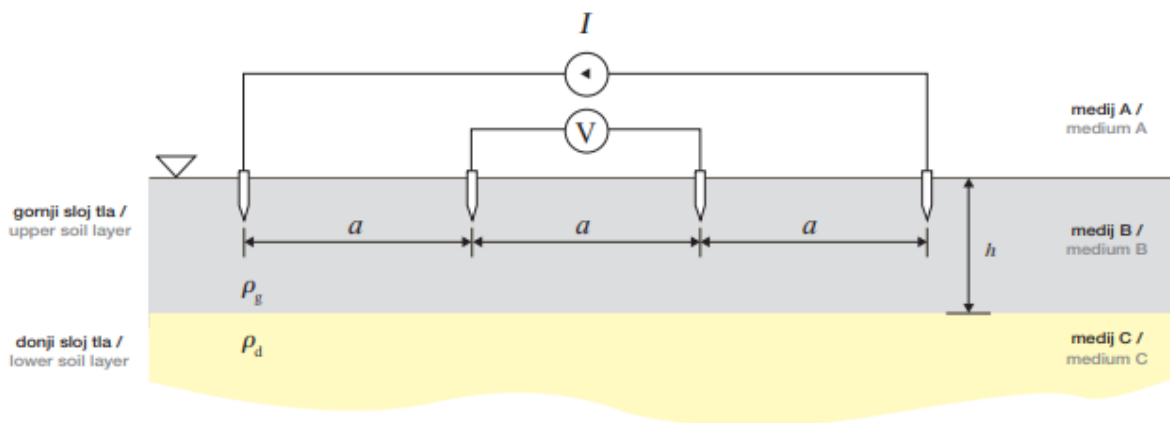
Nedostatak prilikom korištenja Wenner-ove metode je taj što takva metoda izvlači jako puno vremena kako bi se izvršila mjerenja. Razlog je taj što za svako mjerenje koje se mora raditi, sve će se 4 sonde morati pomicati (zapravo možemo prvu sondu ostaviti na mjestu, a micati ostale 3), a ako je razmak veći od 10 metara onda će to stvarati te vremenske probleme. Između ostalog, Wenner-ova metoda će radi velikih razmaka, koji će se stvoriti između sonde, zahtijevati jako dugačke kabele za sve četiri sonde. Također, ova je metoda osjetljiva na efekt bočnih promjena u tlu, jer se kod svakog mjerenja sve 4 sonde će biti pomicanе.

Kao prednost korištenja Wenner-ove metode je omjer primljenog napona na unutarnjim sondama i struje koja se pušta na vanjskim sondama. Ovo je razlog zašto je Wenner-ova metoda jedna najkorištenijih metoda u praksi.

### 5.1.1. Primjer mjerenja Wenner-ovom metodom kod dvoslojnog modela tla

Za dvoslojni model tla imamo dva sloja koja se razlikuju prema specifičnom električnom otporu i ta dva sloja se dijele na gornji i donji sloj tla. Gornji sloj ima određenu dubinu  $h$  za

razliku od donjeg koji ide u beskonačno. Znači za ovo mjerenje s potrebne tri značajke do kojih se mora doći, a to su: gornji specifični otpor tla oznake  $\rho_g$ , donji specifični otpor tla oznake  $\rho_d$  i dubina gornjeg sloja tla  $h$ . Slika 5.3. predstavlja mjerenje specifičnog otpora tla sa Wenner-ovom metodom kod dvoslojnog modela tla.



**Slika 5.3.** Mjerenje Wenner-ovom metodom kod dvoslojnog tla [11]

Prolaskom struje  $I$  kroz vanjske elektrode koje su zabijene u tlo, nastaje strujno polje u tlu, te ono potrebno da zadovolji rubne uvjete koji se dešavaju na svim granicama diskontinuiteta specifičnog električnog otpora na razini tla i zraka, koji su prikazani u formulama (5-3) i (5-4) [11] [13]:

$$n \times (\rho_A J_A - \rho_B J_B) = 0, \quad n \times (\rho_B J_B - \rho_C J_C) = 0 \quad (5-3)$$

$$n \cdot (J_A - J_B) = 0, \quad n \cdot (J_B - J_C) = 0 \quad (5-4)$$

U ovim formulama oznaka  $n$  predstavlja vektor normale koji se nalazi na granici diskontinuiteta specifičnog električnog otpora, dok  $J_A$ ,  $J_B$  i  $J_C$  predstavljaju gustoću struje u koja se javlja u mediju A (zraka) koji se nalazi na granici diskontinuiteta specifičnog električnog otpora, gustoća struje u mediju B (gornji sloj tla) koji se nalazi na granici diskontinuiteta specifičnog električnog otpora i gustoća struje u mediju C (donji sloj tla) koji se nalazi na granici diskontinuiteta specifičnog električnog otpora.



Specifični električni otpor zraka se u ovom primjeru pretpostavlja da je iznosio  $10^{18} \Omega\text{m}$  i predstavljao je medij A. Poznavanje rubnih uvjeta (5-3) i (5-4) na granicama diskontinuiteta specifičnog električnog otpora omogućava matematičko rješavanje zadaće i određivanje potencijala na naponskim mjernim elektrodama [11]. Ta zadaća se vrlo često rješava s načinom odslikavanja tog izvora polja od svih granica diskontinuiteta specifičnog električnog otpora.

Prvo će se odslikavanje odvijati na granici tla i zraka, gdje se nalazi polukugla s kojom će se nadomještati štapna elektroda koja će se odslikavati u polukuglu koja se nalazi u mediju A, što se može primijetiti na slici 5.3. Nakon toga sljedeće je po redu odslikavanje kugli koji su već od prije dobivene, a to su kugle A i D od njihove granice gornjeg i donjeg sloja tla. Nakon toga će se slika koja se dobije iz donjeg sloja tla odslikavati od granice tla i zraka, te će se nakon toga ovaj postupak ponovno ponavljati.

Potencijal koji se nalazi u središtu naponske elektrode, označene oznakom B, će zbog struja iz elektroda A i D koje utječu na njega biti prikazana formulom (5-5) [11]:

$$\varphi_B = (2I) \frac{\rho_g}{4\pi} \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{2a} \right) = (2I) \frac{\rho_g}{4\pi} \left( \frac{1}{2a} \right) \quad (5-5)$$

U izrazu (5-5) vrijednost te struje je dupla, a razlog tome je što iz originalne polukugle protječe struja koja se već od prije stopila sa svojom slikom. Nadalje potencijal koji se nalazi u središtu naponske elektrode (B), uz korištenje oba prva odslikavanja elektroda mase može predstaviti formulom (5-6) [11]:

$$\varphi_B = \frac{I\rho_g}{2\pi} \left[ \frac{1}{2a} + \left( \frac{2\beta}{\sqrt{a^2 + (2h)^2}} - \frac{2\beta}{\sqrt{(2a)^2 + (2h)^2}} \right) + \left( \frac{2\beta^2}{\sqrt{a^2 + (4h)^2}} - \frac{2\beta^2}{\sqrt{(2a)^2 + (4h)^2}} \right) \right] \quad (5-6)$$

Kako je potencijal u točki B jednak negativnom potenciju u točki C zbog simetrije koja je prikazana na slici 5.3., napon  $U_{BC}$  će onda da bude jednak 2 puta većem nego na potencijalu u točki B, te će se onda za omjer izmjerenog napona  $U_{BC}$  i struje koja je utisnuta dobiti izraz (5-7) [11]:

$$\frac{U_{DC}}{I} = \frac{\rho_g}{\pi} \left[ \frac{1}{2a} + \left( \frac{2\beta}{\sqrt{a^2 + (2h)^2}} - \frac{2\beta}{\sqrt{(2a)^2 + (2h)^2}} \right) + \left( \frac{2\beta^2}{\sqrt{a^2 + (4h)^2}} - \frac{2\beta^2}{\sqrt{(2a)^2 + (4h)^2}} \right) \right] \quad (5-7)$$

Prividni specifični otpor koji se koristi za Wenner-ov raspored elektroda (5-8) (ova formula će se koristiti dolje u zadatku sustava ANSYS) [11]:

$$\rho_{PRIVIDNO}(a) = 2\pi a \frac{U_{DC}}{I} \quad (5-8)$$

Uvrštavanjem formule (4-7) u formulu (4-8), dobiti će se formula za izračun prividnog specifičnog otpora tla, gdje su oba prva odslikavanja dodana [11]:

$$\rho_{PRIVIDNO}(a) = \rho_g \left[ 1 + \left( \frac{4\beta}{\sqrt{1 + \left(\frac{2h}{a}\right)^2}} - \frac{4\beta}{\sqrt{4 + \left(\frac{2h}{a}\right)^2}} \right) + \left( \frac{4\beta^2}{\sqrt{1 + \left(\frac{4h}{a}\right)^2}} - \frac{4\beta^2}{\sqrt{4 + \left(\frac{4h}{a}\right)^2}} \right) \right] \quad (5-9)$$

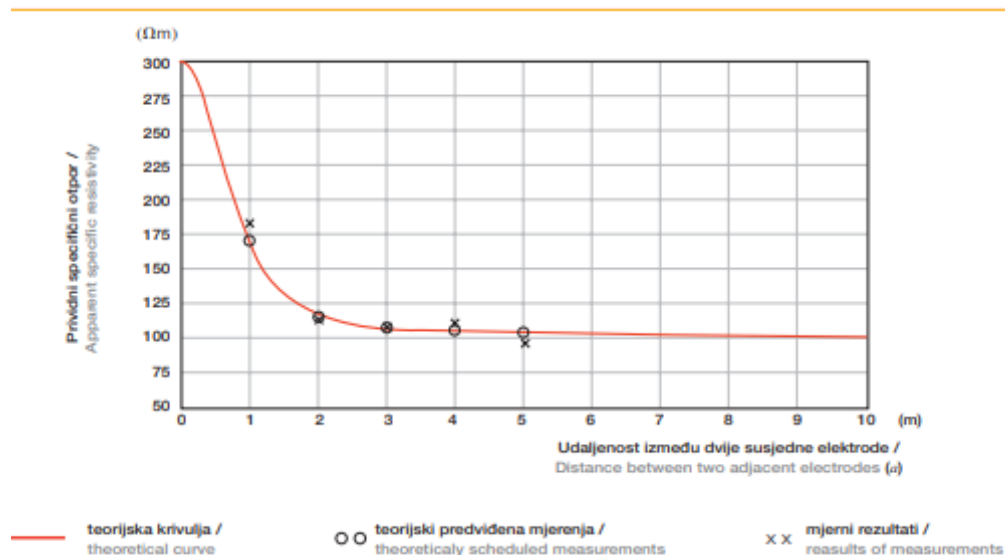
Zbog udaljenosti između odslikanih izvora polja od granice tla i zraka su:  $2h, 4h, 6h, \dots$ , lako će se određivati opći izraz za prividni specifični otpor tla za uvažanih  $N$  slika, a on je predstavljen formulom (5-10) [11]:

$$\rho_{PRIVIDNO}(a) = \rho_g \left[ 2 + 4 \cdot \sum_{i=1}^N \beta^{(i)} \left( \left( 1 + \left( i \cdot \frac{2h}{a} \right)^2 \right)^{-\frac{1}{2}} - \left( 4 + \left( i \cdot \frac{2h}{a} \right)^2 \right)^{-\frac{1}{2}} \right) \right] \quad (5-10)$$

u kojemu se koeficijent refleksije računa izrazom [11]:

$$\beta = \frac{\rho_d - \rho_g}{\rho_d + \rho_g} \quad (5-11)$$

Ako u izraz (5-10) doda da je specifični električni otpor kod gornjega sloja tla iznosa  $\rho_g = 300 \Omega\text{m}$  i  $h = 1 \text{ m}$  (koja predstavlja njegovu debljinu), dok specifični električni otpor kod donjega sloja tla iznosa  $\rho_d = 100 \Omega\text{m}$ , onda se dobije krivulja na slici 5.4. Ta krivulja predstavlja krivulju prividnog specifičnog električnog otpora tla koja je na razmaku između susjednih elektroda  $a$ .



**Slika 5.4.** Prividni specifični otpor dvoslojnog tla u funkciji udaljenosti između dvije susjedne elektrode [11]

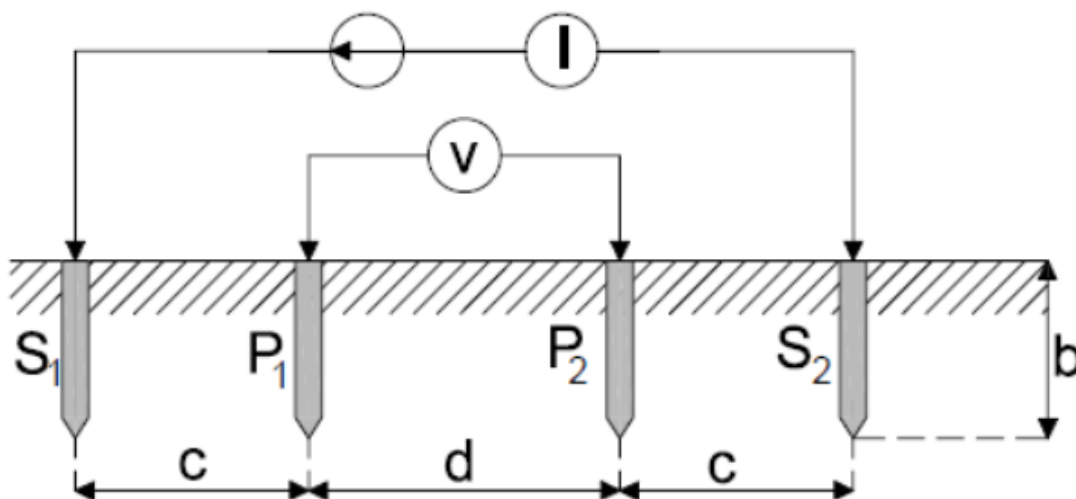
Za male razmace koji se nalaze između elektroda, struja koja je utisnuta u tlo većim dijelom će se zatvarati kroz gornji sloj tla, te će se zbog takvog razloga prividni specifični otpor biti jednak gornjem sloju tla. Kada bi se povećali razmaci između strujnih elektroda, onda bi struja dublje prodirala u tlo, te bi se na taj način silnice zatvarale i preko donjega dijela tla. Kod slučaja gdje su razmaci između strujnih elektroda veliki, tada se silnice u strujnom polju veći broj puta prođu kroz donji sloj tla, te će kod takvog slučaja prividni specifični električni otpor biti onda jednak specifičnom električnom otporu kod donjeg sloja tla. Kod izraza (5-10) i (5-11) s velikom preciznošću se dobiva kontinuirana krivulja prividnog specifičnog otpora. Elektrode se ne smiju približavati tako da udaljenost bude manja od duljine koje će te

elektrode da idu u tlo, jer se tada dešava da će utjecaj elektrode na elektrodu biti jako velik. Zbog toga se razloga na temelju mjerenih rezultata neće biti moguće na jednostavni način da se odredi specifični električni otpor gornjeg sloja tla.

Ako se očekuje da će gornji sloj tla da bude tanak, onda će se mjerenje trebati da provede sa manjim razmakom između elektroda koji će otprilike da iznosi oko 0,75 m, 1 m ili 1,5 m (može i malo više). Kada bi se određivao prividni specifični otpor onda je najtočnije uzimati izraz od (5-10). Prilikom upotrebljavanja tog izraza će da se izbjegne veliki razmak između elektroda.

## 5.2. SCHLUMBERGER-OVA METODA KOD MJERENJA SPECIFIČNOG OTPORA TLA

Slika 5.5. predstavlja Schlumberger-ove metodu mjerenja specifičnog otpora tla.



**Slika 5.5.** Shema Schlumberger-ove metode mjerenja specifičnog otpora tla [5]

Na slici 5.5. se može primijetiti da razmak između naponskih (unutarnjih) sondi može biti proizvoljan, ali se mora paziti na razmak između naponskih i strujnih (vanjskih) sondi.

Za mjerenje specifičnog otpora tla pomoću Schlumberger-ove metode se također kao i kod Wenner-ove metode koriste četiri sonde. Naravno te četiri sonde su dvije strujne i dvije naponske, kao što je i kod Wenner-ove metode, ali za razliku od Wenner-ove metode, ova metoda izbjegava neke nedostatke. Ti nedostaci se najčešće nailaze na poteškoćama u razmještanju strujnih i naponskih sondi. Kada se usporede Schlumberger-ova i Wenner-ova metoda one na pogled izgledaju isto, ali glavna razlika između njih je što kod Wenner-ove metode razmještaj sondi je jednak. Kod Schlumberger-ove metode sonde nisu na istom razmaku, to jest unutarnje sonde su na razmaku  $d$  i one su bliže su pomaknute jedna drugom u odnosu vanjske sonde koje su na razmaku  $c$  koji je veći od razmaka  $d$ . Kod pomicanja naponskih sondi, tako da budu bliže strujnim sondama, dešava se da se osjetljivost smanjuje, te će se time mjerenje poboljšati i biti točnije.

Ovakvo rješenje kod Schlumberger-ove metode mjerenja specifičnog otpora tla je problem kod Wenner-ove metode, kada se sonde kod Wenner-ove metode nalaze na relativno velikim udaljenostima, te će potencijal na naponskim sondama postati niskog iznosa, što će iziskivati veću osjetljivost kod samog instrumenta. Na primjer, tijekom mjerenja otpornosti tla, Schlumberger-ova tehnika mjerenja zahtijeva samo kretanje vanjskih (trenutnih) elektroda, a to je prednost u usporedbi s Wenner-ovom tehnikom mjerenja, gdje se moraju premjestiti sve četiri mjerne elektrode [14]. Taj instrument je priključen direktno na sonde, pa je točnost samog mjerenja kod Wenner-ove metode nepouzdana. Kod Schlumberger-ove metode raspored sve 4 sonde nije potrebno mijenjati kod svakog pojedinog mjerenja. Najčešće je pravilo kod Schlumberger-ove metode da se strujne sonde pomiču u pravilu četiri ili pet puta za svako pomicanje naponskih sondi što mjerenje čini puno brže od Wenner-ove metode. Iz svih ovih prednosti navedenih kod Schlumberger-ove metode može se zaključiti da ju je puno lakše koristiti nego Wenner-ovu metodu.

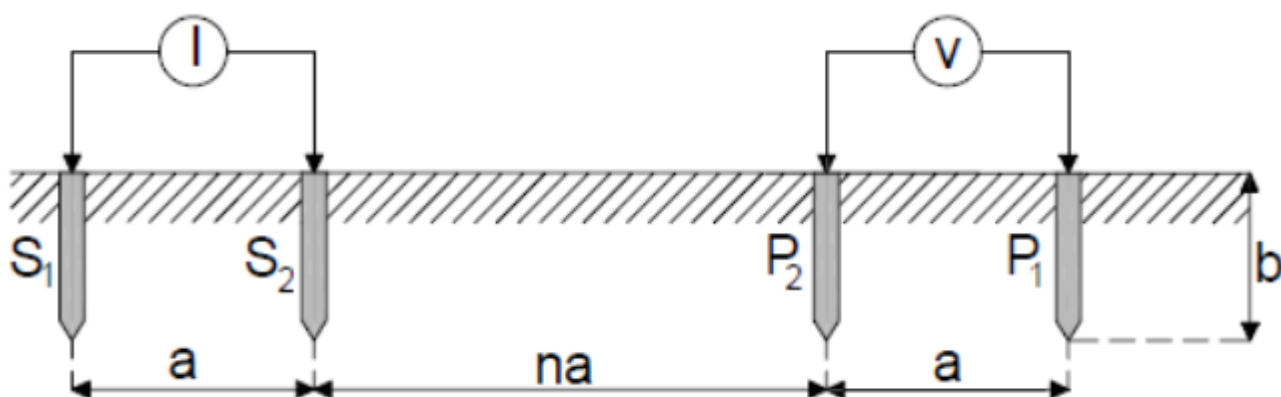
Ako se dubina na kojoj se zabadaju četiri sonde ( $b$ ), puno manja u odnosu sa razmacima  $c$  od naponske do strujne sonde i  $d$  razmakom između dviju naponskih sondi, onda se za računanje prividnog specifičnog otpora tla za Schlumberger-ovu metodu može koristiti jednadžba (5-12) [5]:

$$\rho_a = \pi \cdot \frac{c \cdot (c + d)}{d} \cdot R \quad (5-12)$$

Dok za nedostatke ove metode su neophodni dugački kabeli za strujne sonde, kao i kod Wenner-ove metode, te je analiza rezultata mjerenja kompleksnija od Wenner-ove metode.

### 5.3. DIPOL-DIPOL METODA MJERENJA SPECIFIČNOG OTPORA TLA

Slika 5.6. prikazuje Dipol-Dipol metodu i njezin način kako se mjeri specifični otpor tla. Na slici 5.6. se može zaključiti da je jako bitno da razmak između dviju strujnih i dviju naponskih sonda mora biti isti, to jest kako je prikazano na slici mora biti jednako oznaci  $a$ .



Slika 5.6. Dipol-Dipol metoda za mjerenje specifičnog otpora tla [5]

Kod Dipol-Dipol metode za mjerenje specifičnog otpora tla sadrži, kao i kod Wenner-ove i Schlumberger-ove metode, od dva para sonde. Na slici 5.6. prikazano je da su na lijevoj strani strujne elektrode, dok su na desnoj strani naponske elektrode. Razmak koji se nalazi između naponskih i strujnih elektroda je prikazan kao umnožak cijelog broja  $n$  i udaljenosti između naponskih i strujnih elektroda  $a$ .

Prividni specifični otpor tla prilikom korištenja Dipol-Dipol metode se izračunava prema jednadžbi (5-13) [5]:

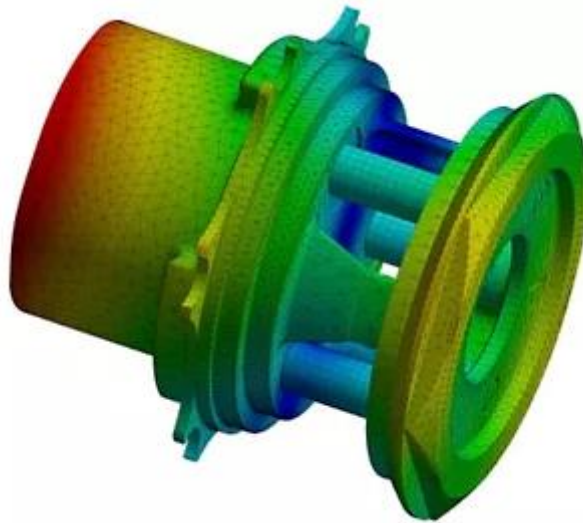
$$\rho_a = \pi \cdot a \cdot n \cdot (n + 1) \cdot (n + 2) \cdot R \quad (5-13)$$

Jedina nespomenuta oznaka iz izraza je R koja predstavlja vrijednost izmjerenog otpora mjerne jedinice  $\Omega$ , koja je izračunava na način da se podijeli izmjereni napon U na instrumentu i ispitna struja I koja je puštena u protok.

Prednost kod korištenja Dipol-Dipol metode naspram Wenner-ove i Schlumberger-ove metode je zato što koriste puno kraći kabeli i s time je mjerenje jednostavnije. No nedostatak ove metode je da su potrebni veliki generatori koji su imaju zadatak da proizvode ispitnu struju.

## 6. PROGRAM ANSYS

ANSYS se može definirati da je neki simulacijski softver za korištenje elektromagnetskih polja te se koristi kod svakakvih inženjera koji su zaduženi za projektiranje i analizu u 2-D i 3-D formatu elektromagnetskih i elektromehaničkih uređaja. Na slici 6.1. može se vidjeti jedna završena simulacija crteža u programu ANSYS-a.

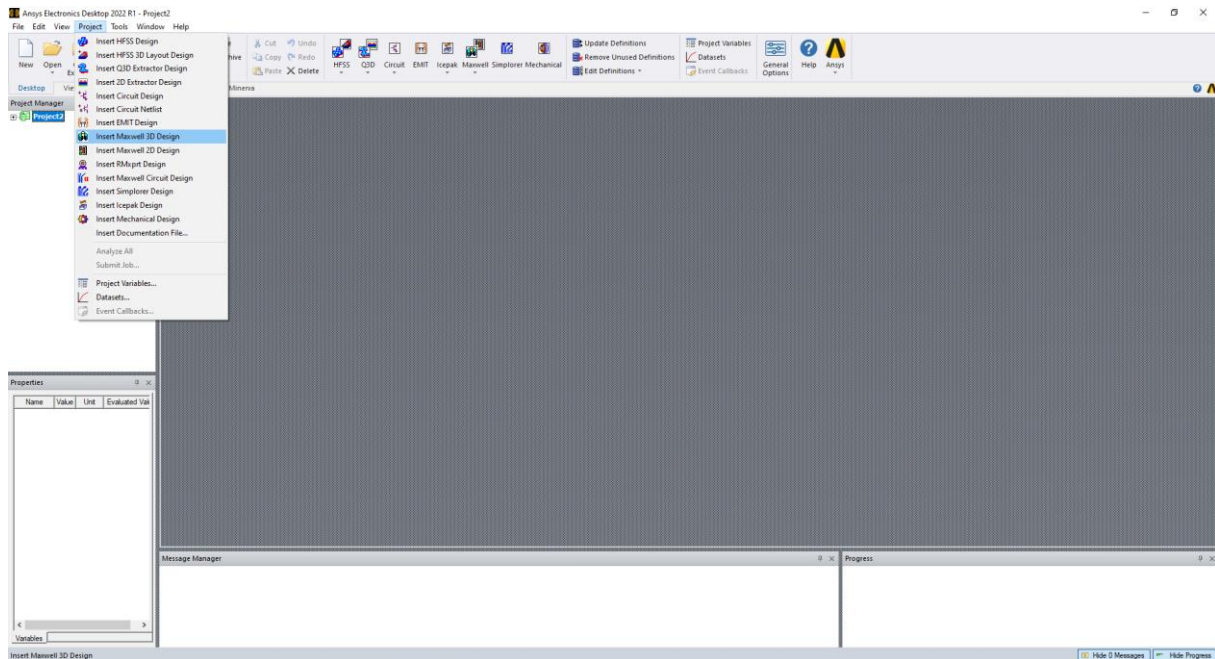


**Slika 6.1.** Crtež u programu ANSYS-a [15]



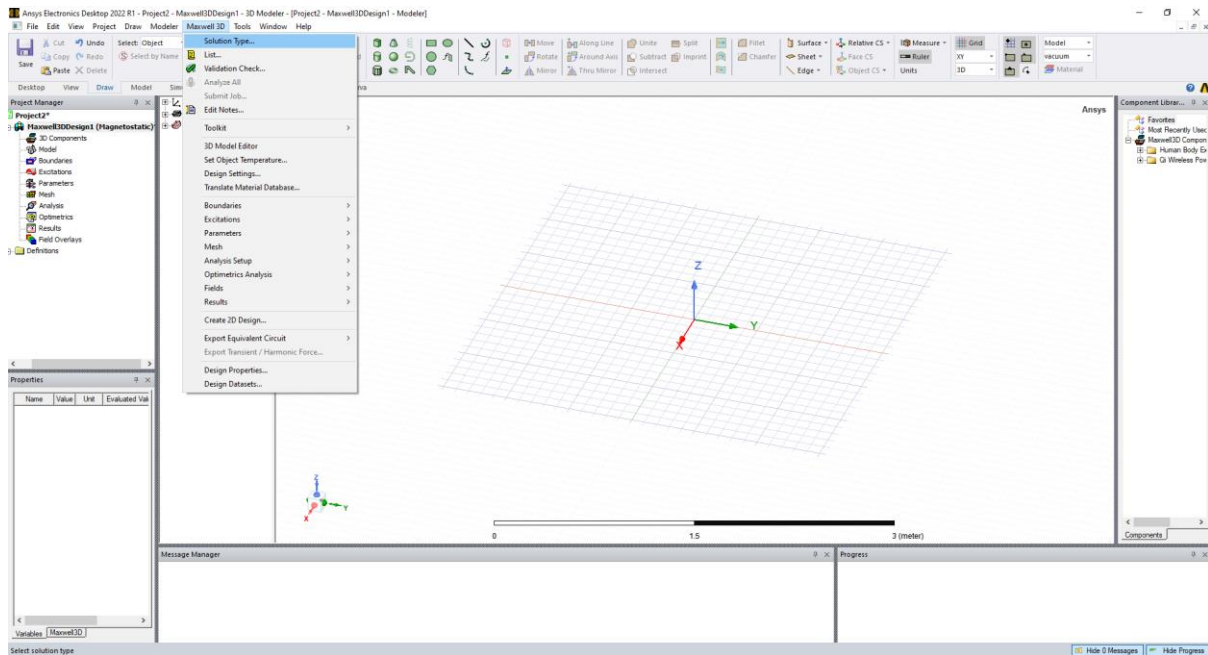
## 7. WENNER-OVA METODA U ANSYS SUSTAVU

Nakon otvaranja programa ANSYS ulazi se na „*project*“ u gornjem desnom uglu i stiže se tipka pod imenom „*Insert Maxwell 3D Design*“ za odabir rada kao što je prikazano na slici 7.1.

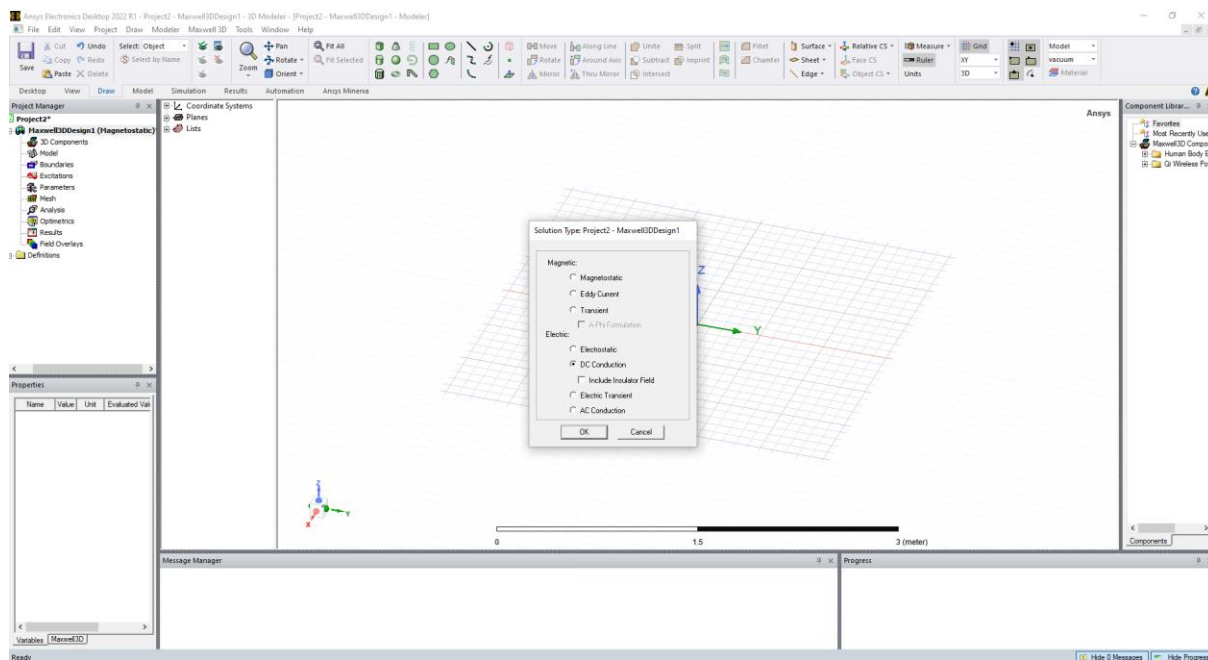


Slika 7.1. Odabir rada

Na slici 7.2. može se vidjeti kako doći do sljedećeg načina rada, dok na slici 7.3. može se vidjeti odabir načina rada „*DC conductor*“.

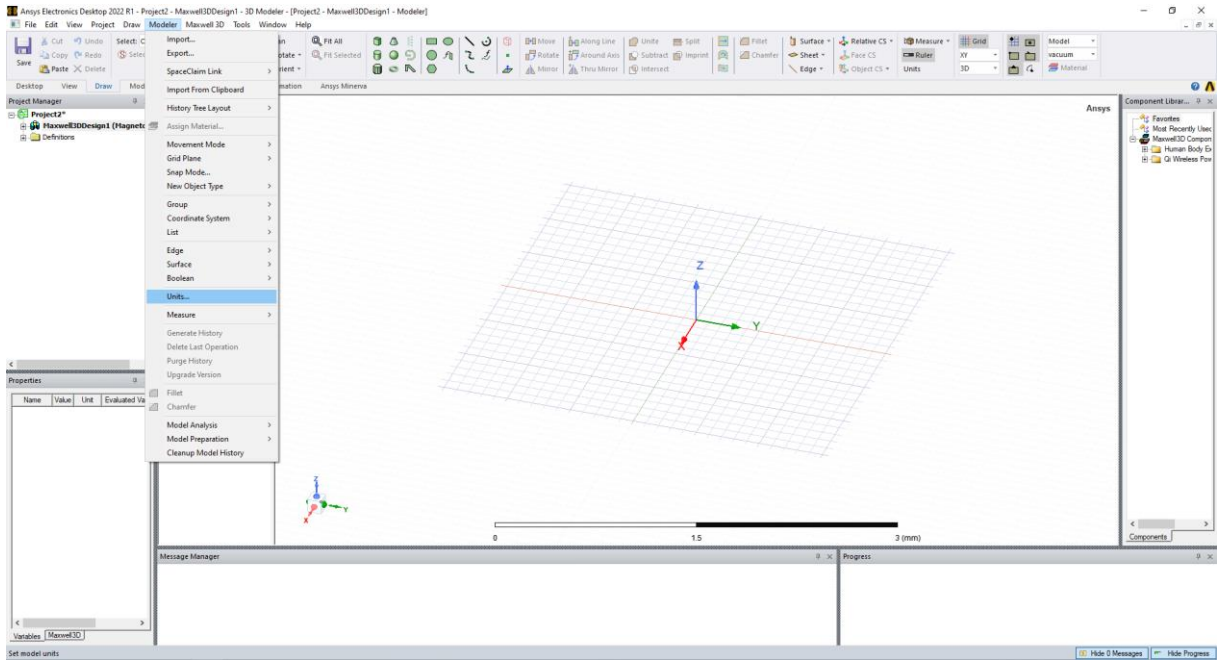


Slika 7.2. Prikaz dolaska do rada „DC conductor“

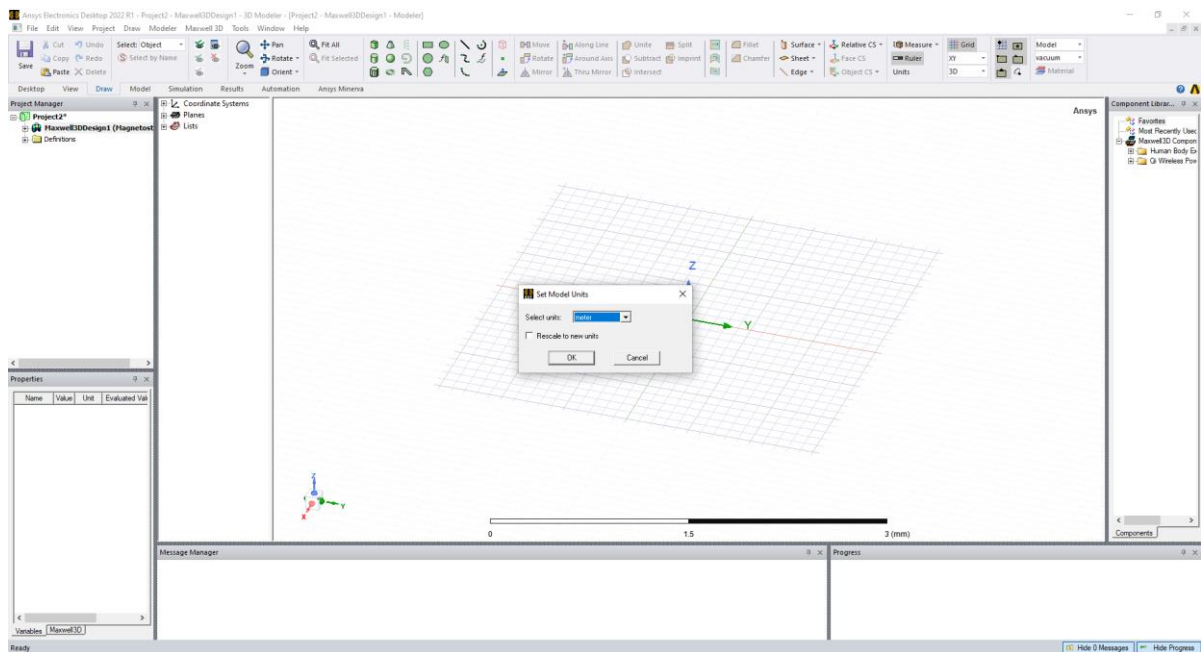


Slika 7.3. Odabir „DC conductor“

Poslije ovoga je izabrana mjerna jedinica sa kojom će dalje biti prikazano crtanje, a odabir mjerne jedinice i njegovo nalaženje se prikazuje na slikama 7.4. i 7.5.

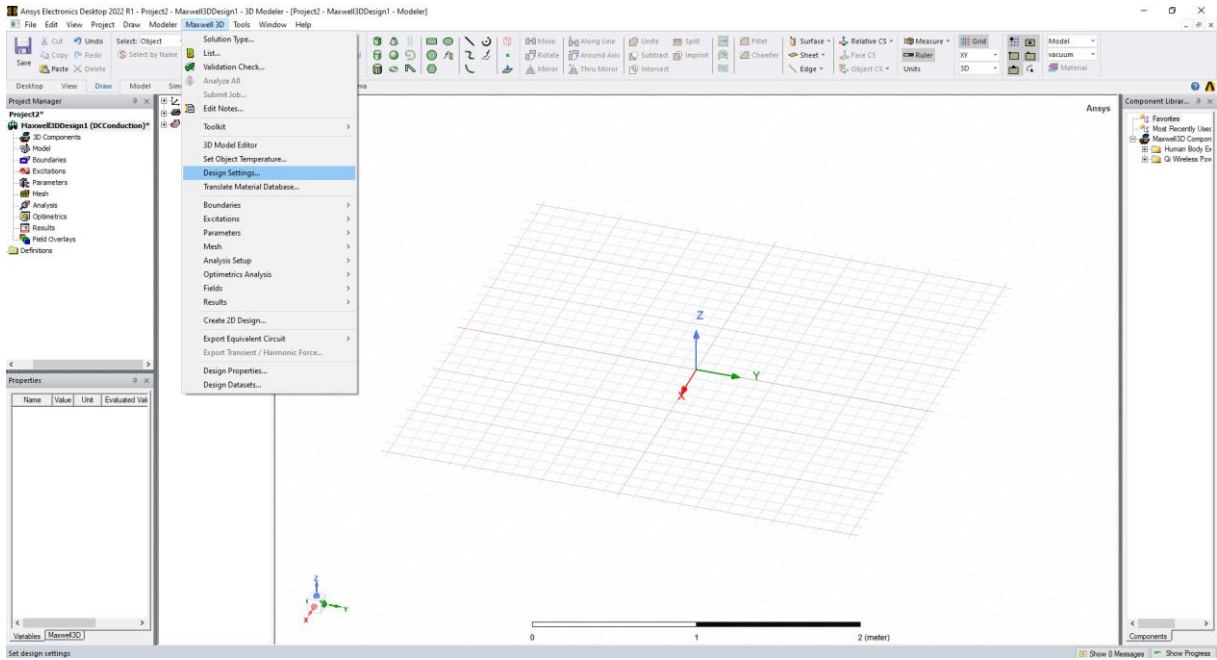


Slika 7.4. Dolazak do odabira mjernje jedinice

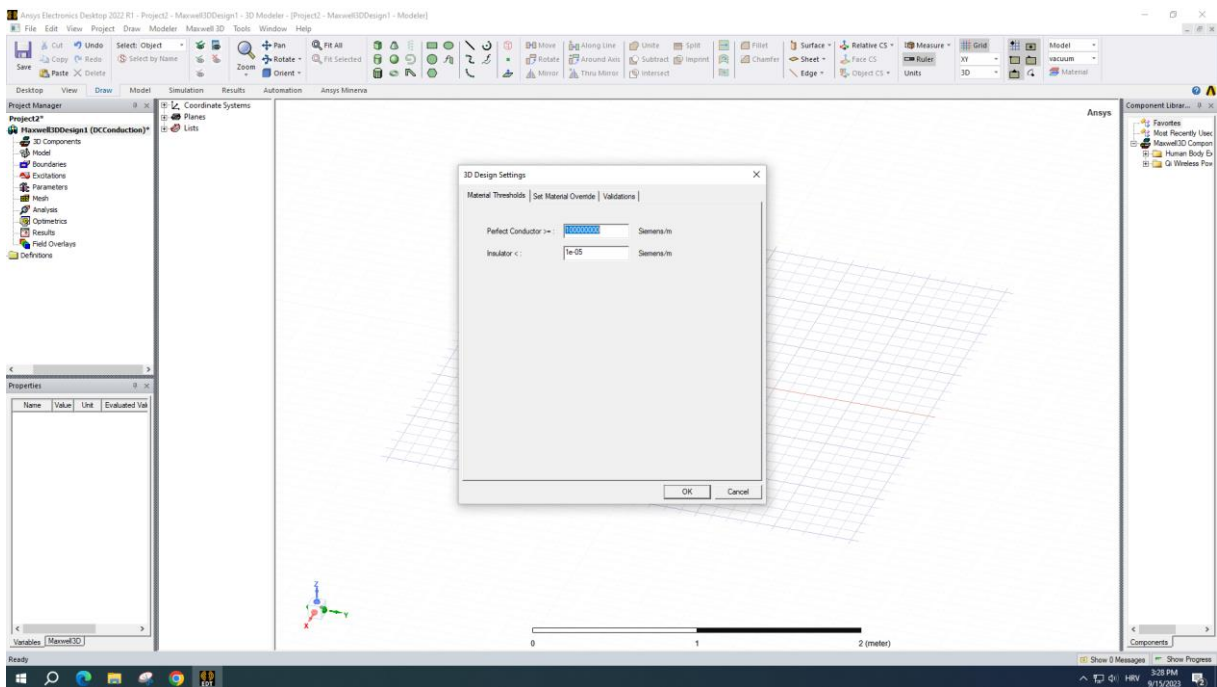


Slika 7.5. Odabir mjernje jedinice

Slike 7.6. i 7.7. prikazuju kako doći na „Design Settings“ i odabrati za zadatak proizvoljne otpore za „Perfect Conductor“ i „Insulator“.

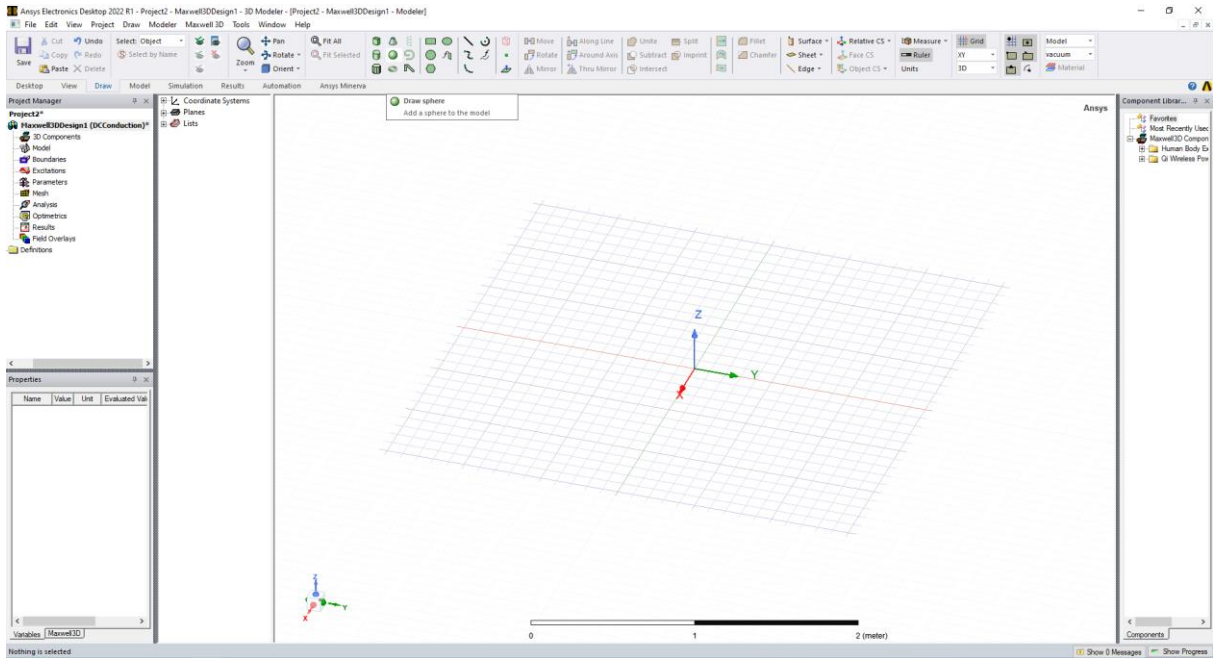


Slika 7.6. Prikaz dolaska do „Design Settings“



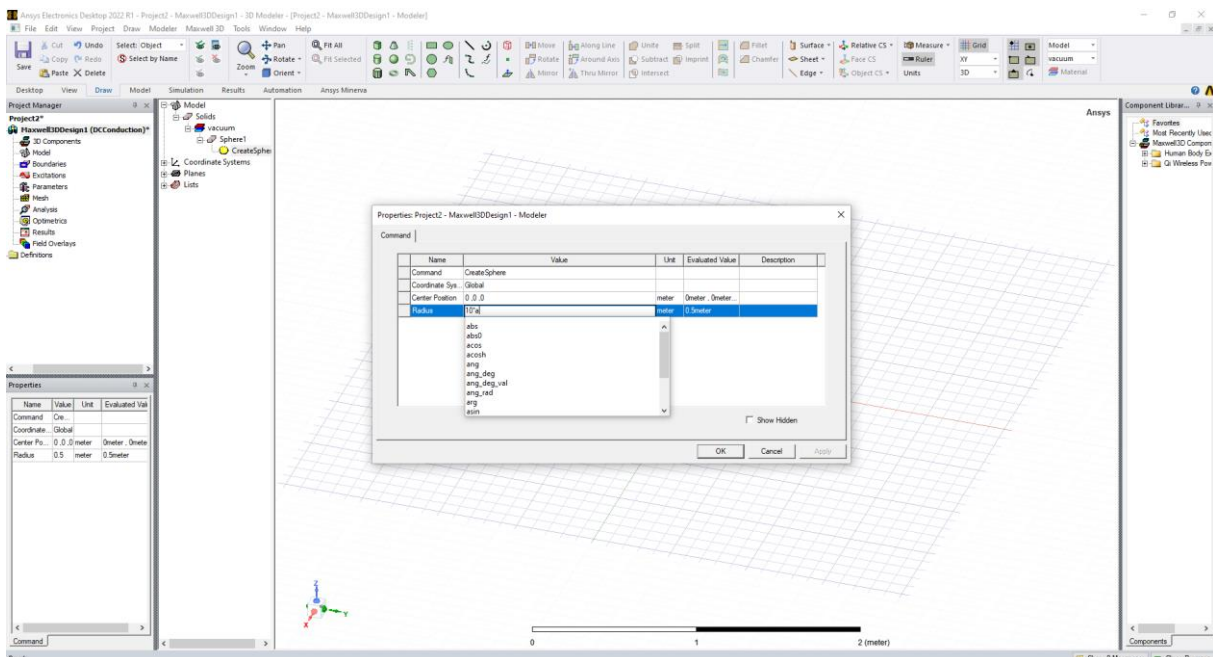
Slika 7.7. Odabir otpora konduktera i izolatora

Slika 7.8. prikazuje gdje se nalazi izbor za kuglu koja će u ovom zadatku predstavljati donji sloj zemlje u ovom zadatku (poslije će se vidjeti da to zapravo nije kugla, nego polukugla).



Slika 7.8. Odabir kugle

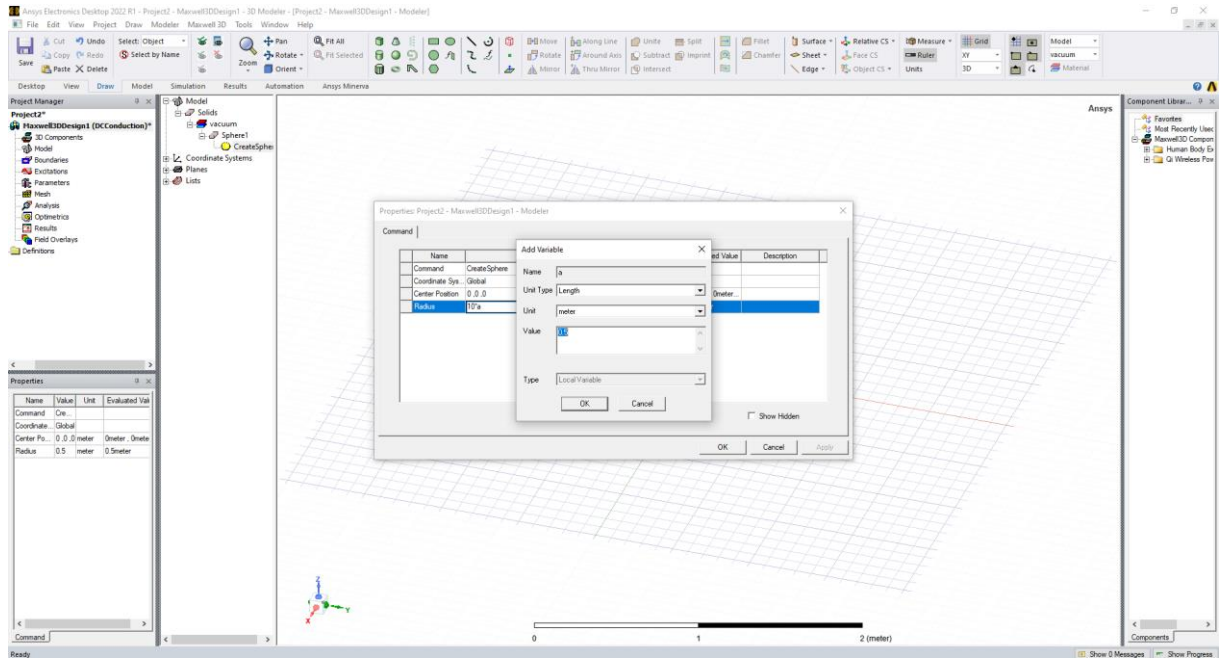
Slika 7.9. prikazuje odabir kuglinih kordinata i radijusa.



Slika 7.9. Crtanje kugle

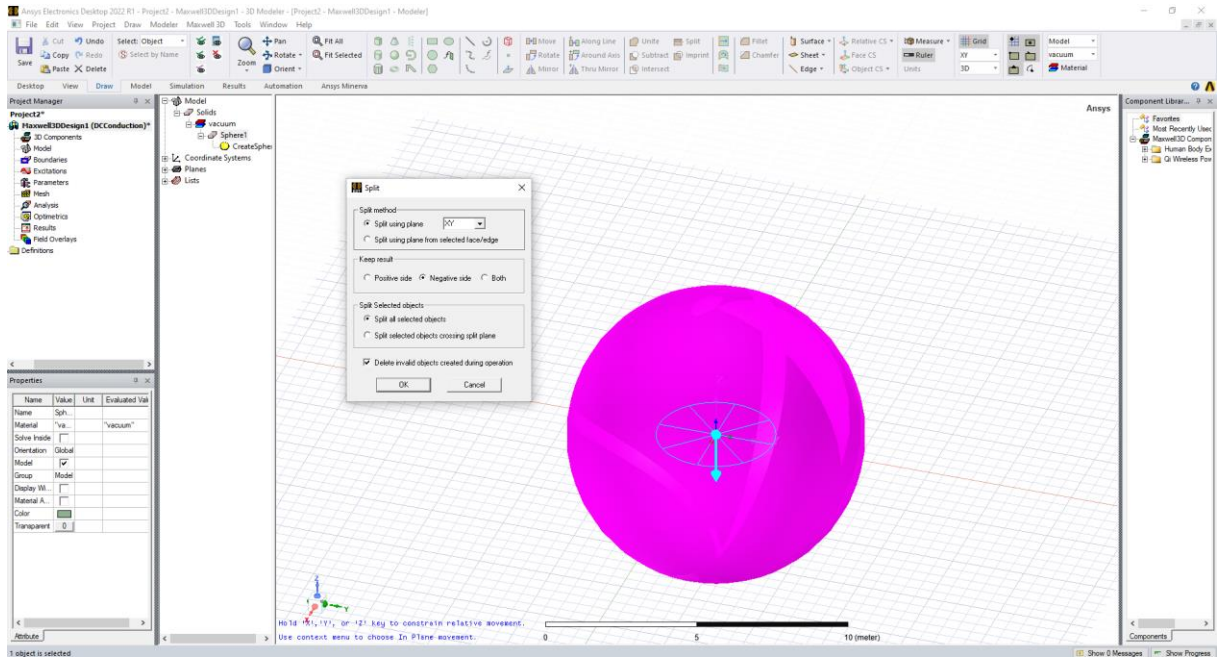
Za vrijeme upisivanja radijusa upisano je da je radijus kugle  $10 \cdot a$ . Zbog neupisivanja vrijednosti  $a$  prije u program ANSYS, ANSYS ne raspoznaje varijablu  $a$  te onda na slici 7.10.

je prikazan upis vrijednosti varijable  $a$ . Varijabla  $a$  će poslije se poslije u parametričkom dijelu odrediti koliko će velika biti.

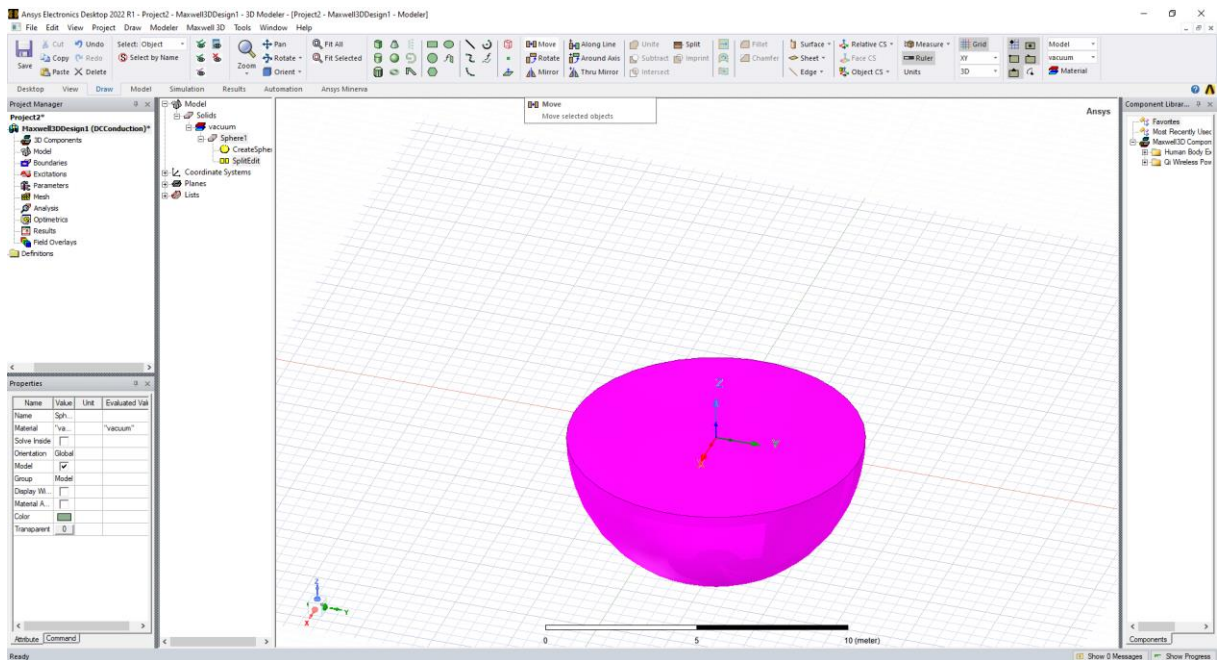


Slika 7.10. Vrijednosti varijable  $a$

Kuglu radijusa  $10 \cdot a$  se treba presjeći po negativnoj strani kako bi mogli dodati na njega drugi sloj zemlje, to jest gornji sloj zemlje (koji će u ovom zadatku da predstavlja valjak). Polovljenje (eng. „*Split*“) kugle je prikazan slici 7.11., te je njeni izgled nakon polovljenja prikazan na slici 7.12.

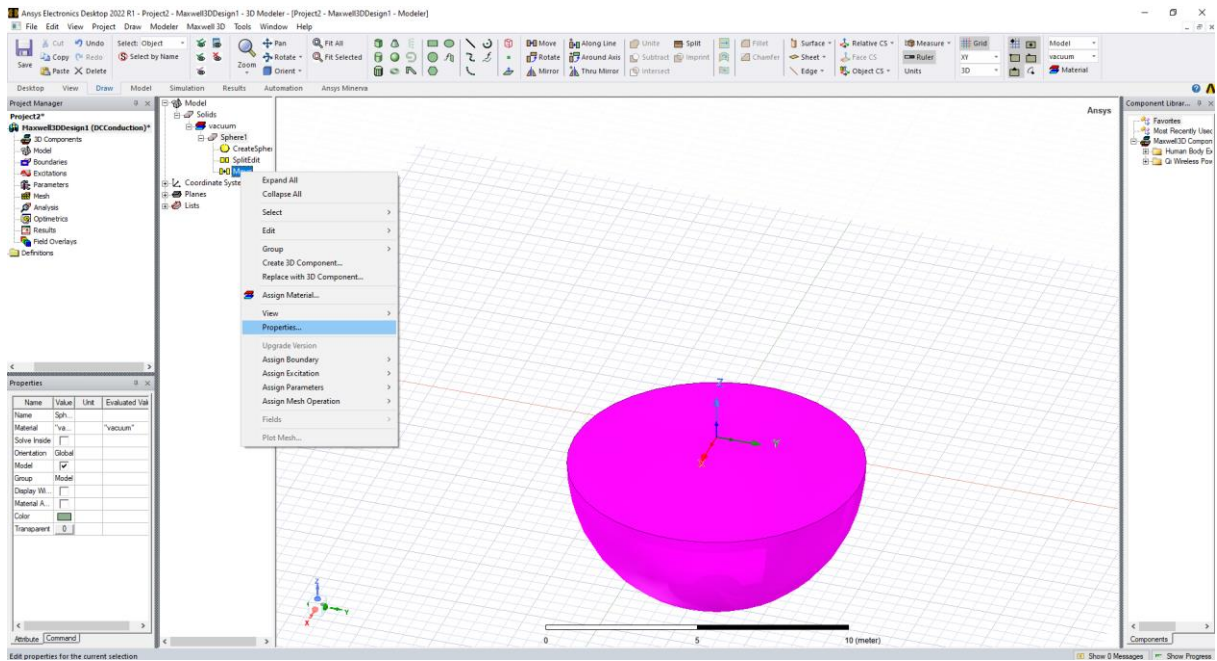


Slika 7.11. Prepolov kugle

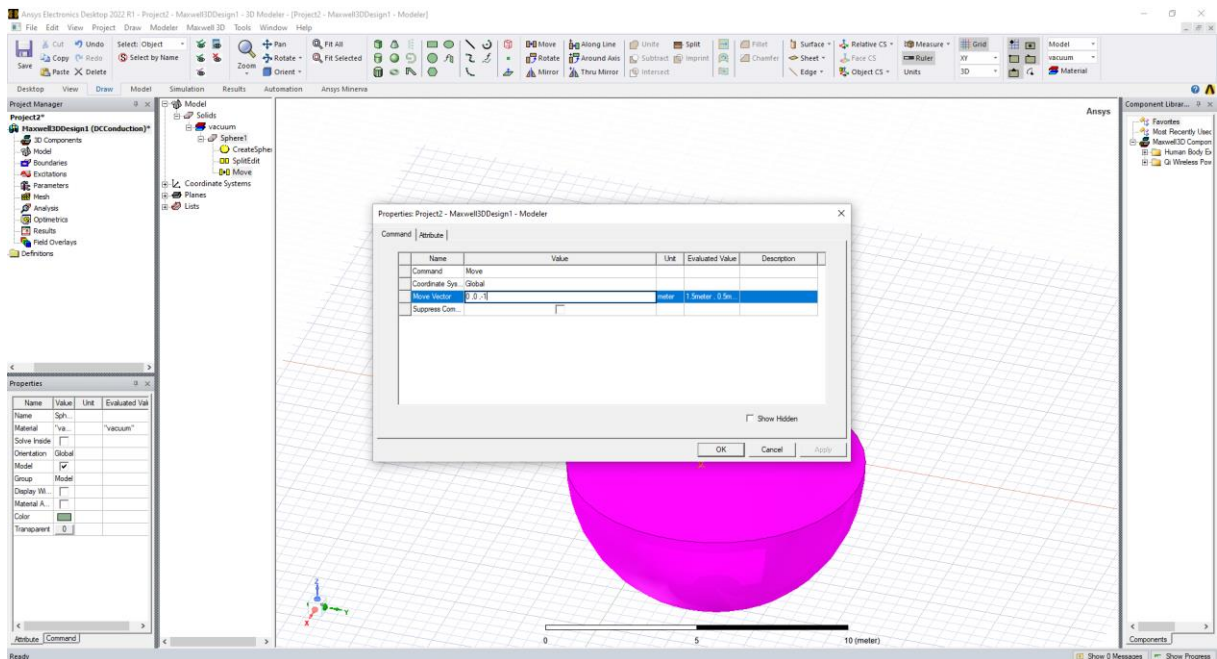


Slika 7.12. Prikaz pola kugle

Kada se kugla prepolovi miče se u neku stranu sa naredbom „Move“, te se nakon toga ide u „Properties“ gdje su os x i y na 0, dok se os z mijenja na -1 (kako bi bilo moguće ubaciti valjak iznad njega visine 1 metar). Ovo je sve prikazano na slici 7.13. i 7.14.



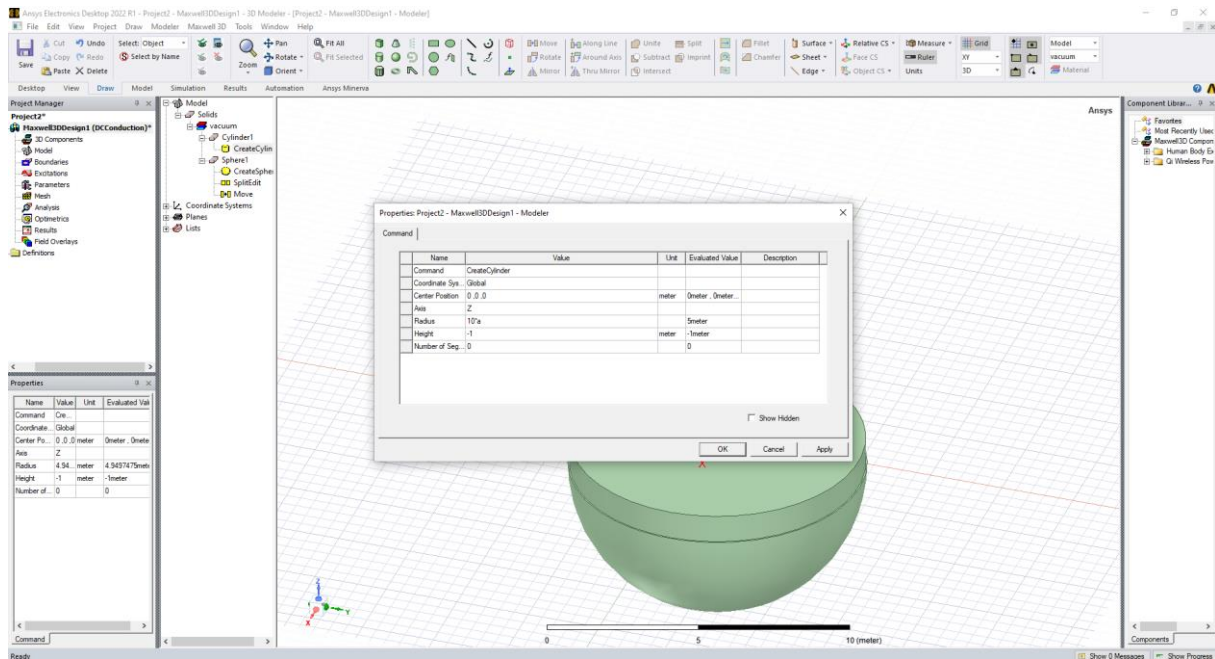
Slika 7.13. Kako doći do mijenjanja koordinata polukugle



Slika 7.14. Postavljanje koordinata polukugle

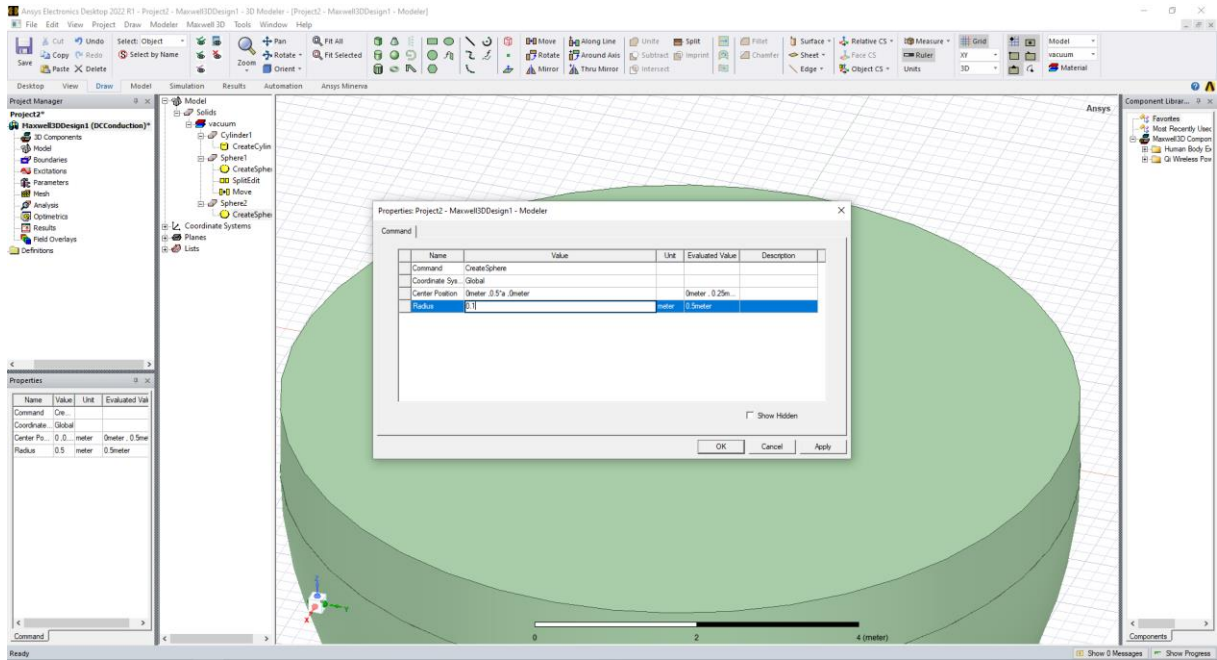


Nakon izabira valjka u sustavu ANSYS, crta se i povlače se proizvoljno koordinate na početku koje će onda biti ispravljene daljnjim dolaskom na „*Properties*“ od valjka. Njegove vrijednosti su prikazane na slici 7.15.



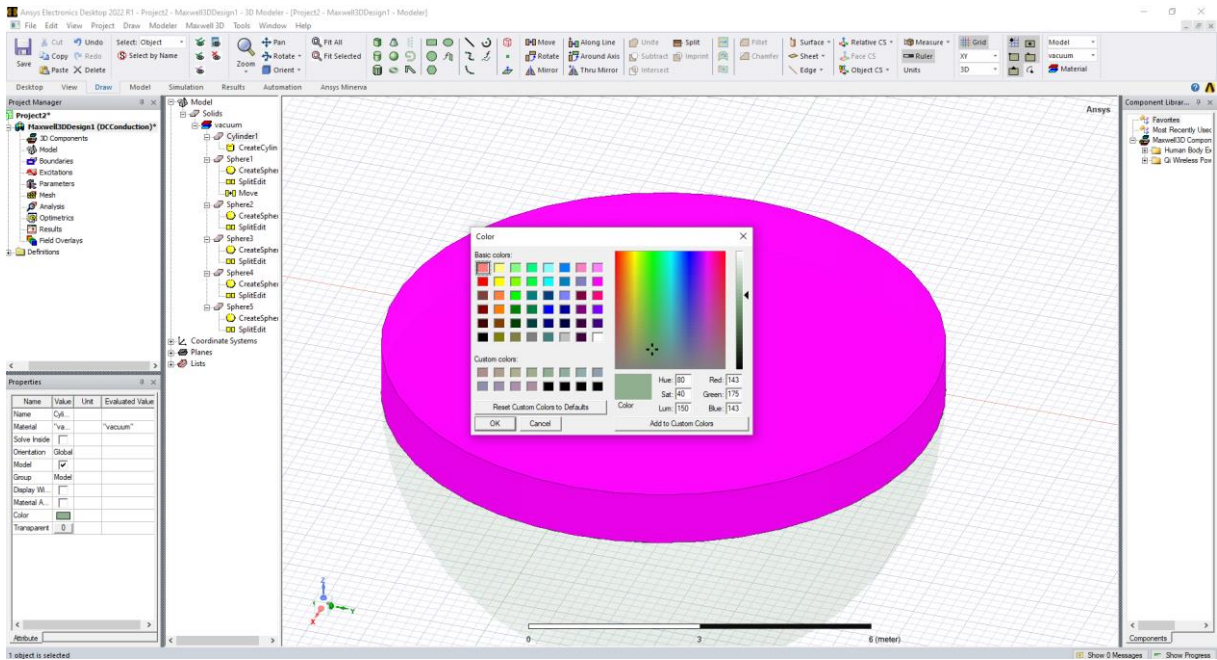
**Slika 7.15.** Vrijednosti valjka (gornjeg sloja zemlje)

Poslije slikanja valjka dolazi na red crtanja 4 elektroda na površini valjka (koje će ustvari biti rupe na valjku). Njihov polumjer je proizvoljan u ovom zadatku i uzima se 0.1 m. Kao i u kugle, koja predstavlja donji dio zemlje, tako i kod elektroda se kugla elektrode prepolovi po negativnoj strani. Kako u Wenner-ovoj metodi razmak između elektrodi mora biti jednak stavlja se razmak između sonde na  $0,5 \cdot a$  po y osi (odnosno  $-0,5 \cdot a$  na negativnoj strani) i  $1,5 \cdot a$  (odnosno  $1,5 \cdot a$  na negativnoj strani). Varijabla  $a$  kod elektroda predstavlja koliko će elektrode biti daleko razmaknute. Prikaz „*Properties*“ elektrode je na slici 7.16.

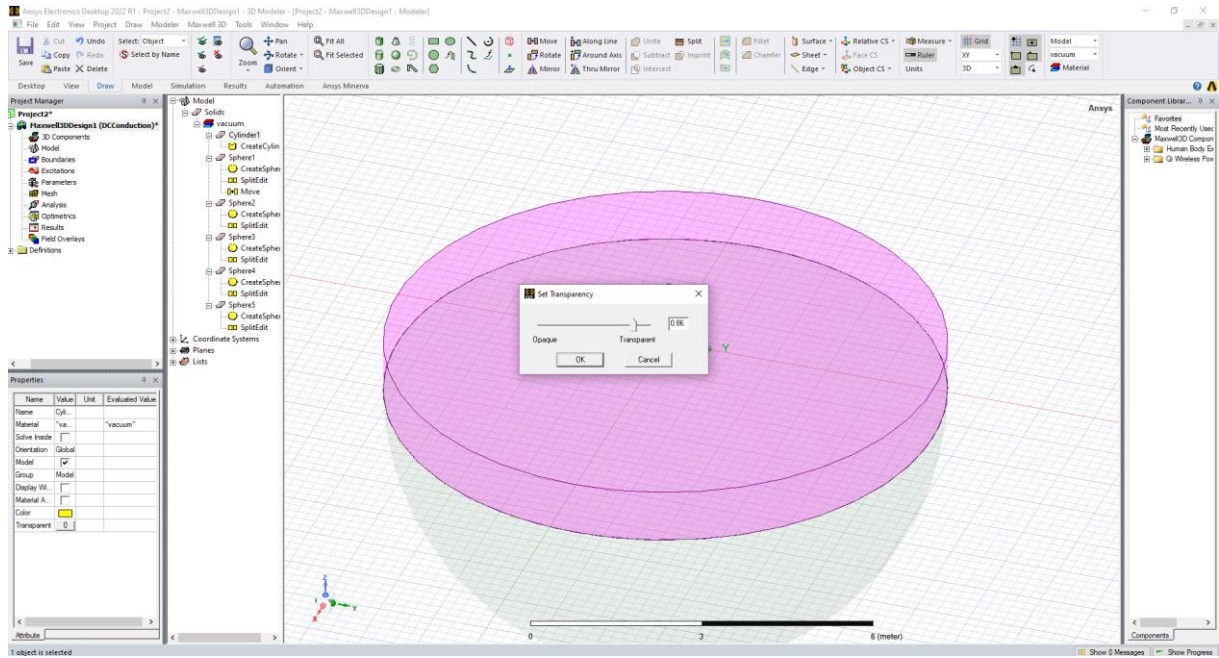


Slika 7.16. Crtanje elektroda

Radi boljeg pregleda kod polukugle i valjka se mijenja boja njihova i gustoća boje. To je prikazano na slikama 7.17. i 7.18.

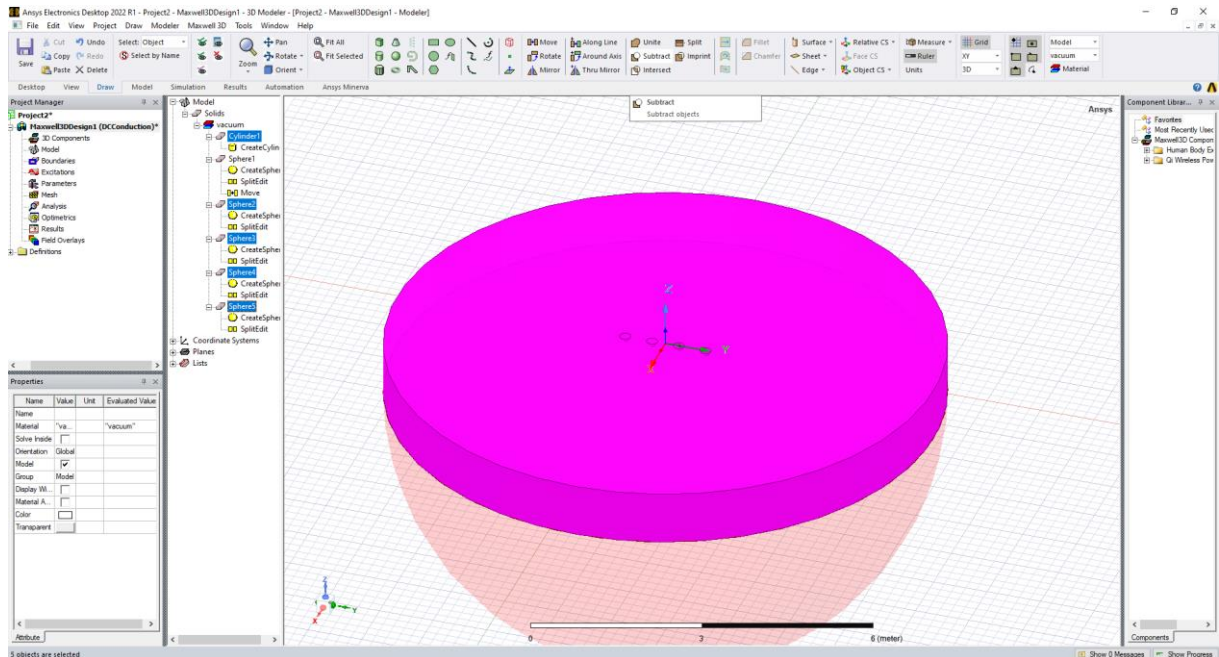


Slika 7.17. Mijenjanje boje



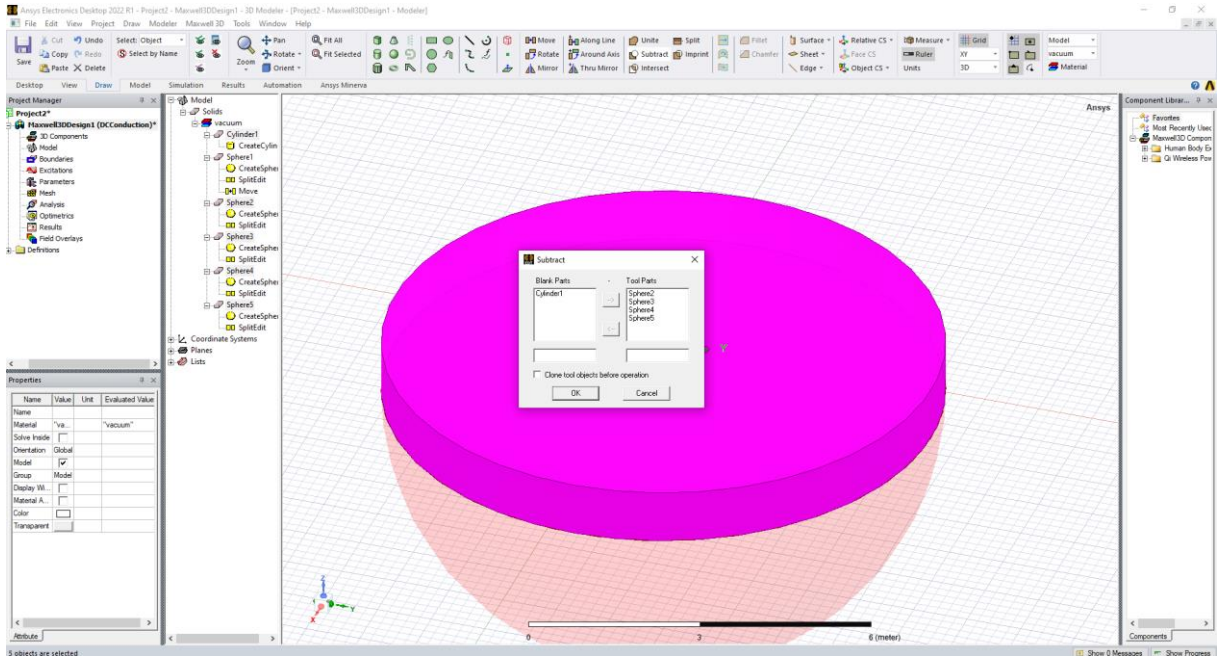
Slika 7.18. Mijenjanje gustoće boje

Kako bi napravili rupe u cilindru (gornjem sloju tla) treba se označiti sve 4 elektrode i valjak, te onda se treba kliknuti na tipku „Subtract“, što je prikazano na slici 7.19.

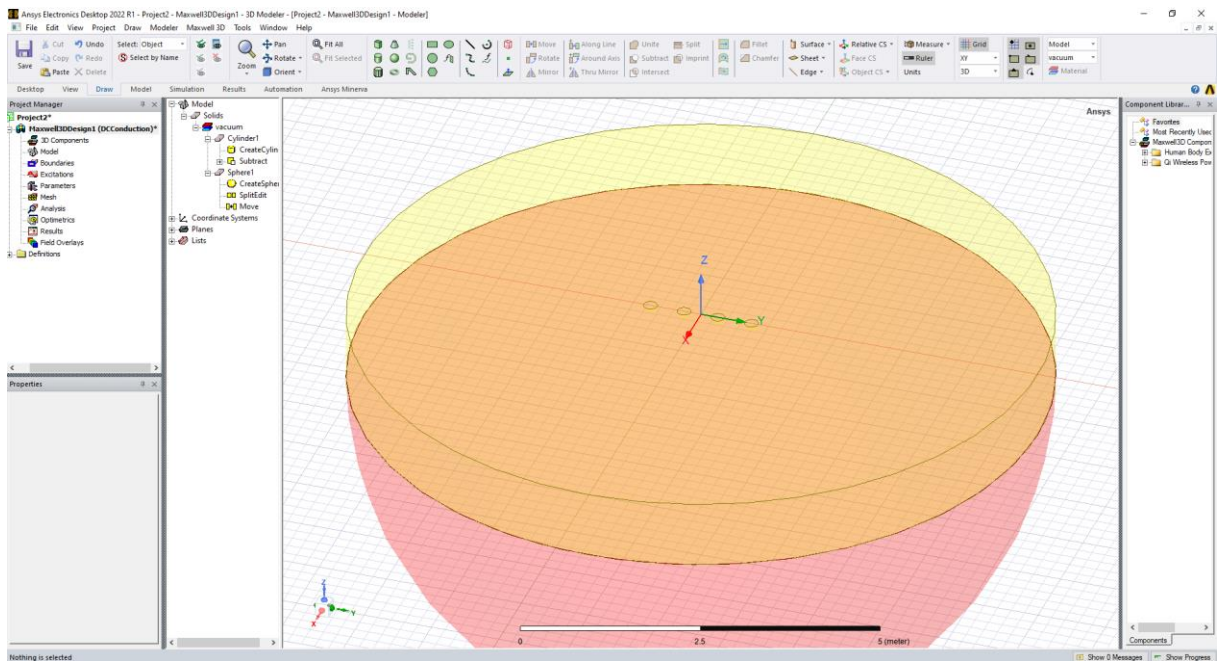


Slika 7.19. Označavanje svih elektroda i valjka

Slika 7.20. prikazuje kako valjak treba biti na lijevoj strani, jer od njega oduzimamo 4 elektrode nacrtane. Nakon oduzimanja one postaju rupe u valjku kao što je prikazano na slici 7.21.

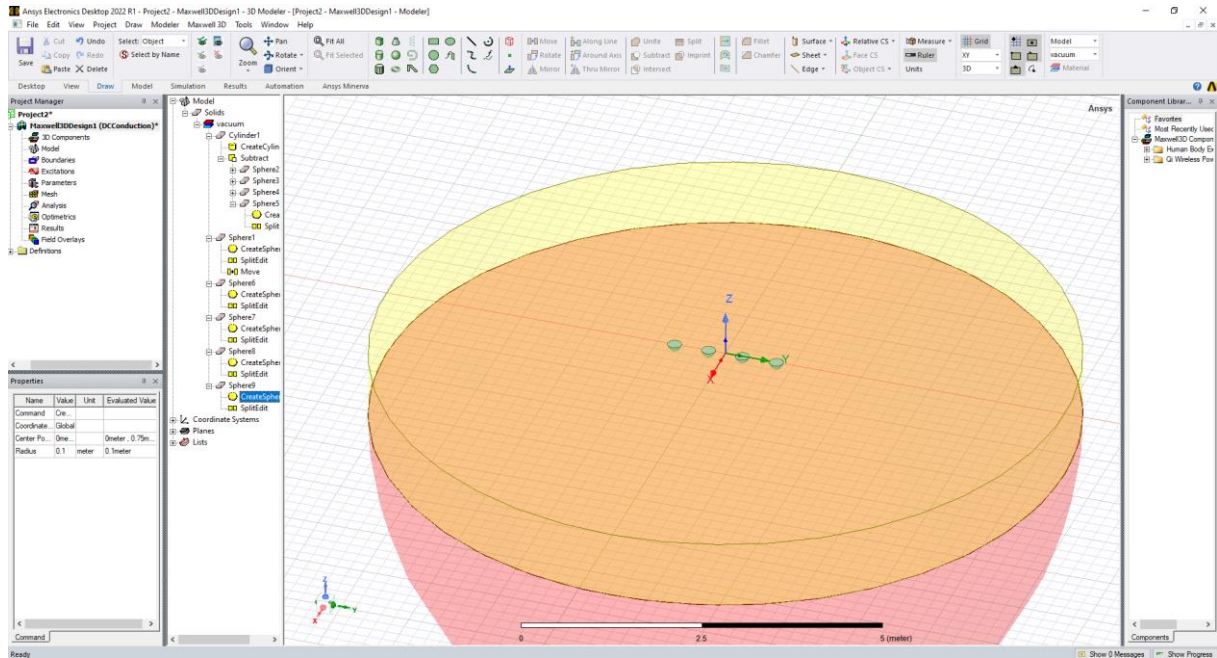


Slika 7.20. Pravljenje rupa u valjku



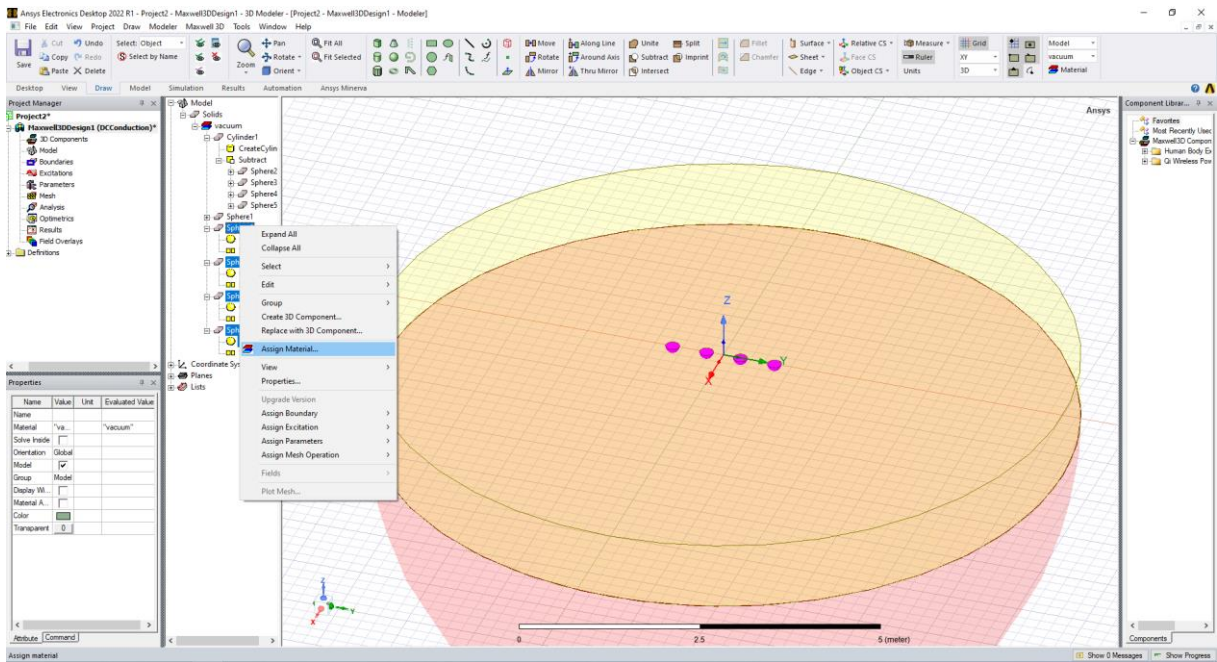
Slika 7.21. Rupe gdje će se postaviti elektrode

Kako su se napravile i zadnji puta ponovno se crtaju 4 elektrode u rupe što su napravljene. Prikaz ponovno nacrtanih elektroda je na slici 7.22 .

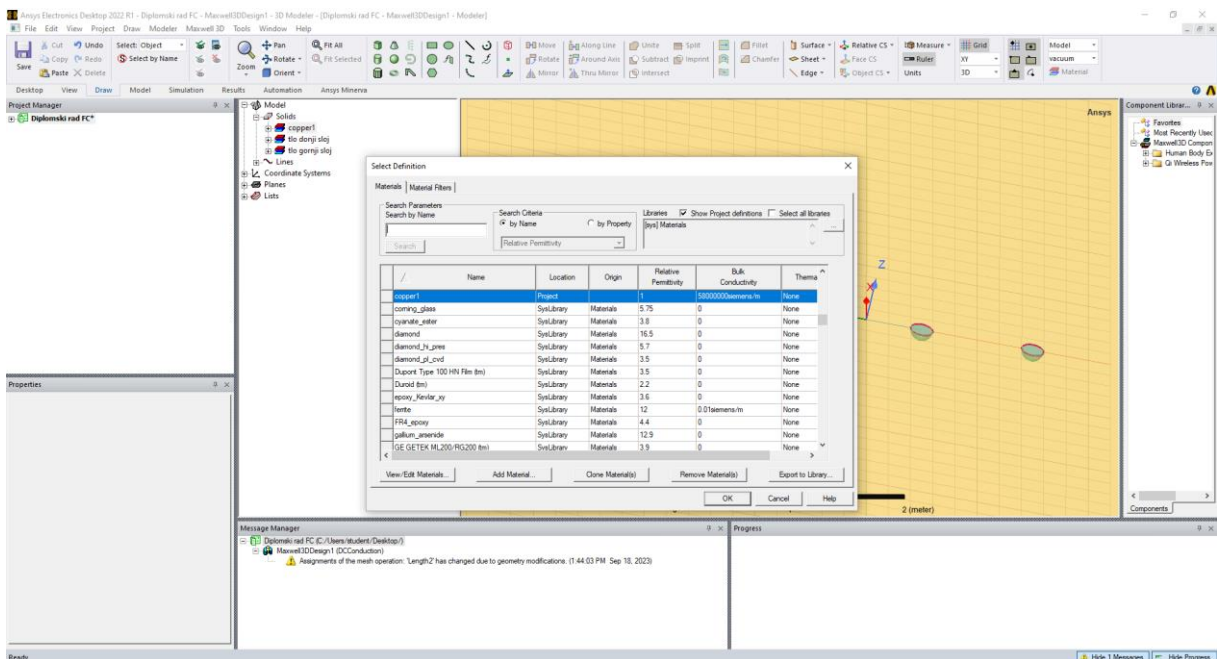


**Slika 7.22.** Ponovno stavljanje elektrode

Nakon toga se prelazi na dio gdje se tijelima nacrtanim u sustavu pridružuju njihova svojstva. Označavanjem sve 4 elektrode, desnim klikom miša dolazi se „Assign Material“ gdje se elektrodama pridaje svojstvo bakra (eng. „copper“). Ovo je prikazano na slici 7.23. i 7.24. Na isti način će se tako dodijeliti materijal za valjak i polukuglu (za valjak i polukuglu se demonstrativno uzima 0,01 siemens/m i 0,02 siemens/m i obrnuto).

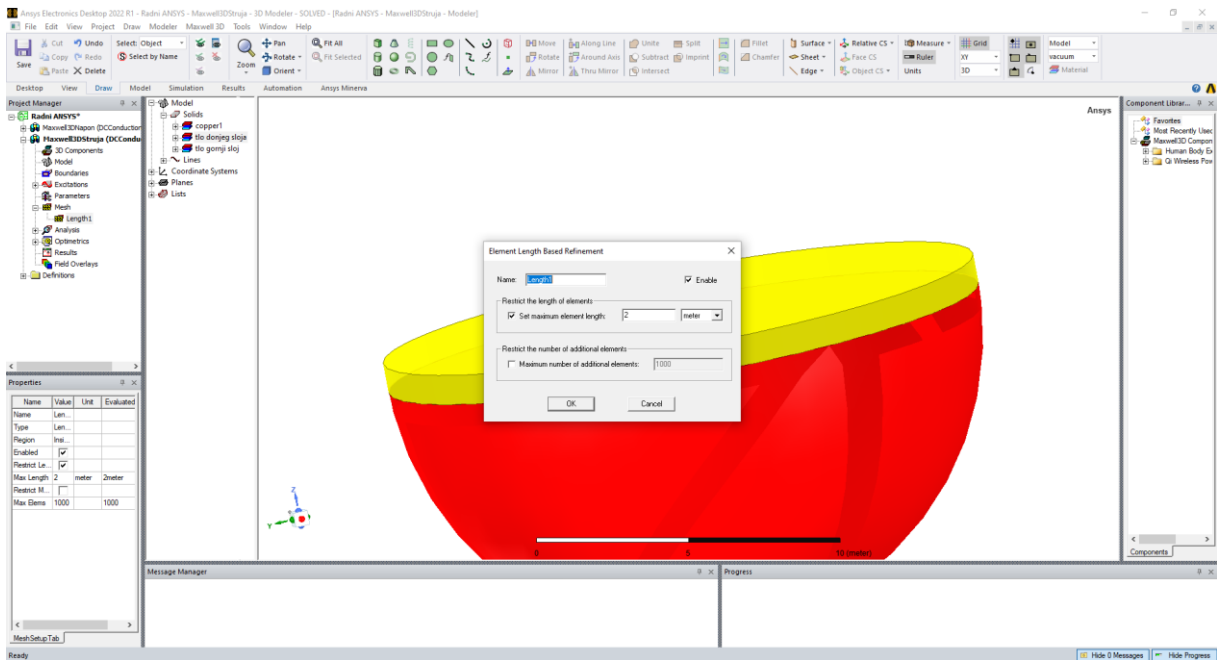


Slika 7.23. Prikaz dodjeljivanja materijala elektrodama



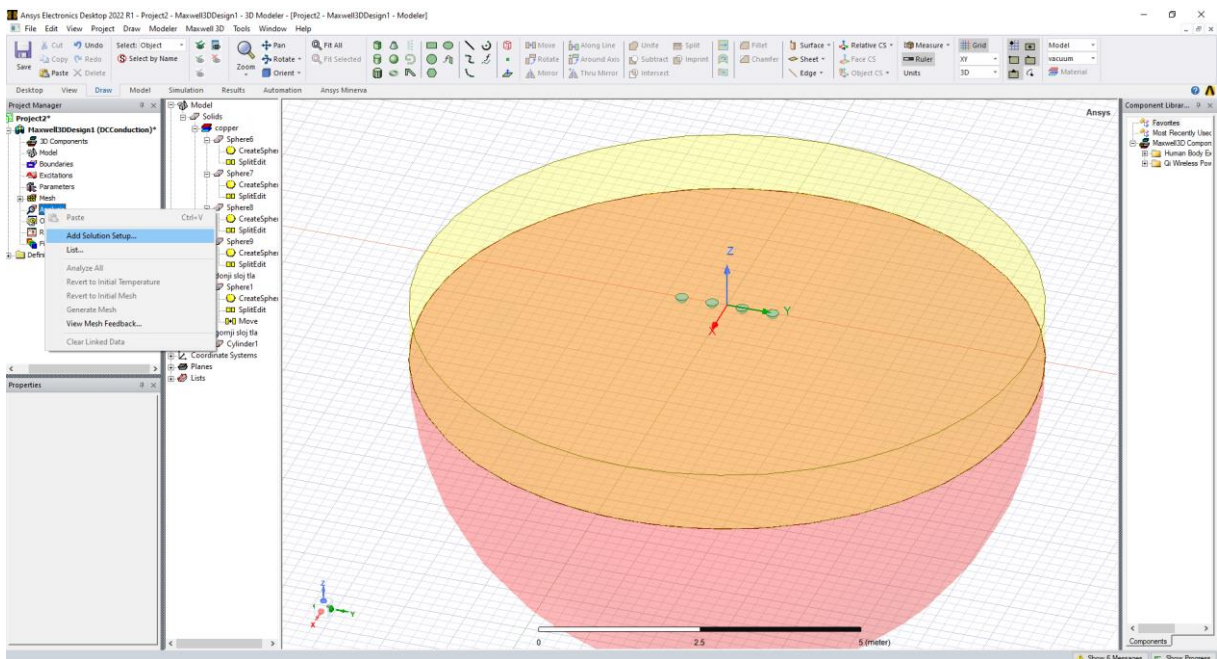
Slika 7.24. Dodjeljivanje bakra elektrodama

Slika 7.25. prikazuje dodjeljivanje „Length“ za sve objekte nacrtane (za izmjereni specifični otpor iznad  $a = 10$  m vrijednost kod „Length“ se mijenja na 20 m zbog bržeg izračuna, jer se tamo specifični otpor neće puno mijenjati pa možemo ubrzati proces).

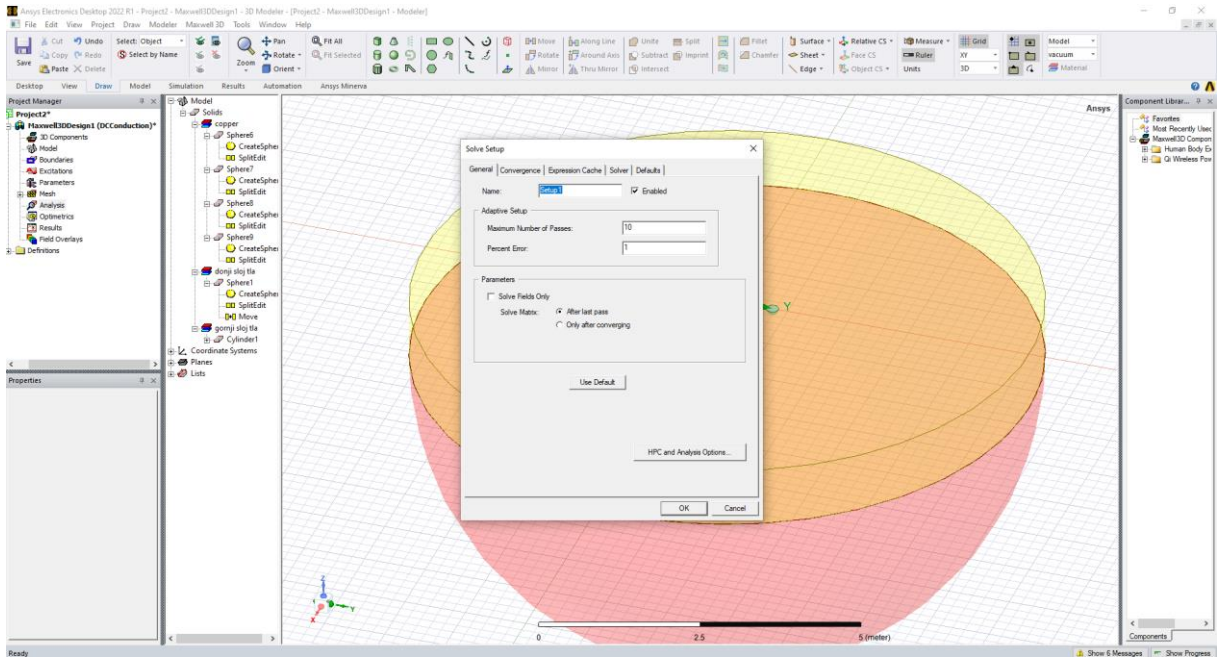


Slika 7.25. Prikaz „Length“

Slika 7.26. prikazuje kako doći do postavljanja „Setup“ u ANSYS-u, te onda slici 7.27. može se vidjeti koje se uzimaju vrijednosti (za a veće od 10 m uzima se da je postotak greške (eng. „Percent Error“) do 7 %).

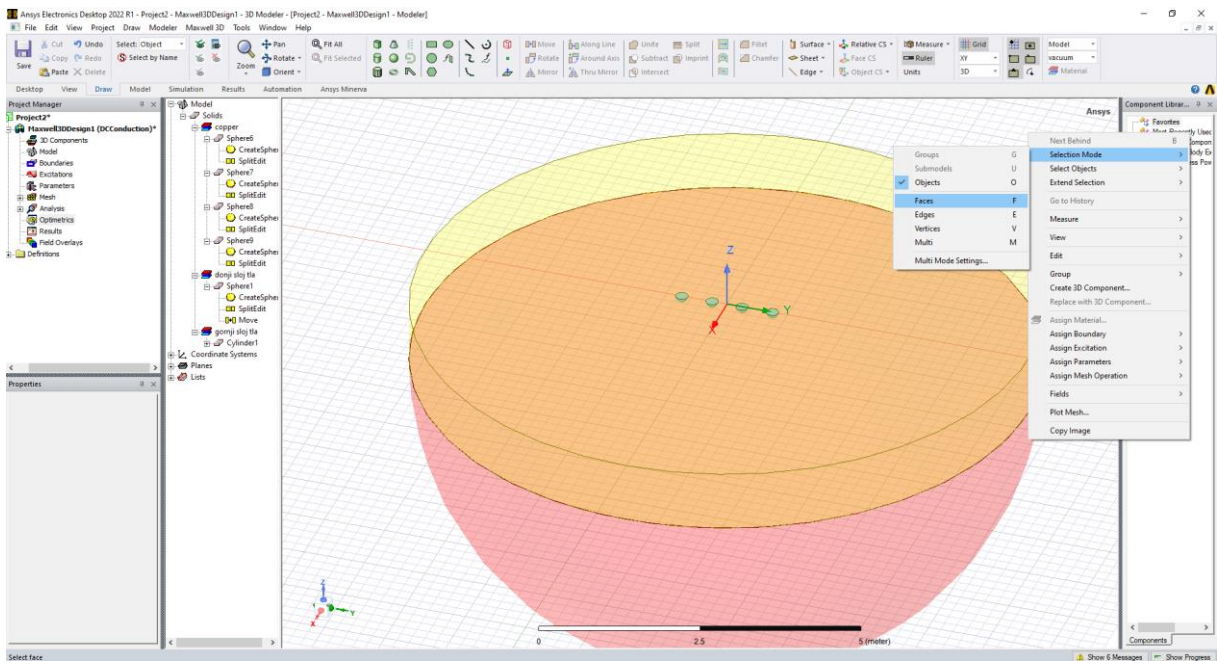


Slika 7.26. Dolazak do setup-a



Slika 7.27. Vrijednosti setup-a

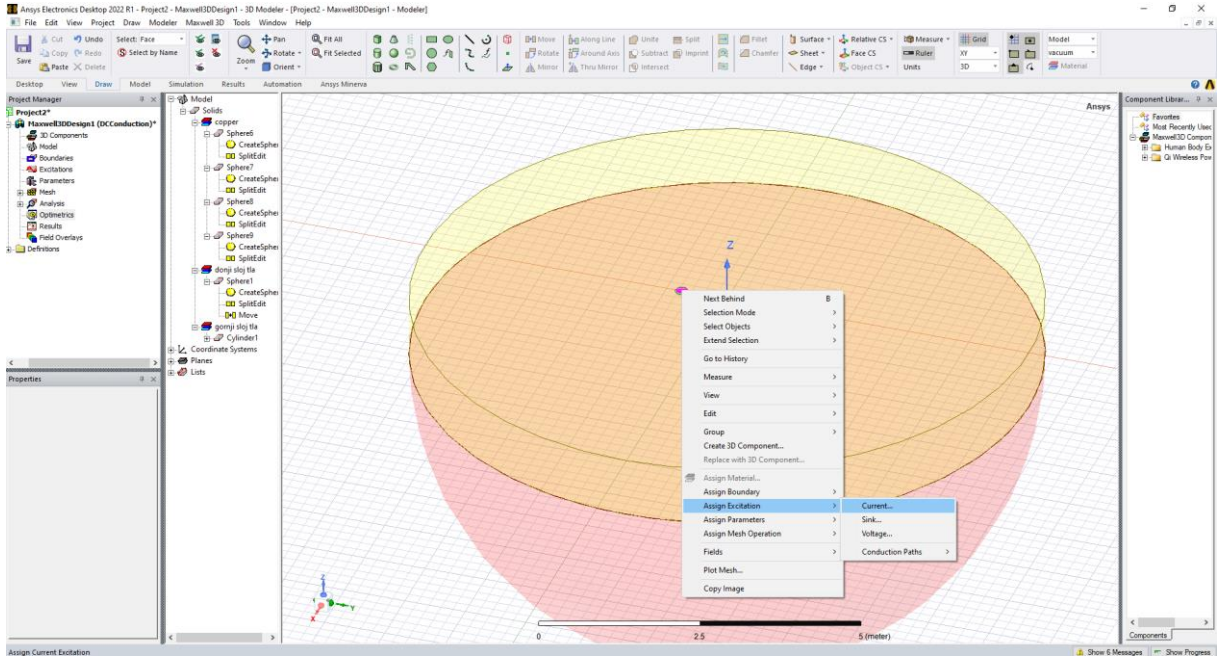
Prije nego što se doda struja na krajnje elektrode mora se desnim klikom miša kliknuti negdje izvan nacrtanog dijela te odabrati „Faces“ kako bi mogli na licu objekta dodati struju. Ovo je prikazano na slici 7.28.



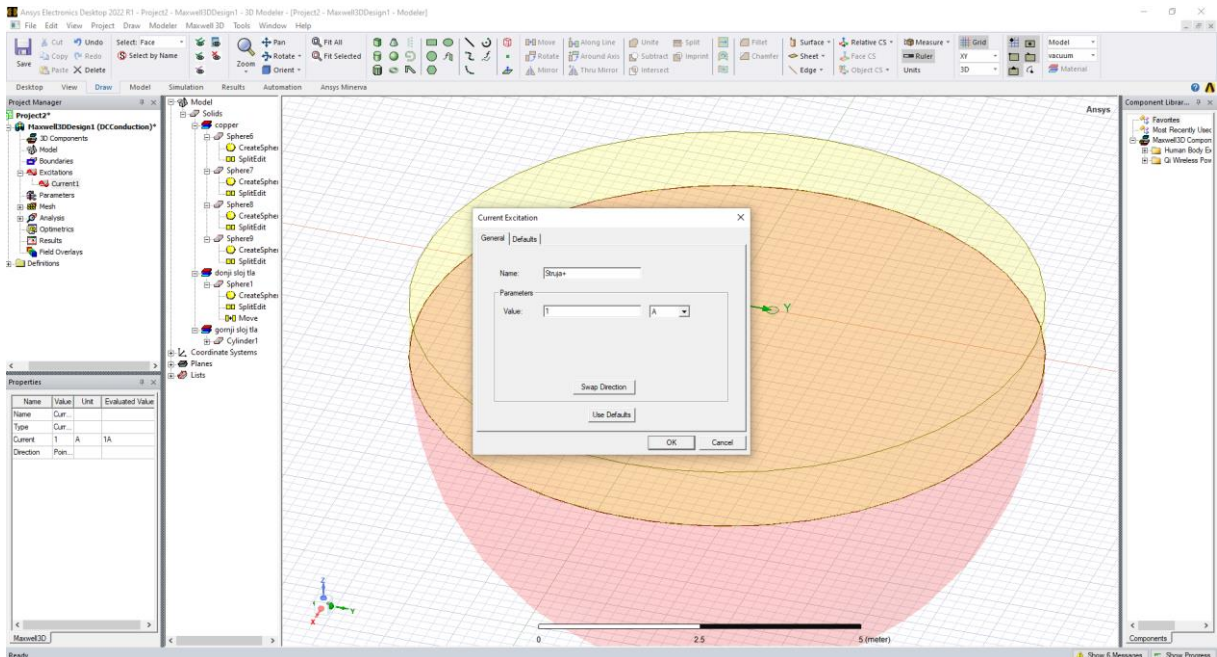
Slika 7.28. Korak prije dodavanja struje



Slika 7.29. prikazuje kako onda na licu krajnje elektrode se dodaje struja, dok slika 7.30. predstavlja iznos dodane struje na krajnjoj elektrodi.

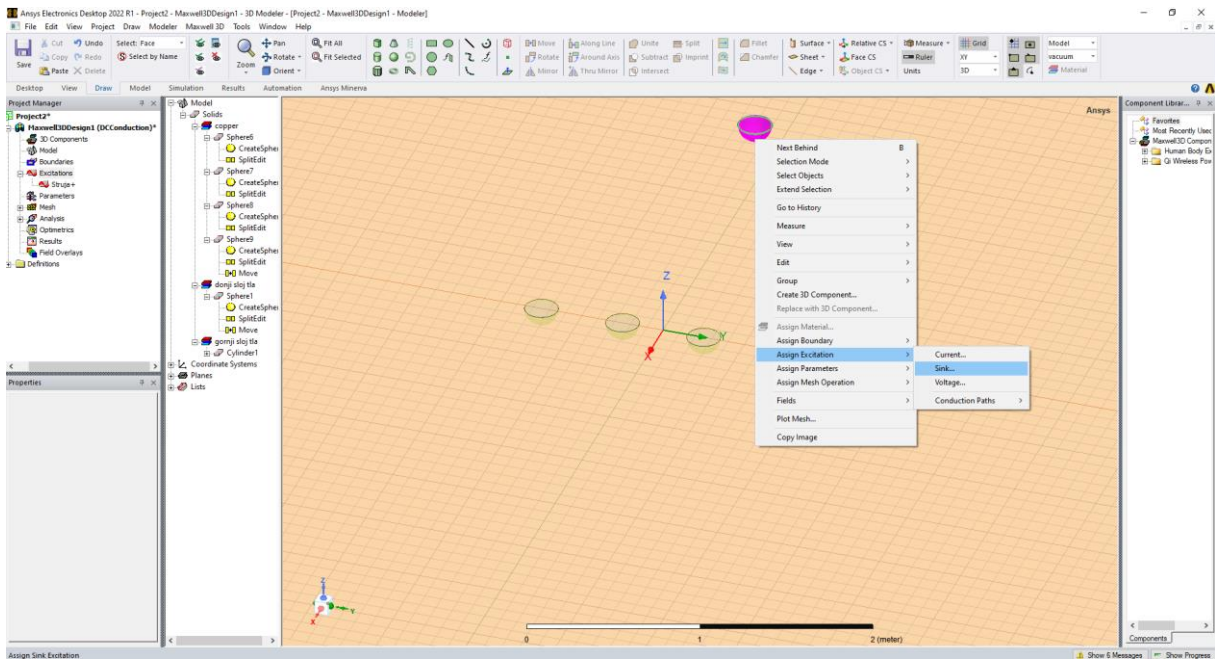


Slika 7.29. Dodavanje struje elektrodi



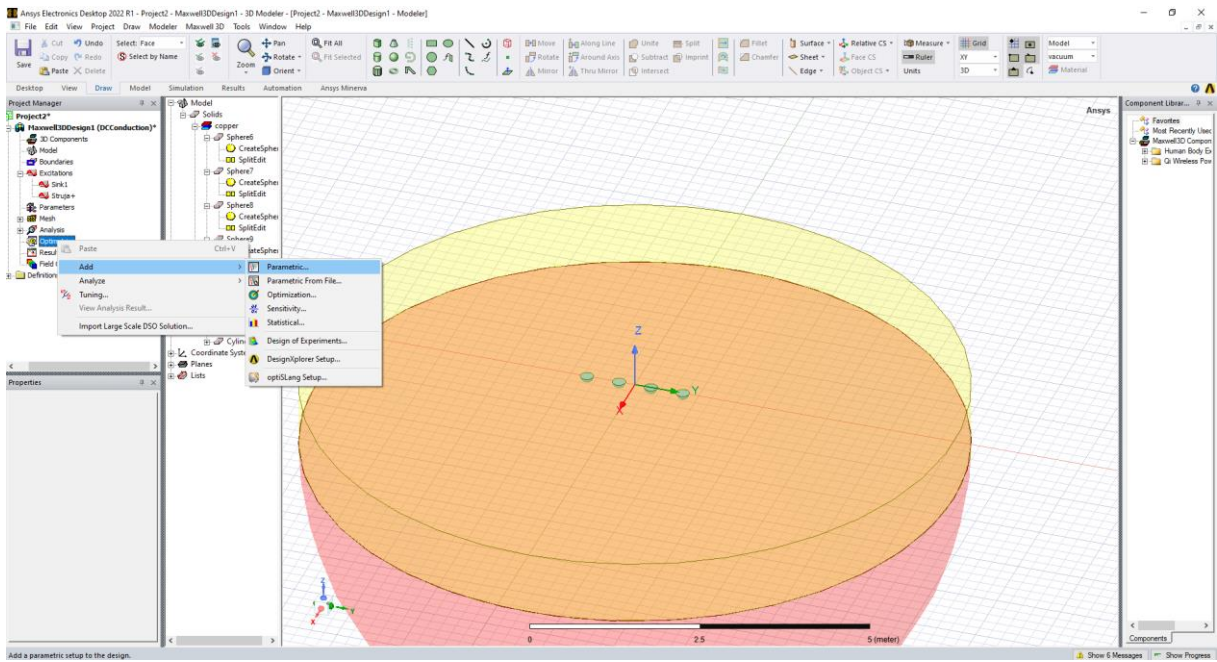
Slika 7.30. Vrijednost struje

Za drugu krajnju elektrodu koja će primiti struju iz prve krajnje elektrode dodaje se „Sink“ da bi struja došla u elektrodu kroz valjak i polukuglu (koji predstavljaju zemlju). Kako bi se to moglo drugu krajnju elektrodu se digne iznad sa operacijom „Move“. Nakon toga se na dno polukugle (elektrode) stavlja „Sink“ kao što je prikazano na slici 7.31. i onda se briše operacija „Move“ da bi elektroda ponovno sjela na svoje mjesto.



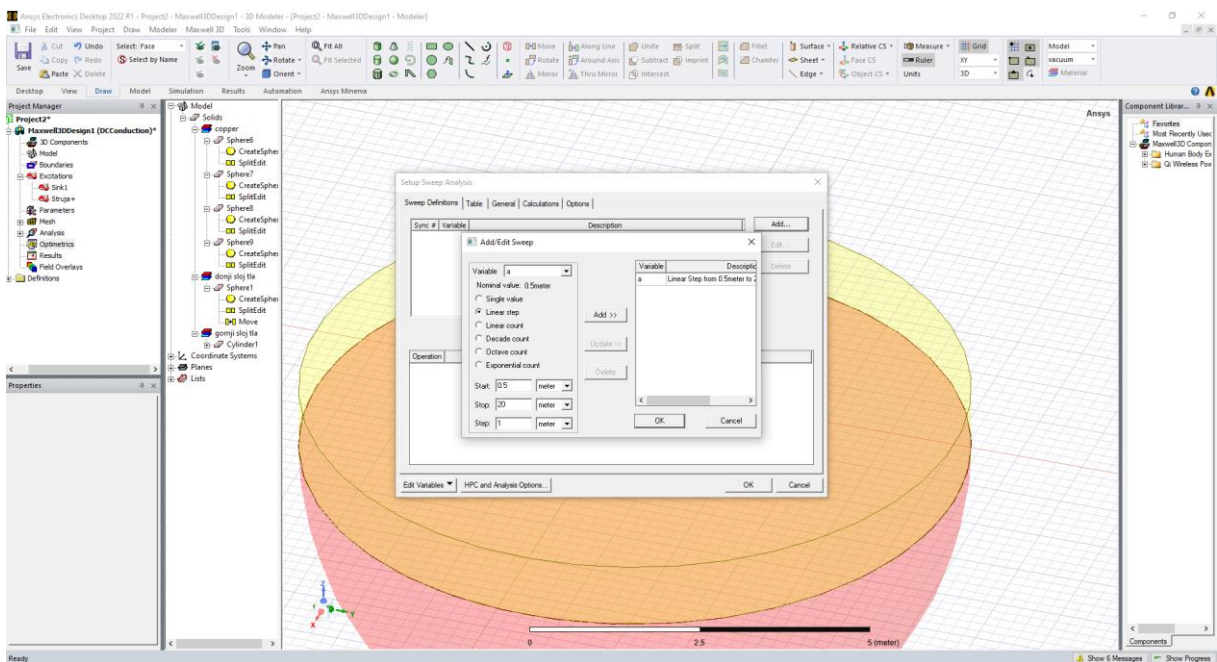
Slika 7.31. Dodjeljivanje „Sink“ drugoj krajnjoj elektrodi

Slika 7.32. prikazuje dodavanje „Parametric“ varijabli a, treba otići na „Optimetric“ te desnim klikom na to treba dodati tu operaciju.



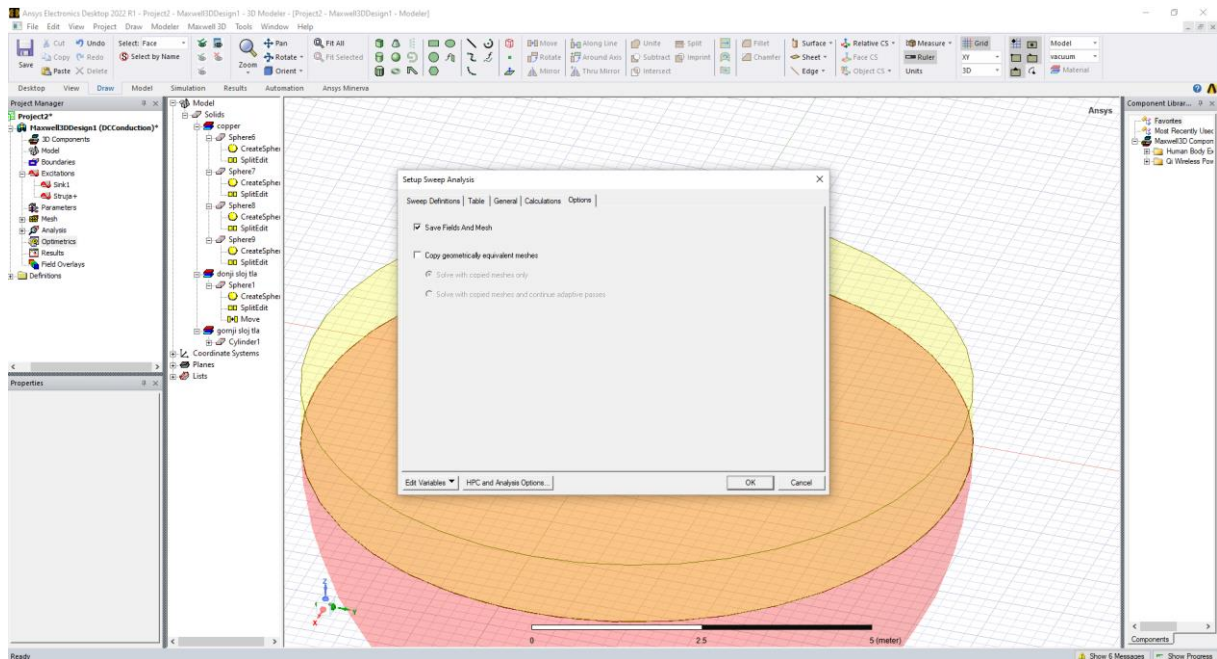
Slika 7.32. Prikazuje dodavanje parametra varijabli  $a$

Nakon otvaranja „Parametric“ na desnoj strani se nalazi „Add“ kojim treba dodati linearni korak. Otvara se prozorčić na kojem treba unijeti vrijednosti (na slikama specifičnog otpora do  $a = 10$  m je „Start“ 0,5 m, „Stop“ 10 m, „Step“ 0,5 m, dok je za  $a = 10$  do 20 m „Start“ 11 m, „Stop“ 20 m i „Step“ 3 m). To je prikazano na slici 7.33.



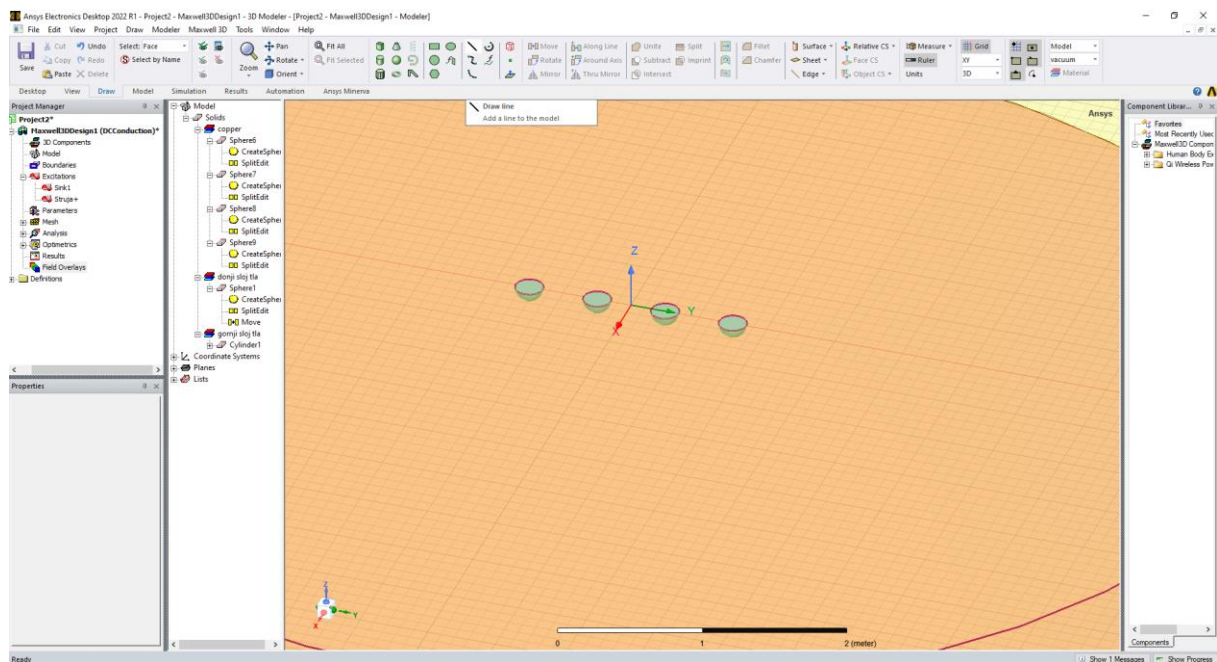
Slika 7.33. Linearni postupak varijable  $a$

Slika 7.34. predstavlja dio gdje nakon što se završi linearni postupak za varijablu  $a$  treba otići na „Option“ gdje se treba kliknuti kvakica za spremanje varijabli  $a$  kako bi mogli poslije uspoređivati specifični otpor zemlje za različitu vrijednost  $a$ .

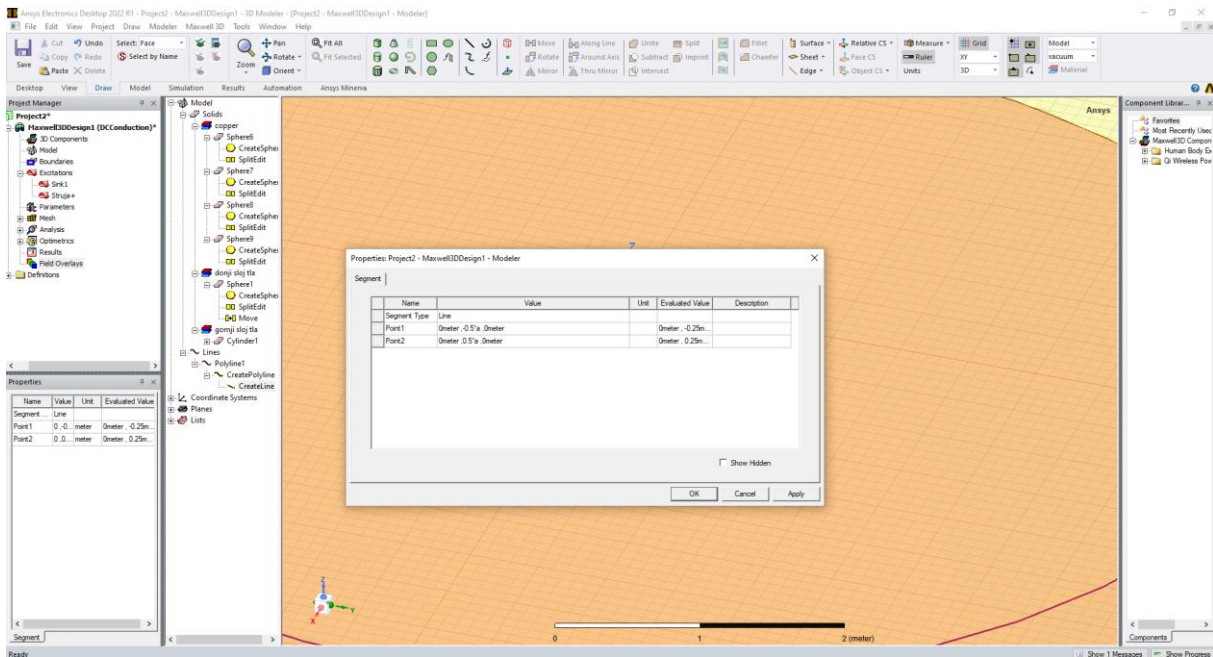


Slika 7.34. Spremanje različitih vrijednosti  $a$

Slike 7.35. i 7.36. prikazuju dodavanje „Polyline“ između naponskih elektroda (dvije elektrode koje se nalaze u sredini) i dodavanje parametara „Polyline“.



Slika 7.35. Crtanje „Polyline“



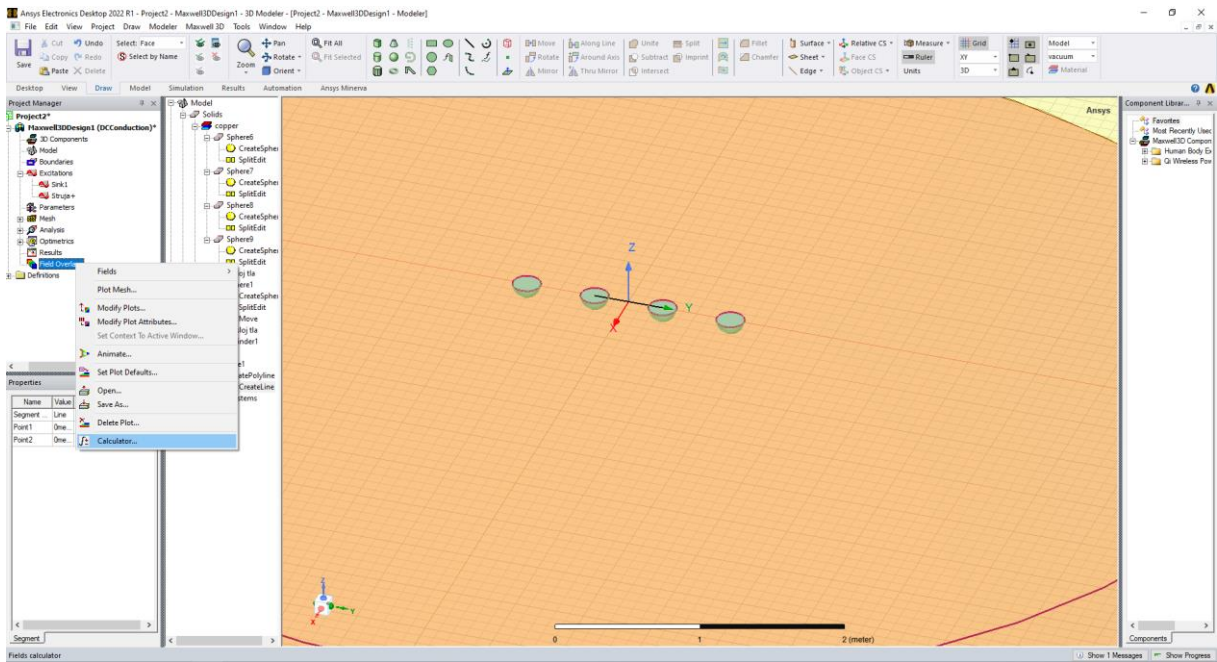
Slika 7.36. Parametri „Polyline“

Na slici 7.37. prikazuje se kako se dodaju vrijednosti napona koji je na „Polyline“ (odnosno to se u stvarnom mjerenju mjeri voltmetru) i dodavanje specifičnog otpora (u ANSYS-u je to napisano kao  $R_0$  zato što nema grčkog alfabeta) kao što je prikazano na slici 7.38. Formule koje se u ANSYS-u koriste su:

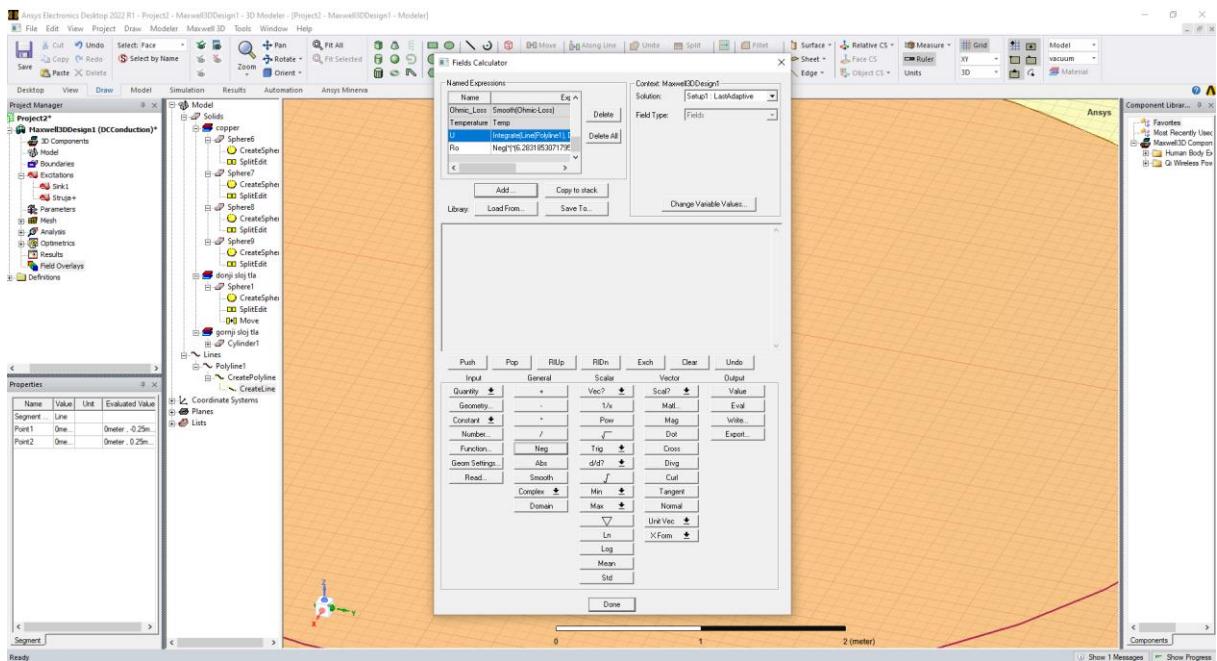
$$U = - \int \vec{E} d\vec{l} \quad (7-1)$$

$$\rho = 2 \cdot a \cdot \pi \cdot \frac{U}{I} \quad (7-2)$$

Pošto je u ANSYS-u stavljeno da je struja  $I$  jednaka 1 A, onda se u nije stavljalo u formuli, također zbog jednostavnosti upisivanja u sustavu ANSYS negativni predznak je dodan kod upisivanja specifičnog otpora.

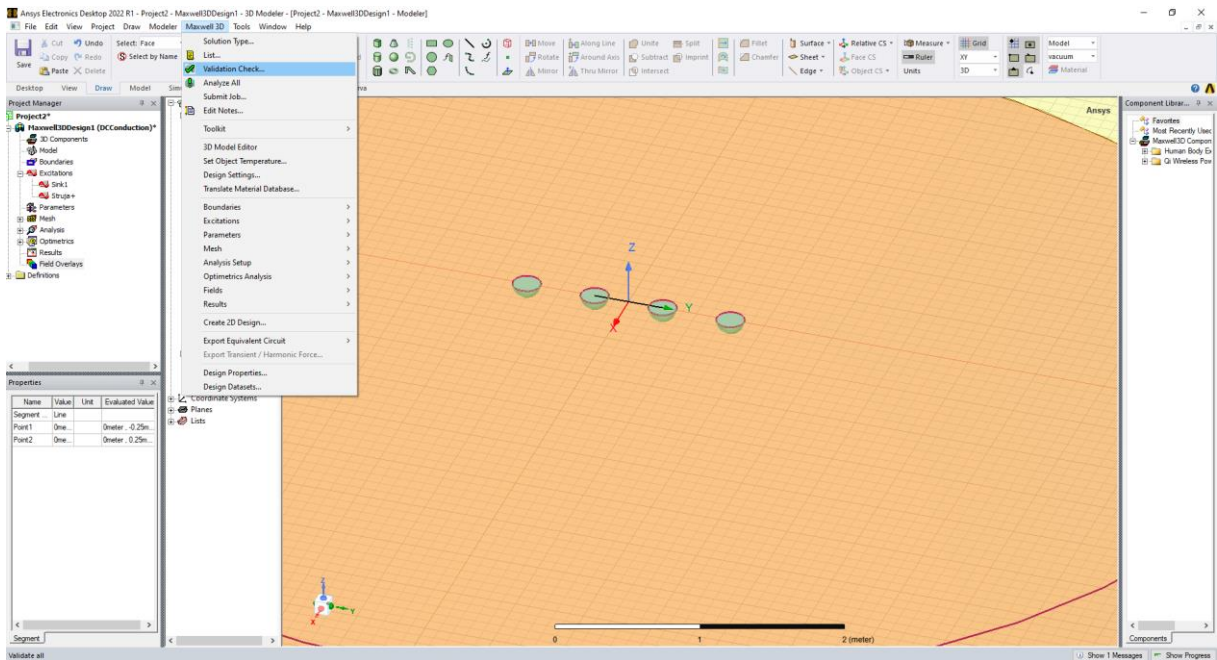


Slika 7.37. Kako doći do upisivanja formula

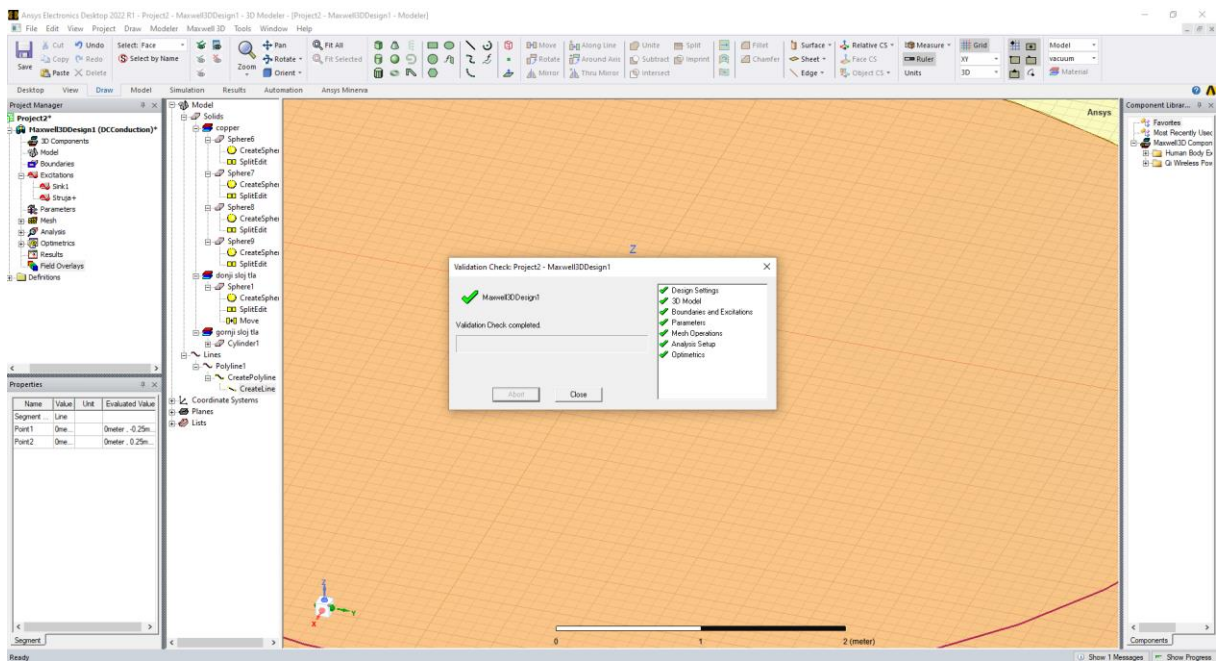


Slika 7.38. Upisivanje formule za napon i specifični otpor

Nakon što je sve odrađeno, slika 7.39. prikazuje kako se prikazuje provjera, a to je na „Validation Check“ i onda na slici 7.40. prikazuje da li je sve dobro odrađeno do tog trenutka.

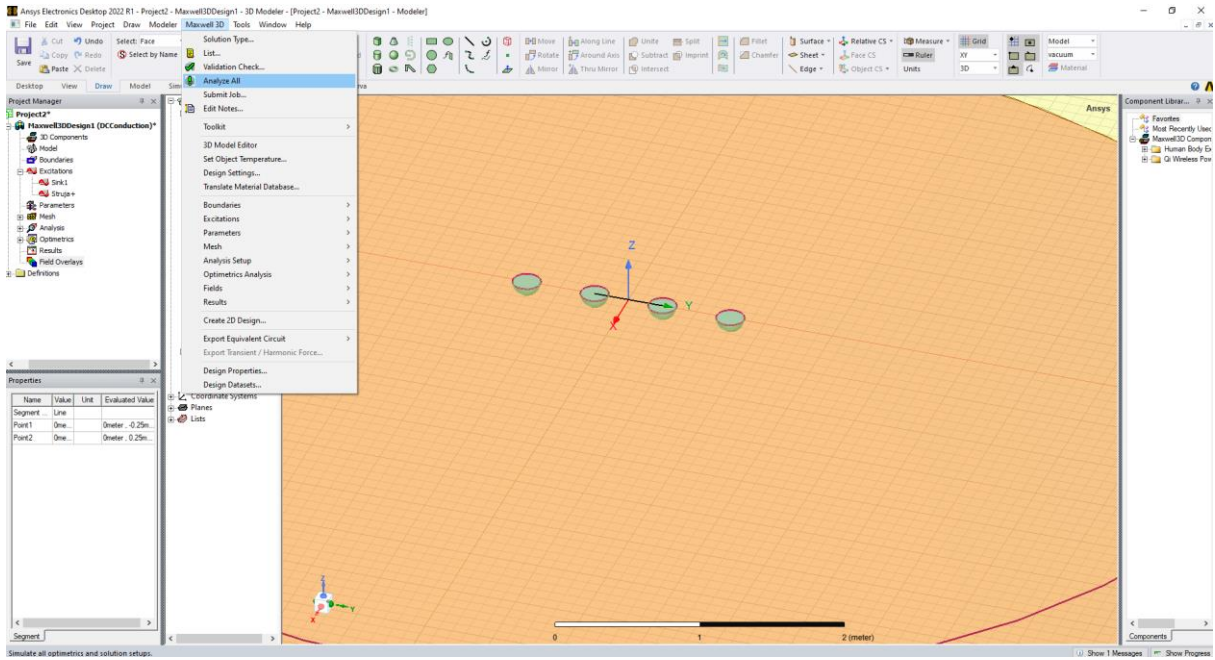


Slika 7.39. Kako doći do „Validation Check“



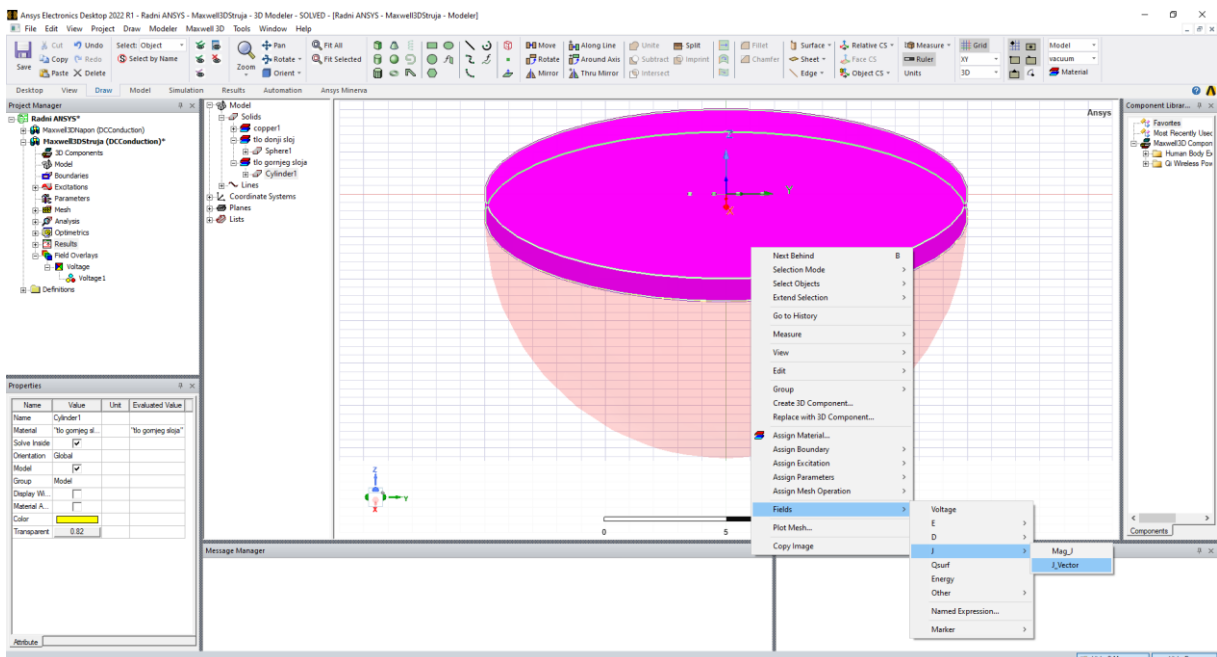
Slika 7.40. Prikaz točnosti

Nakon što je sve provjereno da je točno, slika 7.41. prikazuje kako doći do analize tog sustava sa tipkom „Analyze All“.



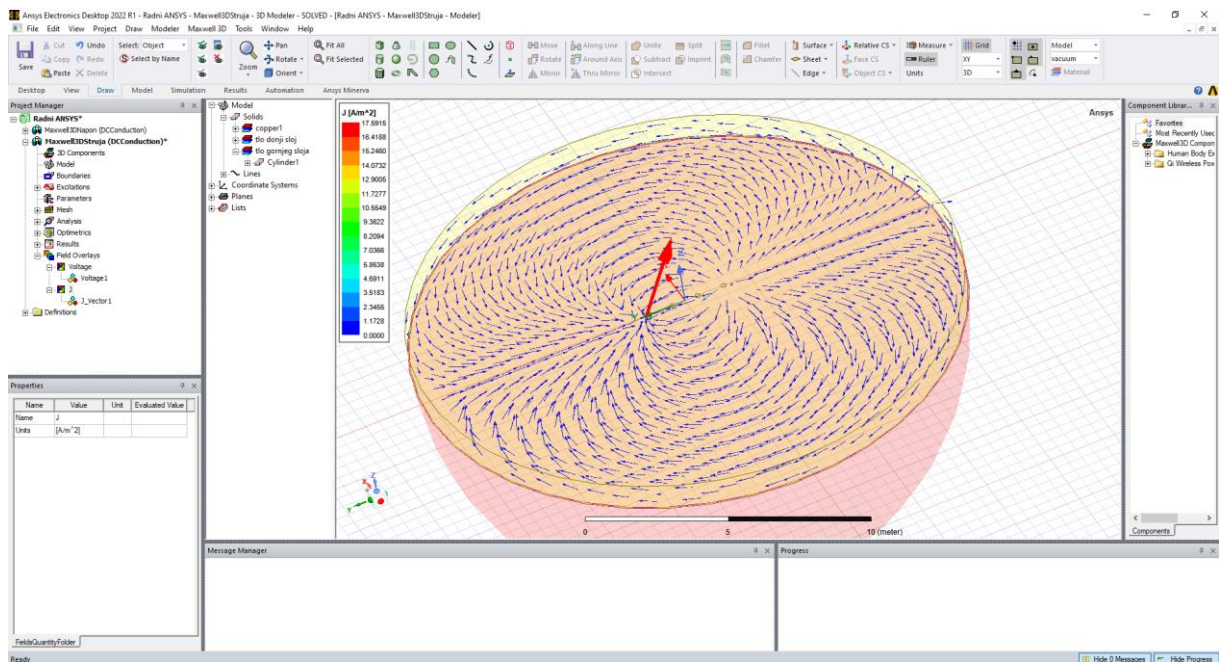
Slika 7.41. Analiza rada

Kada sustav ANSYS odradi analizu koja je zadana može se mogu vidjeti rezultati te analize. Na primjer mogu se provjeriti silnice kretanja struje u donjem (polukugla) i gornjem (valjak) tlu. Slika 7.42. prikazuje kako doći do tih silnica, dok slike 7.43. i 7.44. prikazuje silnice prolaska struje.

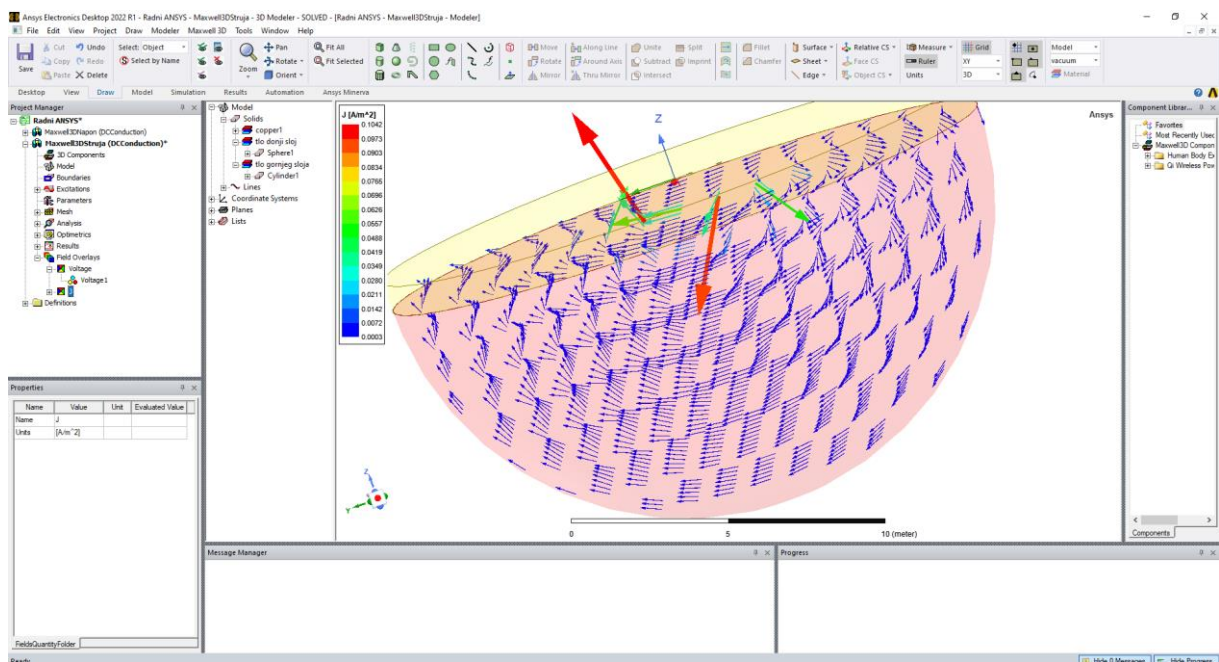


Slika 7.42. Pronalazak radnje za prikaz silnica





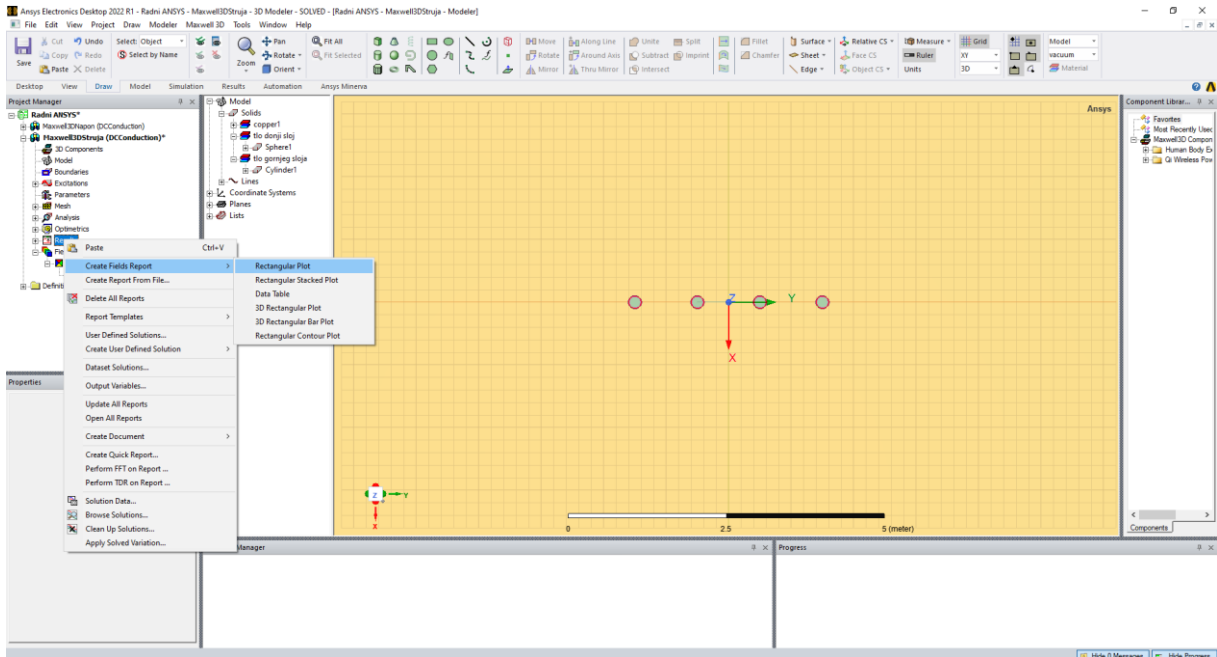
Slika 7.43. Prikaz silnica gornjeg sloja tla (valjka)



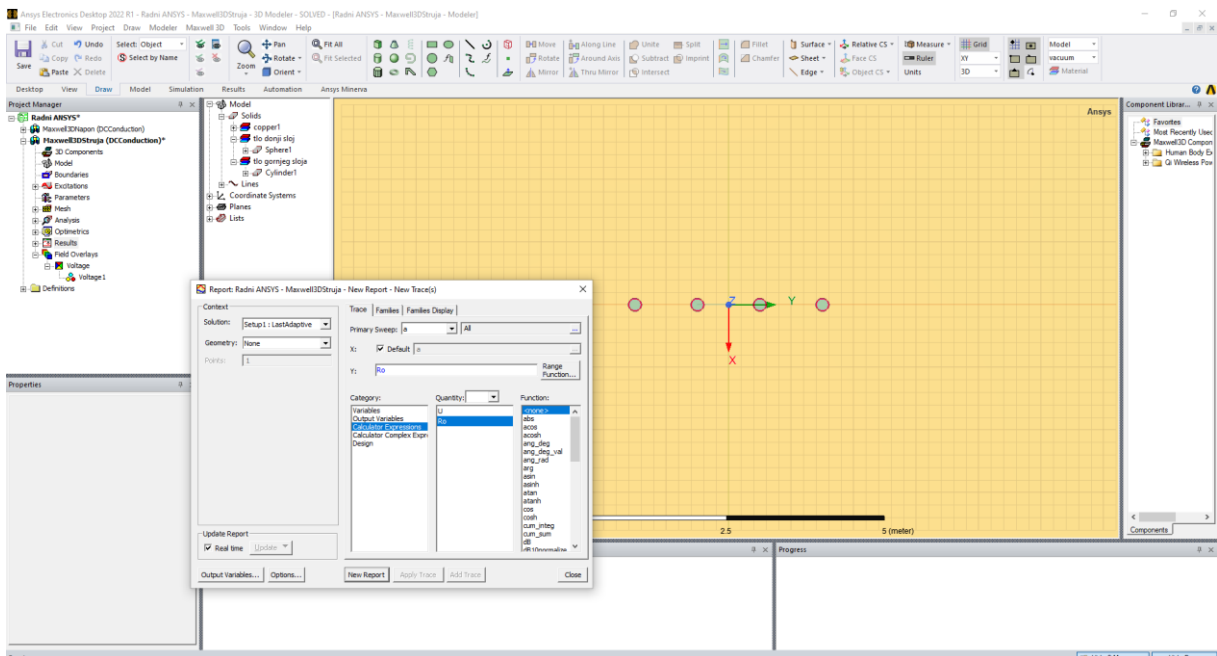
Slika 7.44. Prikaz silnica donjeg sloja tla (polukugle)

Iz slika 7.43. i 7.44. može se primjetiti da iz elektrode iz koje izlazi struja silnice se kreću prema drugoj elektrodi koja prima tu struju.

Slike 7.45. i 7.46. prikazuju kako doći do specifičnog otpora (oznaka  $R_o$  u ANSYS-u na slici). Na slici 7.45. se vidi da preko „Results“ desnim klikom miša može doći do prividnog specifičnog otpora tla ( $R_o$ ) preko „Rectangular Plot“.

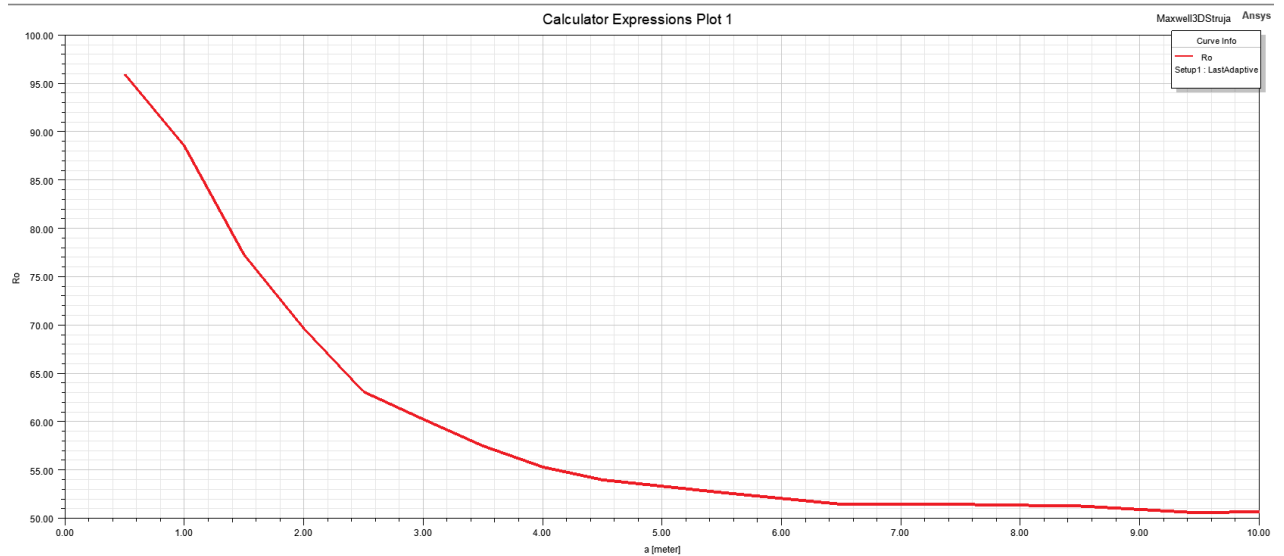


Slika 7.45. Pronalak „Rectangular Plot“

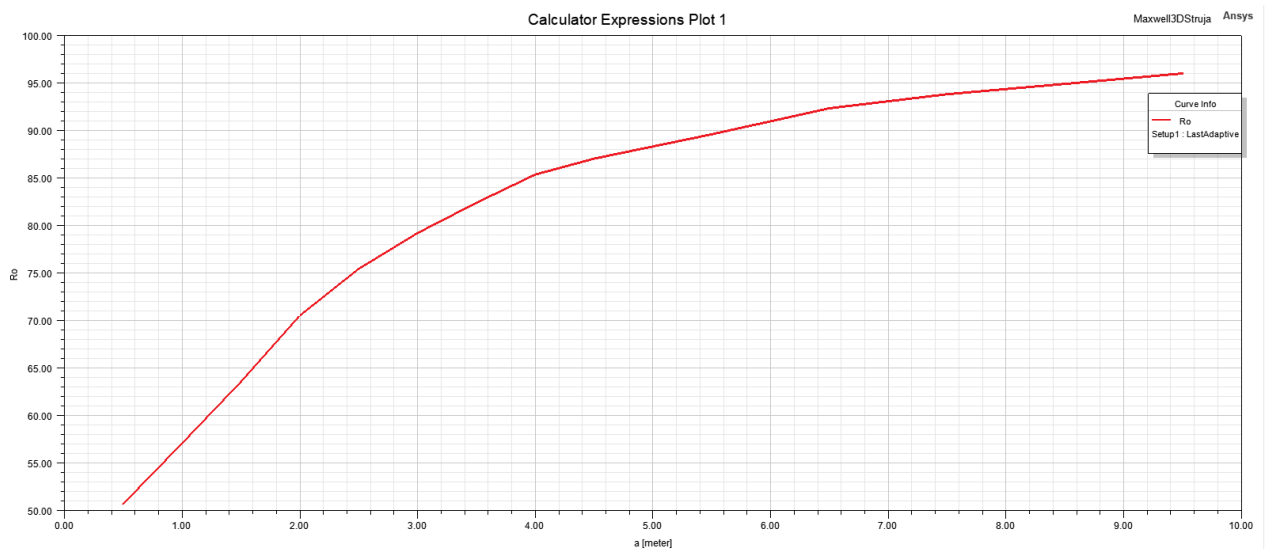


Slika 7.46. Iscrtavanje prividnog specifičnog otpora tla ( $R_o$ )

Nakon što je kliknut „New Report“ na slici 7.46. dobije se specifični otpor tla koji je prikazan na slikama 7.47. i 7.48. Na slici 7.47. je prikazana slika gdje je donji sloj tla (polukugla) bila 0,02 siemens/m, a gornji sloj tla (valjak) je bio 0,01 siemens/m, dok je za sliku 7.48. bilo obrnuto.

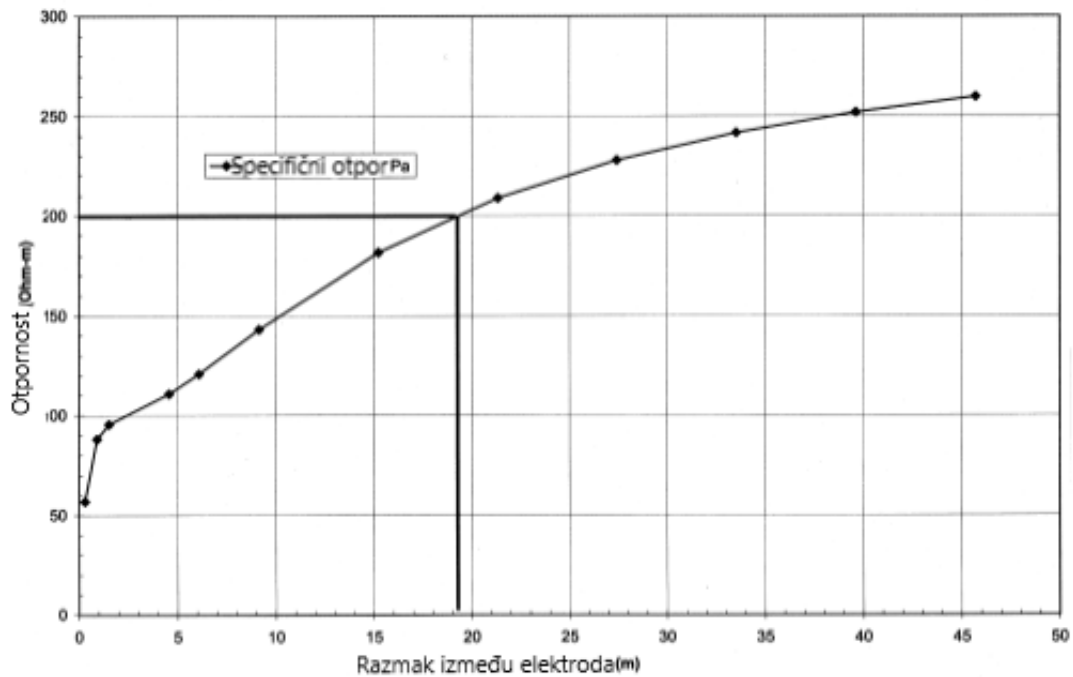


**Slika 7.47.** Iscrtavanje prividnog specifičnog otpora tla ( $R_o$ ) po varijabli  $a$



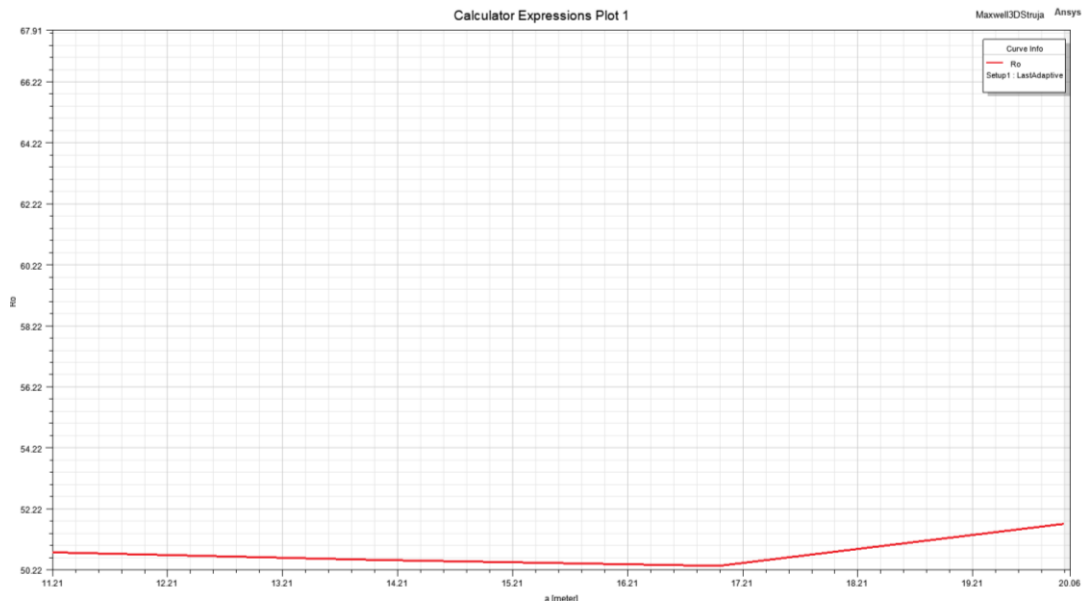
**Slika 7.48.** Iscrtavanje prividnog specifičnog otpora tla ( $R_o$ ) po varijabli  $a$

Slika 7.49. prikazuje iz „*IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*“ kako treba da slika specifičnog otpora nehomogenog tla da izgleda. Taj primjer je sličan slici 7.48. gdje je otpornost tla veća u donjem dijelu tla. Naravno za primjer gdje je otpornost tla veća u gornjem dijelu tla, onda će slika biti samo okrenuta po x osi, te će dati onda primjer slike 7.47.

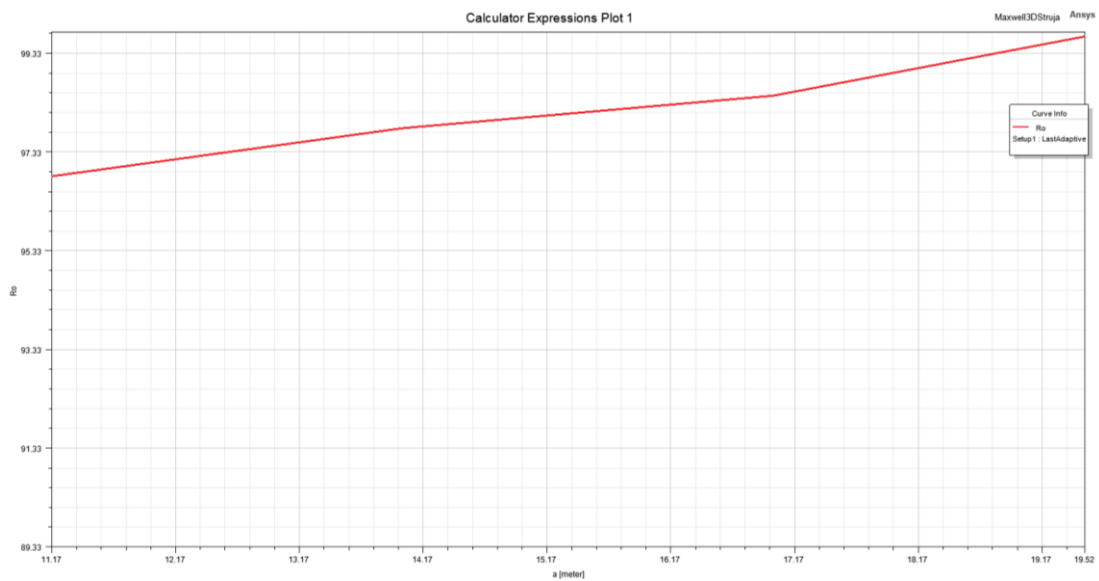


**Slika 7.49.** Prikaz prividnog specifičnog otpora tla [3]

Slike 7.50. i 7.51. prikazuju da iza 10 m (po varijabli  $a$ , u stvarnosti 5 m, jer je varijabla  $a = 0,5$ ) je specifični otpor tla skoro pa konstantan. Nakon 4 m polako postaje konstantan, a to je zbog male visine valjka (gornjeg sloja zemlje) koji je samo 1 m.



**Slika 7.50.** Iscrtavanje dijela prividnog specifičnog otpora tla ( $R_o$ ) po varijabli  $a$



**Slika 7.51.** Iscrtavanje dijela prividnog specifičnog otpora tla ( $R_o$ ) po varijabli  $a$

## 8. ZAKLJUČAK

Najvažnije što je obuhvaćeno u ovom diplomskom radu je da je opisano sve o tlu kao što su uzemljenje tla, vrste tla, njegov specifični otpor, kao i njegovo mjerenje. Kod praktičnog rada na laboratorijskim vježbama dolazili bi do problema kod mjerenja specifičnog otpora tla Wenner-ovom metodom do toga da zahtjeva puno vremena, jer se mora razmak između sondi da se drži jednak.

Zaključak za rad u programu ANSYS-a je da veoma kompleksan i jako složen, ali ako se nauči unaprijed program, što naravno treba vremena, onda pruža jako velike mogućnosti gdje inženjeri mogu da iskoriste ovaj program za rad i pomoć u radu. Također to daje prednosti i mane radu u programu ANSYS-a. Prednost programa kao što je ANSYS je ta što omogućava modeliranje proizvoljnih geometrija što bi u slučaju zadatka diplomskog rada značilo heterogenog tla, kako vertikalnog tako i horizontalnog i oboje. Također ima prednost da nam dopušta rad za bilo koju geometriju, no zbog toga to mu je i određena mana. Upravo ta općenitost ANSYS-a uzrokuje spor proces modeliranja, te je razlog vremenski zahtjevnog izrade modela. Ova sporost kod ANSYS-a uzrokovala je da se do nekih rezultata moralo čekati satima, kao na primjer rad za varijablu a koja je iznosila 10,5 metara je znao trajati do preko sat vremena. Taj problem bi se mogao riješiti prepravljanjem u „*Mesh*“, to jest „*Length*“ gdje bi se maksimalna dužina elementa mogla staviti na neki veliki broj da bi brže došli do rješenja koji trebaju samo da potvrde mjerenja koja su u ovom radu išla u konstantu. Također taj problem se mogao ispraviti i u „*Setup*“ kod postotka greške, ali ne bi baš nešto puno ubrzali proces analize. Jedan od najvećih problema koji je bio tokom rada zadatka u programu ANSYS-a je bilo stavljanje „*Sink*“, to jest stavljanje struje u drugu strujnu sondu. Taj problem se riješio na način, kao što se može vidjeti u diplomskom radu, da se izvukla sonda iz gornjeg dijela zemlje i na njezinom ovalnom dijelu se stavio „*Sink*“ umjesto na izrezani ravni dio polukugle. Na taj način se riješio problem, jer taj gornji izrezani dio polukugle se u sustavu nije vidio kao dio tla gdje struja može da prođe. Kod crtanja specifičnog otpora tla u ANSYS-u, zadani razmak između sondi od 0,5 do 6 metara se radio u koracima po 0,5 metara zbog jasnije i glađe iscrtanog krivulje specifičnog otpora. Treba napomenuti još na kraju da je otpornost tla stavljena demonstrativno.

## 9. PREGLED LITERATURE

Pošto je zadatak bio rad s specifičnim otporom tla, važno je bilo uzeti nešto općenito o uzemljenju, te je to uzeto iz knjige [1]. Slike koje prikazuju dodirni napona i napon koraka su izvađeni iz uratka [2]. Razne formule i slika specifičnog otpora tla uzete su iz standarda [3]. Iz znanstvenih i preglednih radova pod brojem [4] izvlači se rečenica kod podjele tla. Jedna od najkorištenijih literatura je literatura pod brojem [5], gdje profesor preko prezentacije objašnjava metode mjerenja specifičnog otpora tla. Iz članka pod broje [6] je uzeta slika štapnog uzemljivača. Kod članka [7] se govori o akustičnim metodama negalvanske metoda, te su tu izvađene razne slike koje prikazuju kako se radi pomoću akustične metode. Članak [8] govori o elektromagnetskim metodama koji pokazuju način rada ove metode. Kao i kod članka [6] i kod članka [9] uzeta je slika primjera elektromagnetske metode. Iz knjige pod brojem [10] uzeta je rečenica koja opisuje elektrode, to jest njihov izgled. Iz znanstvenih i preglednih radova pod brojem [11] koja je također bila jedna od najkorištenijih literatura je izvađeno je mnogo formula koje služe za izračun specifičnog otpora kod Wenner-ove metode, te su nadoradne vađenjem slike iz iste te literature. Literatura pod brojem [12] prikazuje specifični otpor tla sa Wenner-ovom metodom na dvoslojnom tlu. Kod znanstvenog i preglednog rada [13] je izvađena formula koja govori o nastalom strujnom polju. Kod znanstvenog i preglednog rada pod brojem [14] izvađena je rečenica gdje se uspoređuje Wenner-ovu metodu sa Schlumberger-ovom metodom. Za kraj članak pod brojem je [15] izvađena slika koja prikazuje završni rad iz programa ANSYS-a.

---

**POPIS UPOTRIJEBLJENE LITERATURE**

- [1] Franjo Majdančić: Uzemljivači i sustavi uzemljenja, Graphis, Zagreb, 2004., ISBN: 953-96399-6-4
- [2] Doc. dr. sc. S. Žutobradić; V. asist. dr.sc. D. Franković: Uzemljivači i sustavi uzemljenja, Projektiranje električnih postrojenja
- [3] IEEE Std 80-2000 (Revision of IEEE Std 80-1986), IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2000, ISBN 0-7381-1926-1
- [4] T. Barić; D. Šljivac; M. Stojkov; Granice valjanosti izraza za mjerenja specifičnog otpora tla Wennerovom metodom prema IEE normi Std. 81-1983, Energija, časopis Hrvatske elektroprivrede, Vol. 56, No 6, pp. 730-753, 2007.
- [5] Izvadak iz predavanja Uzemljivači i sustavi uzemljenja, KARAKTERISTIKE TLA, G. Knežević, FERIT Osijek (Pristupljeno 28.5.2023)
- [6] Štapni uzemljivač s priključnom pločicom, url: <https://www.obo.hr/proizvodi/zastitne-elektroinstalacije/izjednacenje-potencijala-i-uzemljenje/materijal-za-uzemljenje/stap-za-uzemljenje/stapni-uzemljivac-s-prikljucnom-plocicom.html> (Pristupljeno 27.6.2023)
- [7] How is sound used to explore for oil and gas?, url : <https://dosits.org/people-and-sound/examine-the-earth/how-is-sound-used-to-explore-for-oil-and-gas/> (Pristupljeno 27.6.2023)
- [8] Tihomir Rukavina, GPR – Ground penetration radar u prospekciji ležišta arhitektonskog kamena, Klesarstvo i graditeljstvo, Pučišća, br. 3-4, 2010, pregledni članak, dostupno na: url:<https://hrcak.srce.hr/file/95622> (Pristupljeno 1.6.2023.)
- [9] Ground-penetrating Radar (GPR), url: <https://mythcon-shm.com/index.php/ground-penetrating-radar-gpr/> (Pristupljeno 27.6.2023.)
- [10] Predrag Krčum: Električna mjerenja, Split, listopad 2012.
- [11] T. Barić; V. Boras; R. Galić; Nadomjesni model tla zasnovan na umjetnim neuronskim mrežama, Energija, časopis Hrvatske elektroprivrede, Vol. 56, No 1, pp. 96-113, 2007.
- [12] Tomislav Barić, Vedran Boras, Alija Muharemović, Parametric Analysis of the Theoretical Wenner Resistivity Profiles Across a Buried Perfectly Conducting



Sphere, International review of electrical engineering (IREE), Vol. 3, No 4, 2008., pp.600-612.

- [13] T. Barić; V. Boras; S. Nikolovski, Analiza utjecaja diskontinuiteta električne vodljivosti tla na otpor rasprostiranja uzemljivača, Energija, časopis Hrvatske elektroprivrede, Vol. 56, No 4, pp. 454-473, 2006.
- [14] Tomislav Barić, Vedran Boras, Hrvoje Glavaš, A simplified procedure for approximate determination of electro-geometrical parameters of two-layer soil, ISSN 1330-3651, Energija, Tehnički vjesnik, Vol. 19, No. 2, 2012, pp. 259-268
- [15] Ansys Student - Free Software Download url: <https://www.ansys.com/it-it/academic/students/ansys-student>(Pristupljeno 27.8.2023.)

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Naziv
$R_z$	$\Omega$	Otpor uzemljenja
$R_r$	$\Omega$	Otpora rasprostiranja
$R_{zv}$	$\Omega$	Otpora zemljovoda
$U_z$	V	Napon uzemljenja
$I_z$	A	Struja uzemljenja
$U_d$	V	Napon dodira
$U_s$	V	Ukupni napon
$U_{s1}$	V	Potencijal na udaljenosti od 1 m
$E_{50}$	V	Napon dodira za osobe od 50 kg
$C_s$	-	Faktor smanjenja površinskog sloja
$\rho_s$	$\Omega m$	Otpor površinskog materijala
$t_s$	s	Vrijeme trajanja udara struje
$\rho$	$\Omega m$	Specifična otpornost
K	-	Koeficijent refleksije
S	$m^2$	Zbroj površina prvog vertikalnog sloja i drugog
$S_1$	$m^2$	Površina prvog vertikalnog sloja
$S_2$	$m^2$	Površina drugog vertikalnog sloja

Oznaka	Mjerna jedinica	Naziv
$R_z$	$\Omega$	Otpor uzemljenja štapnog uzemljivača
t	m	Dubina
l	m	Duljine
d	m	Promjera
$t_h$	m	Dubina polovice duljine štapnog uzemljivača
a	m	Razmak između sondi
R	$\Omega$	Otpor tla
b	m	Dubina ukopane sonde
$\varphi_B$	V	Potencijal u središtu naponske elektrode B
c	m	Razmak kod Schlumbergerove metode
d	m	Razmak kod Schlumbergerove metode

## POPIS KORIŠTENIH KRATICA

Kratika	Naziv
CDEGS	Raspodjela struje, elektromagnetska polja uzemljenje i analiza strukture tla (eng. Current Distribution, Electromagnetic Fields, Grounding and Soil Structure Analysis)
OBS	Seizmometar oceanskog dna(eng. <i>Ocean Bottom Seismometer</i> )
GPR	Radar za proboj tla(eng. <i>Ground Penetration Radar</i> )
$\Omega\text{m}$	Ohm-metar
$\Omega$	Ohm
m	Metar
A	Amper
V	Volt
$\text{m}^2$	Metar na kvadrat
Hz (MHz, GHz)	Hertz (megahertz, gigahertz)
ES	Dubinsko sondiranje (eng. <i>echosounder</i> )

## 10. SAŽETAK

Kod ovog diplomskog rad obuhvaćena su dva dijela, a to su teoretski dio i simulacija Wenner-ove metode u programu ANSYS. Kod teorijskog dijela diplomskog rada su opisane vrste tla koje se mogu susresti kod mjerenja specifičnog otpora tla, te sve metode kojima se služi u mjerenju specifičnog otpora tla, kao što su akustične, elektromagnetske, Wenner-ova, Schlumberger-ova i Dipol-Dipol metoda. Kod simulacijskog dijela se koristio program ANSYS, kod kojeg se crtalo u 3D Maxwell dizajnu simulacija Wenner-ove metode. Zaključak je da je ANSYS program pouzdan, ali se mora naučiti dobro da bi se moglo služiti sa njime.

**Ključne riječi:** Wenner-ova metoda, ANSYS, specifični otpor tla

## 11. ABSTRACT

This Master's thesis includes two parts, the theoretical part and the simulation of Wenner's method in the ANSYS program. The theoretical part of the Master's thesis describes the types of soil that can be encountered when measuring specific soil resistance, as well as all the methods used in measuring specific soil resistance, such as acoustic, electromagnetic, Wenner, Schlumberger and Dipol-Dipol methods. The ANSYS program was used for the simulation part, where simulations of Wenner's method were drawn in 3D Maxwell design. The conclusion is that the ANSYS program is reliable, but it must be learned well in order to be able to use it.

**Key words:** Wenner's method, ANSYS, specific soil resistance

## 12. ŽIVOTOPIS

Franjo Čulap rođen je 11.6.1998. godine u Slavonskom Brodu. Završio OŠ „Vladimira Nazora“ u Odžaku. 2013. nakon završenog osnovnoškolskog obrazovanja upisuje se u Opću gimnaziju u Odžaku. Nakon završetka drugog razreda i početkom trećeg razreda upisuje se u I. gimnaziju u Osijeku. Tijekom srednjoškolskog obrazovanja sudjeluje na natjecanjima iz matematike. Srednju školu završava 2017. godine, te iste godine polaže maturu i upisuje Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Za diplomski studij odabire modul DEB-Održiva elektroenergetika. Aktivno se bavi odbojkom. Osvojio je nekoliko državnih prvenstava. Predstavljao fakultet i sveučilište na državnoj razini i na europskoj razini.