

# Modeliranje galvanskih metoda mjerenja otpornosti tla korištenjem programa Ansys

---

**Pavić, Martina**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

*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:200:118394>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-23**

*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**  
**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH**  
**TEHNOLOGIJA OSIJEK**

**Sveučilišni studij**

**MODELIRANJE GALVANSKIH METODA MJERENJA**  
**OTPORNOSTI TLA KORIŠTENJEM PROGRAMA ANSYS**

**Diplomski rad**

**Martina Pavić**

**Osijek, 2024.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac D1: Obrazac za ocjenu diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju****Ocjena diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju**

<b>Ime i prezime pristupnika:</b>	Martina Pavić
<b>Studij, smjer:</b>	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika
<b>Mat. br. pristupnika, god.</b>	D-1468, 07.10.2022.
<b>JMBAG:</b>	0165083362
<b>Mentor:</b>	prof. dr. sc. Tomislav Barić
<b>Sumentor:</b>	prof. dr. sc. Hrvoje Glavaš
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Predsjednik Povjerenstva:</b>	dr. sc. Tin Benšić
<b>Član Povjerenstva 1:</b>	prof. dr. sc. Tomislav Barić
<b>Član Povjerenstva 2:</b>	Ružica Kljajić, univ. mag. ing. el.
<b>Naslov diplomskog rada:</b>	Modeliranje galvanskih metoda mjerenja otpornosti tla korištenjem programa Ansys
<b>Znanstvena grana diplomskog rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak diplomskog rada:</b>	U diplomskom radu potrebno je izložiti teoriju kojom se objašnjava utjecaj kemijskog sastava, vlažnosti i strukture tla na otpornost tla. Opisati galvanske i ne galvanske metode mjerenja otpornosti i strukture tla. Izložiti teoriju kojom se objašnjavaju galvanske metode mjerenja otpornosti tla. Opisati poznatije metode mjerenja otpornosti tla kao što su Wenerova metoda, Schlumberger ova metoda, Dipol-Dipol metoda. Opisati prednosti i nedostatke svake pojedine metode. Navesti izraze za prividni otpor tla mieren Wennerovom metodom za dvosloino tlo. U
<b>Datum ocjene pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:</b>	22.09.2024.
<b>Ocjena pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:</b>	Izvrstan (5)
<b>Datum obrane diplomskog rada:</b>	30.09.2024.
<b>Ocjena usmenog dijela diplomskog rada (obrane):</b>	Izvrstan (5)
<b>Ukupna ocjena diplomskog rada:</b>	Izvrstan (5)
<b>Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije diplomskog rada čime je pristupnik završio sveučilišni diplomski studij:</b>	06.10.2024.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****IZJAVA O IZVORNOSTI RADA**

Osijek, 06.10.2024.

<b>Ime i prezime Pristupnika:</b>	Martina Pavić
<b>Studij:</b>	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika
<b>Mat. br. Pristupnika, godina upisa:</b>	D-1468, 07.10.2022.
<b>Turnitin podudaranje [%]:</b>	7

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Modeliranje galvanskih metoda mjerenja otpornosti tla korištenjem programa Ansys**

izrađen pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Tomislav Barić

i sumentora prof. dr. sc. Hrvoje Glavaš

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis pristupnika:

# Sadržaj

<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>1.1. Zadatak diplomskog rada</b> .....	1
<b>2. PREGLED PODRUČJA TEME</b> .....	2
<b>3. UZEMLJENJE</b> .....	3
<b>3.1. Općenito o uzemljenju</b> .....	3
<b>4. TLO</b> .....	6
<b>4.1. Vlažnost i struktura tla</b> .....	6
<b>4.2. Kemijski sastav tla</b> .....	8
<b>5. NEGALVANSKE METODE MJERENJA OTPORNOSTI TLA</b> .....	10
<b>5.1. Akustična metoda</b> .....	10
<b>5.2. Elektromagnetska metoda</b> .....	13
<b>6. GALVANSKE METODE MJERENJA OTPORNOSTI TLA</b> .....	15
<b>6.1. Wennerova metoda mjerenja otpornosti tla</b> .....	15
<b>6.1.1. Prikaz dvoslojnog tla pomoću Wennerove metode</b> .....	17
<b>6.2. Schlumbergerova metoda mjerenja otpornosti tla</b> .....	18
<b>6.3. Dipol-dipol metoda mjerenja otpornosti tla</b> .....	20
<b>7. PROGRAM ANSYS</b> .....	22
<b>8. WENNEROVA METODA U PROGRAMSKOM PAKETU ANSYS</b> .....	23
<b>9. ZAKLJUČAK</b> .....	99
<b>POPIS UPOTRIJEBLJENE LITERATURE</b> .....	101
<b>POPIS OZNAKA</b> .....	103
<b>POPIS KRATICA</b> .....	104
<b>SAŽETAK/ABSTRACT</b> .....	105
<b>ŽIVOTOPIS</b> .....	106

# 1. UVOD

Kao zadatak diplomskog rada bilo je potrebno provesti simulaciju Wennerove metode mjerenja prividne otpornosti tla u programskom paketu ANSYS. Modelirano je dvoslojno tlo uz lokalnu nehomogenost tla u gornjem i donjem sloju tla. Dvije su mogućnosti bile, prvo, da je otpornost gornjeg sloja tla veća nego otpornost donjeg sloja tla ili drugo, da je otpornost gornjeg sloja tla manja nego otpornost donjeg sloja tla, za obje mogućnosti dodala se lokalna heterogenost modelirana oblikom valjka u gornjem sloju tla koja odgovara betonskim cijevima ukopanima u zemlju. U sadržaju diplomskog rada objašnjena je i teorija o utjecaju uzemljenja, utjecaju kemijskog sastava, vlažnosti i strukture tla. Tlo nije uvijek homogeno te ovisi o brojnim faktorima te tako tlo neće svuda biti jednako vlažno jer na nju utječe temperatura. Akustična i elektromagnetska metoda objašnjene su kao negalvanske metode mjerenja otpornosti tla. A budući da je Wennerova metoda galvanska metoda za mjerenje prividne otpornosti tla uz nju objašnjene su i ostale galvanske metode. kao što su Schlumbergerova i Dipol-dipol metoda.

## 1.1. Zadatak diplomskog rada

U diplomskom radu potrebno je izložiti teoriju kojom se objašnjava utjecaj kemijskog sastava, vlažnosti i strukture tla na otpornost tla. Opisati galvanske i negalvanske metode mjerenja otpornosti i strukture tla. 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 pojedine metode. Navesti izraze za prividni otpor tla mjereno Wennerovom metodom za dvoslojno tlo. U programskom paketu Ansys potrebno je modelirati Wennerovu metodu mjerenja prividne otpornosti tla za slučaj kada je tlo dvoslojno uz lokalnu nehomogenost tla u gornjem i donjem sloju tla. Lokalnu nehomogenost tla modelirati kao kuglu ili cilindar. Komentirati utjecaj lokalne nehomogenosti tla na mjerne rezultate. U dogovoru s mentorom odabrati primjer višeslojnog tla sa lokalnom heterogenošću 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. PREGLED PODRUČJA TEME

Tema diplomskog rada je Modeliranje galvanskih metoda mjerenja otpornosti tla korištenjem programa ANSYS. Na početku rada pomoću literature [1] objašnjeno je uzemljenje te napisana podjela uzemljenja i razlozi zašto se koriste uzemljenja. U literaturi pod [2] i [3] opisano je kako i na koji način svojstva tla utječu na otpornost. Literatura pod [4] je IEEE Std koja opisuje standardne što se koriste u elektrotehnici. U poglavlju o svojstvima tla poslužila je literatura pod [5] te je potkrijepljena slikom iz literature [6]. Pod [5] i [6] nalazi se literatura pomoću koje je objašnjeno tlo te prikazan ciklus kruženja dušika u prirodi. U literaturi opisanoj pod [7] opisane su negalvanske metodu akustičnih, literatura [7] poslužila je za slike u radu. Članak koji se nalazi u literaturi [8] opisuje elektromagnetsku metodu unutar negalvanske metode. Za sliku koja se nalazi pod negalvanskim metodama poslužila je literatura [9]. Pod literaturom [10] nalazi se izvadak iz predavanja, u kojoj su objašnjene galvanske metode mjerenja otpornosti tla. Literatura [11] je znanstveni članak pomoću kojeg je prikazano mjerenje otpornosti dvoslojnog tla Wennerovom metodom. Uz pomoć literature koji je znanstveni članak[12] objašnjeno je dvoslojno tlo. Literatura [13] je znanstveni članak koji je pomogao u prikazivanju dvoslojnog tla pomoću Wennerove metode. Pod [14] navodom nalazi se diplomski rad iz kojeg su uzete slike vezane uz galvanske metode mjerenja otpornosti tla. Literatura [15] objasnila je dodatno dipol-dipol metodu. Web stranica programskog paketa Ansys preko kojeg je skinut program koji je služio u simulaciji [16]. Pod [17] opisano je detaljnije o veličinama koje su se mijenjale kao parametri u radu.

## 3. UZEMLJENJE

### 3.1. Općenito o uzemljenju

Uzemljenje se može opisati kao galvanska veza. Ta veza može nastati između metalnog uzemljenog dijela električnog uređaja, postrojenja ili neke točke mreže. A taj dio može biti iz bilo kojeg razloga pod naponom i zemlje pomoću uzemljivača. Uzemljivači su tako ukopani u tlo kako bi osigurali galvansku vezu između uzemljenog dijela i zemlje [1].

Razlozi zašto se izvode uzemljenja:

- 1) U osiguravanju živih bića, naročito ljudi u slučaju normalnog ili poremećenog stanja sustava
- 2) U osiguravanju ispravnog rada mreža, instalacija, postrojenja te električnih uređaja
- 3) Za stabiliziranje napona u vrijeme kvarova
- 4) Za garantiranje sigurnosti ljudi

Uzemljenje se provodi sustavom vodiča koji mogu zajedno sa slojevima okolnog tla, oblikom i dimenzijama spriječiti sve štetne posljedice koje mogu biti izazvane prilikom poremećaja sustava. Te posljedice mogu biti opasne za ljude i ostala živa bića. Kako bi se smanjile moguće posljedice uveli su se pojmovi poput, dodirnog napona i napona koraka, koji ni pod kojim slučajem ne smiju prijeći svoje dopuštene vrijednosti u slučaju kada je sustav poremećen. Kako bi se to spriječilo, a naponi ostali unutar granica potrebno je sljedeće: uzemljivač mora imati što manji otpor prema struji koja se širi u okolno tlo, pri čemu će otpor samog uzemljivača biti zanemariv u odnosu na otpor tla.



Kako bi se bolje razumjeli pojmovi vezani za uzemljivače i sustave uzemljenja, definirani su idući pojmovi:

- 1) **Otpor rasprostiranja  $R_r$** : Otpor koji se javlja u dijelu tla između uzemljivača i područja gdje se struja širi kroz veliki presjek. Zato će gustoća struje biti minimalna, a zemlja koja se nalazi mimo granica definira se kao neutralna zemlja, daleka zemlja ili referentna zemlja. Odnosno, otpor rasprostiranja može se definirati kao otpor između uzemljivača i referentne zemlje.
- 2) **Otpor uzemljenja  $R_z$** : čini spomenuti otpor rasprostiranja  $R_r$ , te otpor zemljovida  $R_{zv}$ , prema tome otpor uzemljenja je  $R_z = R_r + R_{zv}$ , otpor zemljovida zanemarivo je malen u odnosu na otpor uzemljenja, stoga se onda otpor uzemljenja poistovjećuje s otporom rasprostiranja i glasi:  $R_z = R_r$ .
- 3) **Struja uzemljenja  $I_z$**  protječe u zemlju ili kroz istosmjerni uzemljivač ili kroz izmjenični uzemljivač, ako se dogodi kvar. Može, a i ne mora biti dio obaveznog strujnog kruga. U slučaju da je dio, uzemljivači se nazivaju pogonskim ili radnim uzemljivačima. Za njih je bitno da neutralna točka transformatora uzemljena, ili da je generator u elektroenergetskom sustavu uzemljen.
- 4) **Udarni ili impulsni otpor uzemljenja  $R_i$**  služi za odvođenje struje munje koja dolazi u obliku kratkog impulsa.
- 5) **Otpornost tla  $\rho_z$**  predstavlja specifični električni otpor tla, mjerne jedinice Ohm-metri [ $\Omega\text{m}$ ]. Pri ispitivanju tla važno je odrediti vlažnost i temperaturu tla. Vrijednosti koje se dobiju važne su kako bi se što točnije utvrdila vrijednost njegove otpornosti. Slojevi tla bliži uzemljivaču pružaju veći otpor prolasku struje u usporedbi s udaljenijim slojevima, što uzrokuje veći pad napona u tim bližim slojevima.

- 6) **Dodirni napon**  $U_d$  definira se kao razlika potencijala između napona uzemljivača  $U_z$  kroz koji teče struja zemljospoja  $I_z$  i napona na kojem se nalazi osoba koja je dodirnula uzemljenu strukturu te je kroz tu osobu generirana određena struja.
- 7) **Napon koraka**  $U_k$  predstavlja razliku potencijala između stopala osobe ili živog bića koja hoda po površini zemlje. Ta razlika nastaje zbog raspodjele potencijala uzemljivača u tlu. Razmak stopala određen je u iznosu od 1m. Budući da živa bića poput konja, goveda i sl. imaju veći razmak između nogu dolaze pod veći napon i stradavaju zbog napona koraka.

## 4. TLO

### 4.1. Vlažnost i struktura tla

Tlo nije uvijek homogeno nego ovisi o nekoliko faktora te se može razlikovati od mjesta do mjesta, dubine. Zatim, tlo nije svuda uvijek jednako vlažno. To se mijenja ovisno o vremenu i temperaturi, a to opet utječe na vodljivost. Zemlja se kao vodič opisuje putem otpornosti koju pruža prolasku struje. Ova otpornost naziva se otpornost tla i označava se s  $\rho_z$ , a mjerna jedinica je Ohm-metar. Otpornost tla je općenito vrlo visoka u usporedbi s otporom vodiča, npr. metala. Same vrijednosti mogu varirati između samo par i nekoliko tisuća ohm-metara, no to sve ovisi o kojoj se vrsti tla radi, npr. jedna vrsta tla može imati promjenjive vrijednosti i to se događa iz razloga toga što je struja koja se nalazi u tlu elektrolitske prirode i kao takva ovisi o količini prisutnih iona [2]. Ti prisutni ioni opet ovise o topljivosti soli i stupnju vlažnosti tla iz toga razloga otpornost tla se mijenja promjenom vlažnosti, dakle otpornost tla je manja kada je tlo vlažnije te je otpornost tla veća kada tlo nije vlažno.

Temperatura nema utjecaj na otpornost tla sve dok nije niža od nule. Kada temperatura značajnije padne ispod nule i tlo se zamrzne do određene dubine, otprilike 50cm (vrijedi za kontinentalne prostore) vodljivost tla će se naglo smanjiti, a time otpornost može postati visoka. Zato je moguće da će vrijednosti otpornosti tla biti različite od mjeseca do mjeseca ako se radi o normalnim radnim uvjetima. Promjene u otpornosti tla mogu varirati i od 60% između najviše vrijednosti i najniže vrijednosti kada se analiziraju slojevi tla do dubine 1.5 metara. Na većim dubinama te razlike su manje, smanjuju se i do 20% [3].

Iz toga se razloga prilikom projektiranja uzemljenja te kod izračuna otpora uzemljenja uzimaju u obzir te promjene te da vrijednost korekcijskog faktora bude veća od 1. Radi ovih navedenih faktora potrebno je provesti detaljniju analizu tla na kojem se planira postaviti uzemljivače. U nekim slučajevima može biti i neophodno i mjerenje otpornosti tla ili probno iskopavanje kako bi se procijenila otpornost tla na dubini gdje je predviđeno da uzemljivač bude postavljen.

Obzirom na promjenjive uvjete pri postavljanju uzemljenja potrebno je držati se pripadajućih smjernica:

-kod ukopavanja uzemljivača važno je osigurati najmanju dubinu od 0.5 metara ispod površine tla, zato što pri toj dubini tlo oko uzemljivača ima manje promjene u vlazi i temperaturi, te se zimi ne zamrzava (ovo vrijedi za kontinentalna područja). Kod primorskih područja preporuka je da se uzemljivači ne stavljaju na dubinu manju od 0.5 metara, iako se tlo ne mrzne no zbog mogućeg isušivanja se ne preporučuje.

-kada se odabire lokacija za postavljanje uzemljivača bitno je odabrati lokaciju koja ne sadrži slojeve šljunka i kamenja, zato što oni mogu smanjiti kontakte točke uzemljivača s tlom te tako povećati prijelazni otpor i ukupni otpor uzemljenja

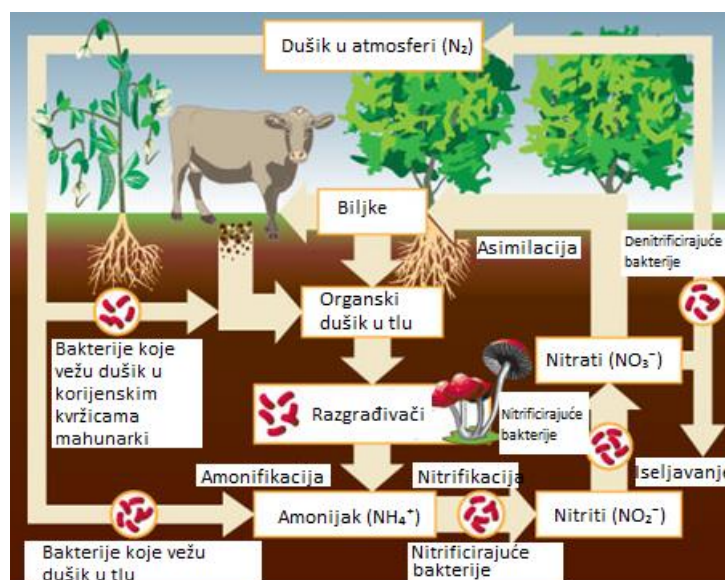
-trakasti i pločasti uzemljivači postavljaju se horizontalno (dulja strana okrenuta prema dolje) radi smanjivanja negativnog utjecaja slijeganja tla i smanjenje dodirne površine, dok se štapni postavljaju vertikalno

Zaključno s tim uzemljivač bi se trebao okružiti slojem bez prisustva šljunka i kamenja kako bi se smanjili nepovoljni uvjeti i tako osigurao bolji kontakt s okolnim tlom. Nakon što se iskop popuni, važno je dobro sabiti nasutu zemlju kako bi se poboljšao kontakt uzemljivača s tlom [1].

Električna konduktivnost tla je uglavnom elektrolitička. Zbog toga, otpornost tla naglo raste kada sadržaj vlage padne ispod 15% od težine tla. Količina vlage zavisi od veličine zrna, kompaktnosti i raznovrsnosti zrna. Utjecaj temperature na otpornost tla gotovo je zanemariv za temperature iznad točke smrzavanja. Na 0°C u tlu počinje smrzavanje, što će dovesti do brzog povećavanja otpornosti. Na otpor tla mogu utjecati i sastav i količina topivih soli, zatim kiselina ili lužina u tlu [4].

## 4.2. Kemijski sastav tla

Najrasprostranjenije soli kalija, kalcija i magnezija u prirodi su karbonati, koji su formirali taloženjem iz koncentriranih otopina ili kao rezultat procesa izumiranja organizama. Kalcijev karbonat jedan je od rasprostranjenijih spojeva na Zemlji te se može isticati po svojoj čvrstoći te stupnju iskristaliziranosti. Uz kalij kalcij i magnezijeve karbonate bitnu ulogu ima i aluminij, koji je najzastupljeniji element u litosferi. Dušik je prisutan u svim dijelovima okoliša, a najviše ga ima u atmosferi gdje čini 79% zraka. Također može se pojaviti kao zagađivač u obliku različitih oksida. Dušik prolazi kroz različite faze tijekom svog ciklusa u okolišu. Stalno se mijenjajući i prelazeći iz jednog oblika u drugi. Proces fiksacije  $N_2$ , koji izvode bakterije, omogućava atmosferskom dušiku da ulazi u tlo, sami proces kruženja dušika u prirodi može se vidjeti na slici 4.1.



Slika 4.1. Kretanje dušika u prirodi [5]

Dušik se u tlu javlja u obliku organskih i anorganskih spojeva. Organski spojevi dušika obuhvaćaju humus, kao i djelomično razgrađene biljne i životinjske ostatke, koji čine značajan dio ukupne količine dušika u tlu. S druge strane, mineralni dušik čini samo mali postotak, no igra ključnu ulogu u prehrani biljaka. Međutim, količina mineralnog dušika često je nedovoljna za optimalan rast poljoprivrednih kultura, što zahtijeva dodatnu primjenu gnojiva kako bi se osigurala dovoljna dostupnost ovog esencijalnog hranjiva.

Osim što ukupna količina ovisi o klimi ovisi i o:vegetaciji, matičnom supstratu te starosti tla. Dušik koji je potreban poljoprivrednim kulturama nemoguće je naći u prirodi tolikog intenziteta za postizanje visokih prinosa, stoga je potrebno tlo dodatno obogatiti dušikom, to se naziva gnojidba dušikom.

Mineralni oblici dušika koji se nalaze u tlu su:  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_3^-$  i  $\text{NO}_2^-$ , a biljke koriste anorganski dušik u obliku amonijevog ili nitratnog iona. Amonijev ion smatra se pogodnijim jer se može neposredno ugraditi u organske tvari, dok je nitratni ion malo drugačiji je se kod njega prvo mora reducirati do amonijaka [6].

## 5. NEGALVANSKE METODE MJERENJA OTPORNOSTI TLA

### 5.1. Akustična metoda

Poznato je da su nafta i zemni plin nataloženi milijunima godina ispod površine morskoga dna. Nastali su od izumrlih biljaka i životinja koji su zatrpani bili što pijeskom što sedimentima morskoga dna te muljem uz prisustvo topline iz Zemlje. Uz pomoć akustične metode, tj. zvuka koji se projicira on omogućuje lociranje nalazišta. Ti slojevi morskoga dna ispituju se seizmičkom refrakcijom i seizmičkom refleksijom, to su tehnike za ispitivanje slojeva morskoga dna koja koristi akustičnu energiju koju reflektiraju različiti slojevi morskoga dna. Osnovna tehnika seizmičke refleksije je ehosonda koja se koristi za mjerenje dubine vode, dok za slučaj preciznog mjerenja do morskoga dna primjenjuje se visokofrekventni ehosonderi. Sonde koje se koriste za detektiranje nalaze se na dnu broda, gdje se zvučni impulsi odašilju iz sonde u vodu tamo će se zvuk odbiti o morsko dno i tako vratiti nazad uz pomoć pretvarača. Uz pomoć formule dobije se udaljenost (5-1).

$$\text{udaljenost} = \text{brzina} \cdot \frac{\text{vrijeme}}{2} \quad (5-1)$$

Umnožak je podijeljen s dva jer je izmjereno vrijeme povratnog putovanja (od sonde do morskog dna i natrag do sonde). Što se zvučni impulsi brže vraćaju na sondu s dna oceana, to je dubina mora manja i dno mora veće. Zvučni impulsi šalju se redovito dok se brod kreće duž površine, što proizvodi liniju koja pokazuje dubinu oceana ispod broda. Ovi kontinuirani podaci o dubini koriste se za izradu batimetrijskih karata područja istraživanja. Prema slici 5.1. može se vidjeti opisani postupak [7].

Seizmička refleksija koristi snažniji zvučni signal i niže frekvencije zvuka (10-50 Hz) u usporedbi s ehosondom kako bi se omogućilo dublje promatranje ispod samoga morskog dna. Zvučni puls često se emitira iz niza zračnih pušaka koje se vuku iza broda koji se kreće sporim tempom.

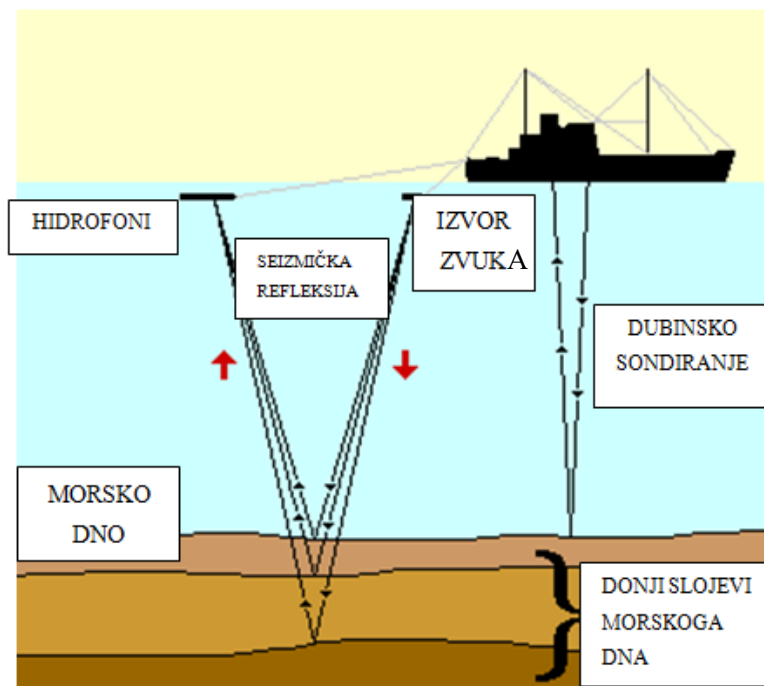


Slika 5.1. Ehosonda izračunava dubinu vode [7]

Zračne puške brzo otpuštaju komprimirani zrak, stvarajući mješuric te intenzivan zvuk. Dio zvuka će se odbiti o morsko dno, a dio će proći kroz njega. Zvuk koji prođe kroz morsko dno isto tako može se odbiti unutar morskog dna te tako vratiti na površinu. Brod vuče hidrofone koji će detektirati reflektirani zvučni signal koji dopiše na površinu. Vrijeme koje je potrebno zvuku da se vrati na brod može se koristiti za određivanje opsega slojeva na morskom dnu i njihovog položaja. Taj položaj može biti nagnut, ravan, itd. te također daje neke informacije o sastavu slojeva.



Povlačenjem više hidrofonskih traka razdvojenih između 50m i 200m, znanstvenici mogu stvoriti 3D slike slojeva sedimenta Zemlje. Ova tehnika se naziva višekanalna seizmika [7]. Seizmičkom refrakcijom omogućeno je pružanje više informacija o slojevima, jer se zvučni impulsi koji prodiru u morsko dno reflektiraju, lome i prate putanju kroz različite slojeve i pri tome omogućuju određivanje same gustoće tih slojeva.



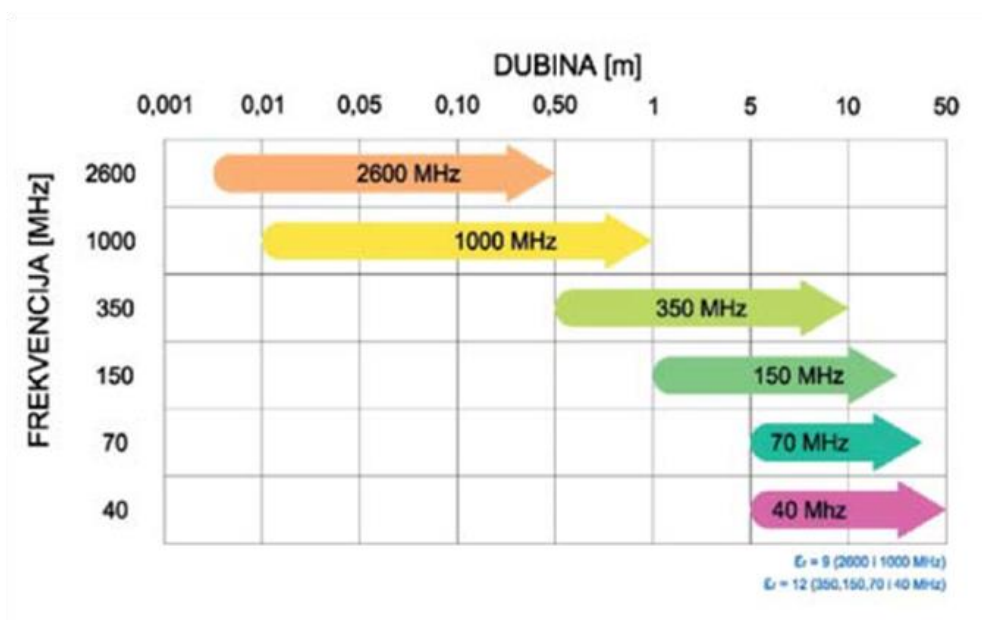
Slika 5.2. Ehosonda izračunava dubinu vode [7]

Seizmička istraživanja mogu se provesti pomoću instrumenta seizmometra oceanskog dna (engl. *Ocean Bottom Seismometer*). Identifikacija značajki poput slanih kupola i curenja u slojevima morskog dna može ukazivati na prisutnost nafte i plina. Slane kupole formiraju se kada se područja u oceanu periodično isušuju, ostavljajući sloj soli koji kasnije postaje ukopan pod sedimentima. Seizmička refleksija i refrakcija koriste se za detekciju tih formacija zbog njihovog specifičnog oblika i sastava.

## 5.2. Elektromagnetska metoda

Radar za prodor tla engl. *Ground Penetration Radar* (GPR) geofizička je metoda. Pomoću te metode može se doći do brzog i jednostavnog dijagnosticiranja geoloških i geotehničkih parametara tla. Osim toga pogodno je i za dijagnosticiranje stijenske mase te dijagnosticiranje eksploatacijskih parametara ležišta, rudnika površinskih kopova [8]. Sami GPR uređaji imaju ograničeno djelovanje frekvencija, prikazano na slici 5.3., te djeluju od 40 MHz do 3 GHz. U slučaju frekvencija iznad 1GHz daju izvrsnu razlučivost čak do nekoliko milimetara, dok u slučaju niže frekvencije dobije se značajnije niža rezolucija.

Odnos reflektiranog signala i šuma dovoljno visokog da ga radijski prijemnik detektira može se odrediti dubinu penetracije GPR-uređaja. Signal koji se odašilje od strane radarske antene može izgubiti snagu radi nekoliko razloga: gubitka unutar samog uređaja, prigušena medija, radijalnog širenja elektromagnetskog polja te gubitka kod refleksije. Centralna frekvencija uređaja na kojoj se prikupljaju podaci imaju jak utjecaj na dubinu penetracije [8].



Slika 5.3. Dubina penetracije GPR uređaja za pojedine frekvencije vapnenačkih stijena [8]

GPR je metoda kojom dobivamo tomografske presjeke tla neposredno ispod antene sustava. Prema slici 5.4., uređaj će funkcionirati poput običnog radara, to znači da će elektromagnetski impuls usmjeriti u ispitivani medij te pratiti i analizirati odziv.

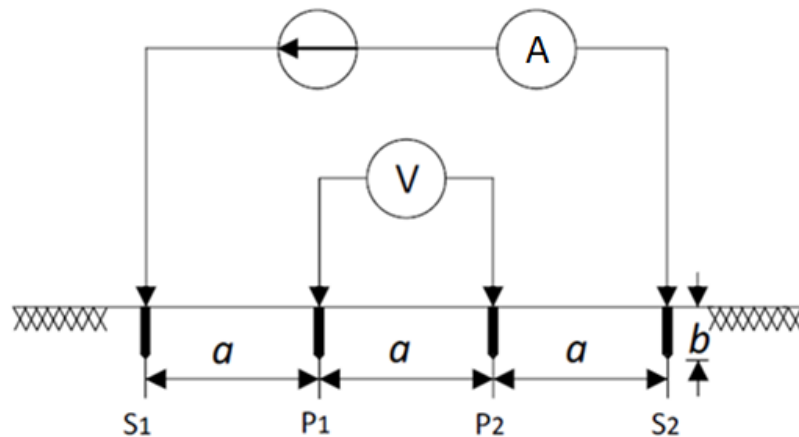


**Slika 5.4.** GPR uređaj [9]

## 6. GALVANSKE METODE MJERENJA OTPORNOSTI TLA

### 6.1. Wennerova metoda mjerenja otpornosti tla

Za mjerenje specifičnog otpora Wennerovom metodom koriste se četiri elektrode (sonde) postavljene duž iste linije na jednakim razmacima. Na slici 6.1, elektrode su međusobno udaljene za vrijednost  $a$ , te je njihova zabijenost u tlu označena s  $b$ . Vanjske elektrode se predstavljaju strujne sonde označene s S1 i S2, dok unutarnje predstavljaju potencijalne ili naponske sonde označene s P1 i P2. Kada se struja pusti kroz strujne sonde S1 i S2, između njih se stvara potencijalna razlika, tu razliku potencijala mjerimo voltmetrom koji je spojen na potencijalne (naponske) sonde P1 i P2 [10].



Slika 6.1. Shema Wennerove metode [10]

Za proračun specifičnog otpora tla  $\rho_a$  potrebni su sljedeći podaci:

$R$  - otpor tla koji se izračunava preko omjera izmjenjenog napona i ispitne struje [ $\Omega$ ],

$a$  - definira razmak između elektroda [m]

$b$  - definira dubinu na koju su postavljane elektrode [m]

$$\rho_a = \frac{4 \cdot \pi \cdot a \cdot R}{1 + \frac{2 \cdot a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (6-1)$$

Ako je dubina zabijanja sonde, označena  $b$ , znatno manja od razmaka između sondi  $a$  ( $a > 20b$ ), tada je formula drugačija te bitno jednostavnija te glasi (6-2):

$$\rho_a = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R \quad (6-2)$$

Što je veći razmak između sondi, to je veći obujam tla uključen u mjerenje što rezultira većom dubinom tla koja se mjeri. Dobivena će vrijednost specifičnog otpora predstavljati prosječnu vrijednost za obujam tla od površine do dubine ekvivalentne udaljenosti između sondi [10].

**Nedostatci Wennerove metode:**

1. Zahtjeva puno vremena za izvođenje mjerenja jer se sve četiri elektrode moraju pomicati za svako novo izvršeno mjerenje
2. Budući da među elektrodama razmak može biti i nekoliko desetaka metara, potrebno je uložiti dodatno vrijeme za pomicanje elektroda
3. Potrebni su dugački kabeli za strujne i potencijalne elektrode, što može predstavljati problem kod velikih udaljenosti
4. Osjetljivost na efekt bočnih promjena u tlu

**Prednosti Wennerove metode:**

1. Omjer primljenog napona na potencijalnim elektrodama je povoljan u odnosu na puštenu struju na strujnim elektrodama

### 6.1.1. Prikaz dvoslojnog tla pomoću Wennerove metode

Mjerenje specifičnog električnog otpora tla predstavlja ključan postupak pri prikupljanju podataka potrebnih za projektiranje i izgradnju sustava uzemljenja te u samoj analizi sustava. Postupak mjerenja provodi se specijaliziranim baterijski napajanim mjernim uređajem. Ovaj uređaj sadrži strujni izvor izmjenične struje, čija frekvencija se razlikuje od mreže 50/60 Hz, frekvencija se ne podudara s frekvencijama mogućih harmonijskih komponenti sustava [11].

Preciznost procjene svojstava tla na temelju izmjerenih podataka iznimno je važna jer to izravno utječe kako na točnost izračuna parametara tako i na troškove njegove izvedbe. Model dvoslojnog tla u svojoj biti ima dva sloja od kojih svaki od njih imaju različit specifični električni otpor [12].

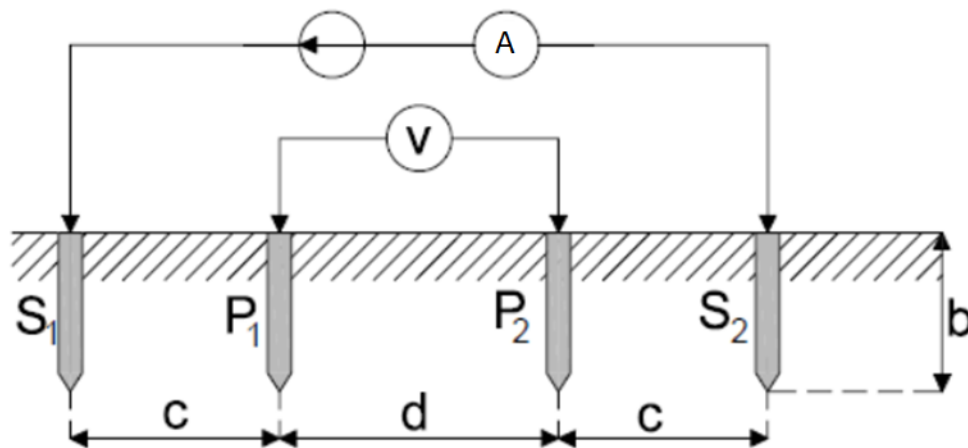
Također uključuje: filter koji odvaja izmjenične izmjerene napon s istom frekvencijom kao ACS frekvencija i prigušuje druge frekvencije, voltmetar visoke impedancije i ampermetar. Utjecaj smetnji tijekom mjerenja otpornosti tla često su zanemarivi [13].

Elektromagnetski problemi mogu biti definirati pomoću integralnih ili diferencijalnih jednadžbi. No da bi se znala izabrati prikladna numerička metoda za rješavanje sustava potrebno je znati o kojoj se vrsti opisa elektromagnetskog problema radi. Postoje dvije metode za rješavanje problema, prva je metoda graničnih elemenata, BEM, te druga metoda konačnih elemenata, FEM. Metoda graničnih elemenata koristi se kada je problem izražen integralnim jednadžbama. Metoda konačnih elemenata koristi se kada je problem izražen diferencijalnim jednadžbama.

U ovome diplomskom radu koristio se programski paket ANSYS pomoću kojeg je modelirano tlo i provedena Wennerova metoda. Programski paket ANSYS na jednostavan način omogućuje modeliranje slojevitog tla, modeliranje različitih konfiguracija tla te automatizacije proračuna pomoću opcije parametarskog engl. *sweeps*. Dvoslojno se tlo modeliralo pomoću polukugle i cilindra, dok se lokalna heterogenost tla modelirala cilindrom unutar gornjeg sloja tla.

## 6.2. Schlumbergerova metoda mjerenja otpornosti tla

Naočigled ova metoda izgleda vrlo slična Wennerovoj metodi mjerenja specifične otpornosti tla. Kao i Wennerova metoda sastoji se od četiriju elektroda, od toga su dvije strujne koje su smještene u vanjskom krugu, a dvije su potencijalne koje su smještene u unutarnjem krugu. Glavno obilježje po kojoj se Schlumbergerova metoda razlikuje od Wennerove metode su razmještaj elektroda. Prema slici 6.2. može se vidjeti da elektrode nisu na jednakom razmaku. Sam razmak elektroda označen je sa  $c$  te  $d$ . Slovo  $c$  predstavlja razmak među strujnom i potencijalnom elektrodom i kao što se može zamijetiti potencijalna elektroda bliža je strujnoj elektrodi što znači da kada se ona pomakne osjetljivost će biti početi padati, dok će vrijednost potencijala rasti, dok slovo  $d$  predstavlja razmak među potencijalnim elektrodama. U odnosu na Wennerovu metodu Schlumbergerova metoda je predstavlja bržu mjernu tehniku zbog toga što se tijekom mjerenja otpora tla pomiču samo vanjske elektrode, tj. strujne elektrode. No kako je veći razmak između strujnih i naponskih elektroda potreban je voltmetar koji je osjetljiviji i ima veće mjerne struje [13].



Slika 6.2. Shema Schlumbergerove metode [14]

Ako je dubina zabijanja elektrode,  $b$ , mala u usporedbi s razmacima  $c$  i  $d$  primjenom Schlumbergerove metode prividni specifični otpor može izračunati prema formuli (6-3):

$$\rho_a = \pi \cdot \frac{c \cdot (c+d)}{d} \cdot R \quad (6-3)$$

**Prednosti Schlumbergerove metode [10]:**

1. Omogućuje bolji prodor u dublje slojeve tla zbog veće varijacije u udaljenosti među vanjskim i unutarnjih elektroda
2. Omogućuje brže mjerenje jer se pri mjerenju ne moraju sve četiri elektrode pomicati
3. Manje je zahtjevna za osjetljivost instrumenta u usporedbi s Wennerovom

**Nedostatci Schlumbergerove metode [10]:**

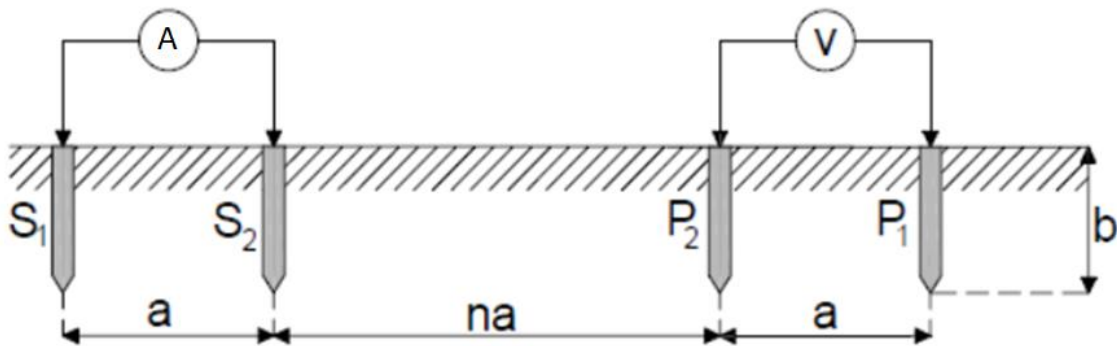
1. Potrebni su dugački kabeli za strujne elektrode
2. Analiza podataka je kompleksnija u odnosu na Wennerovu metodu



### 6.3. Dipol-dipol metoda mjerenja otpornosti tla

Dipol-dipol metoda je galvanska metoda mjerenja specifične otpornosti tla. Dipol-dipol mjerna metoda u osnovi koristi prijenosni strujni izvor niske frekvencije. Taj izvor koji se koristi ne podudara se s mrežnom frekvencijom (50/60 Hz) niti s mogućim harmonicima. Uz to, metoda uključuje osjetljivi voltmetar opremljen pojasnim filterom koji propušta frekvencije generirane strujnim izvorom, a ostale prigušuje [15].

Ova metoda sastoji se od dva seta sonde, onih strujnih i potencijalnih. Postoje dva tipa metode: dipol-kada su elektrode postavljene na malom razmaku, dok suprotno tome je drugi tip metode koji se naziva bipol i kod njega su elektrode daleko postavljene. Prema shemi dipol-dipol metode prikazano na slici 6.3. strujne elektrode nalaze se na lijevoj strani dok se potencijalne sonde nalaze na desnoj strani, razmak strujnih elektroda i razmak između potencijalnih elektroda je isti i označava se s  $a$ . Udaljenost strujnih i potencijalnih sonde se s umnožak  $n$  (predstavlja cijeli broj) i  $a$  (udaljenost između dvije iste sonde) [10].



Slika 6.3. Shema dipol-dipol metode [14]

Prema formuli (6-4) prividna specifična otpornost tla računa se:

$$\rho_a = \pi \cdot a \cdot n \cdot (n + 1) \cdot (n + 2) \cdot R \quad (6-4)$$

**Pri čemu je:**

$a$ -razmak između dvije strujne ili potencijalne sonde

$n$ -cijeli broj

$\pi$ -konstanta

$R$ -vrijednost izmjerenog otpora( $\Omega$ ) (dobivena omjerom  $U/I$ )

**Prednosti dipol-dipol metode [10]:**

1. Kraći kabeli omogućavaju lakše mjerenje

**Nedostatci dipol-dipol metode [10]:**

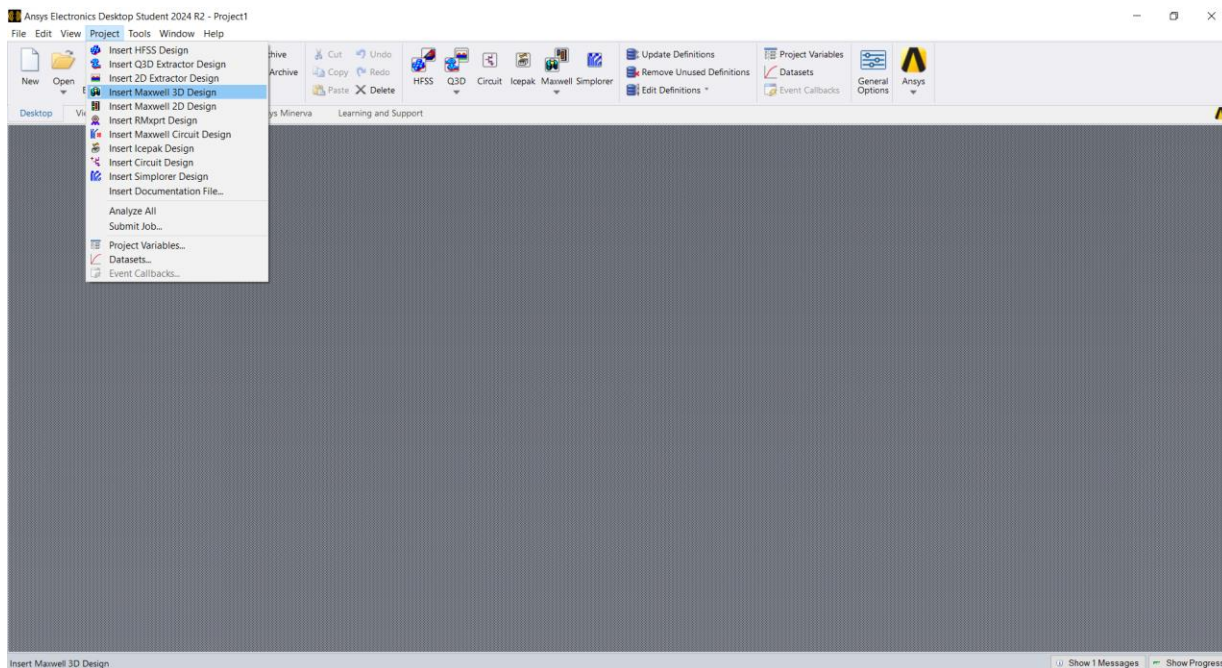
1. Potrebni su veliki generatori za proizvodnju ispitne struje

## 7. PROGRAM ANSYS

Program koji se koristio u svrhu simulacija za diplomski rad naziva se ANSYS Electronics. ANSYS Electronics softvertski je alat iz paketa ANSYS-a, specijaliziran za simulaciju elektromagnetskih, električnih i elektromehaničkih fenomena. Koristi se za analizu, dizajn, optimizaciju elektroničkih i elektromagnetskih sustava, uključujući i komponente poput antena, transformatora, motora, kabela i drugih elektroničkih komponenti. ANSYS Electronics uključuje i module kao što su HFSS koja se koristi za visokofrekventnu simulaciju, Maxwell modul koja se koristi za elektromehaničku analizu i druge, ovisno o specifičnoj primjeni. Budući da se ANSYS može preuzeti kao student verzija, odličan je program za proširiti svoje vještine koje će koristiti u daljnjem obrazovanju mladih inženjera [16].

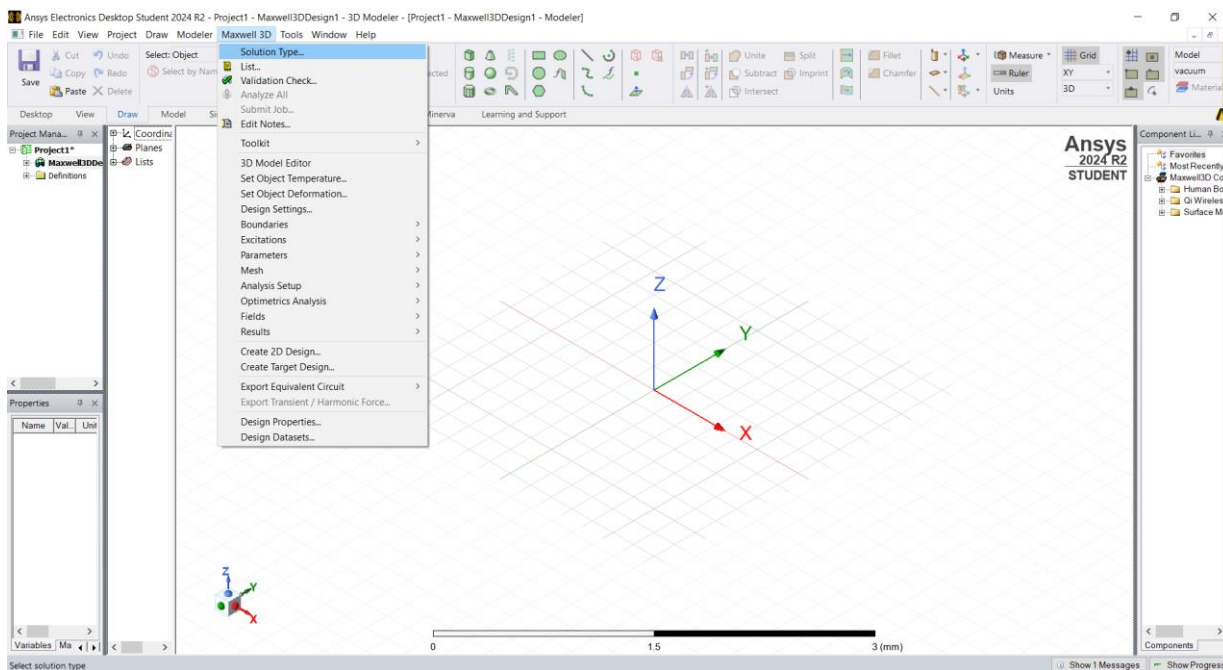
## 8. WENNEROVA METODA U PROGRAMSKOM PAKETU ANSYS

Nakon početnog otvaranja programa ANSYS Electronics Desktop potrebno je otvoriti novi projekt. To se može napraviti tako da se u gornjem lijevom uglu klikne na „PROJECT“ i u padajućem izborniku odabere se „INSERT MAXWELL 3D DESIGN“, kao što je prikazano na slici 8.1.

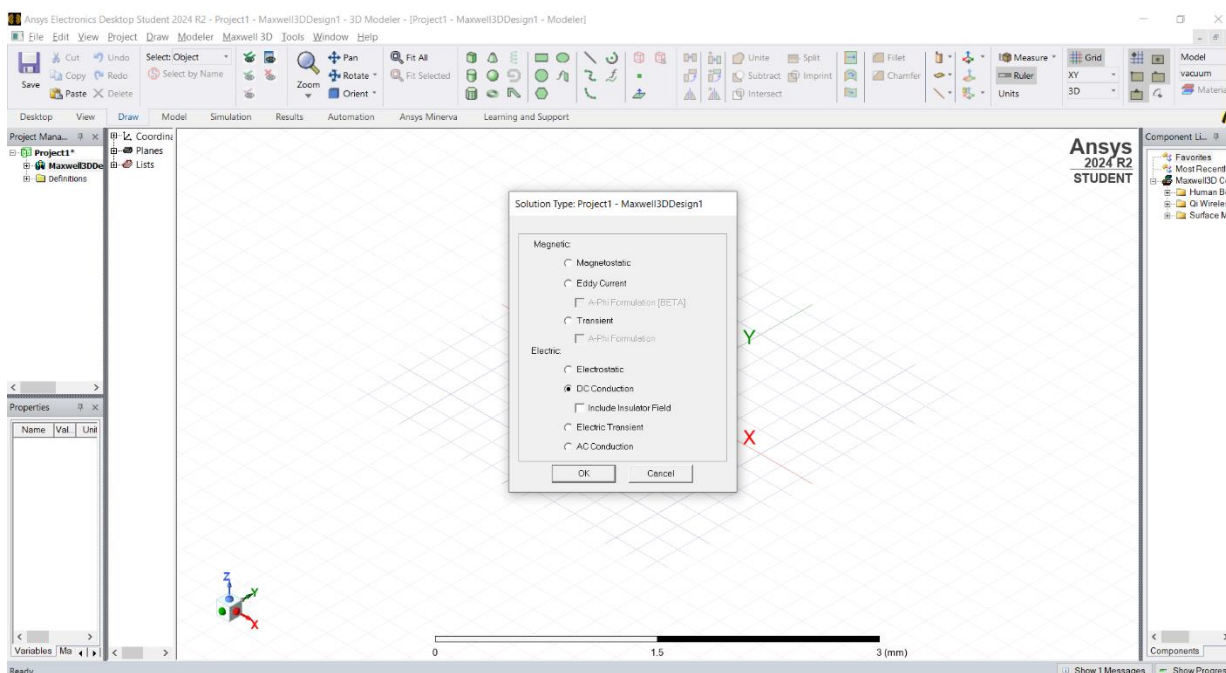


Slika 8.1. Odabir novog projekta

Nakon odabira „MAXWELL 3D DESIGN-a“, potrebno je kliknuti na padajući izbornik „MAXWELL 3D DESIGN-a“ i odabrati „SOLUTION TYPE“, prikazano na slici 8.2., Nakon odabira „SOLUTION TYPE“ potrebno je odabrati „DC CONDUCTOR“, prikazano na slici 8.3.

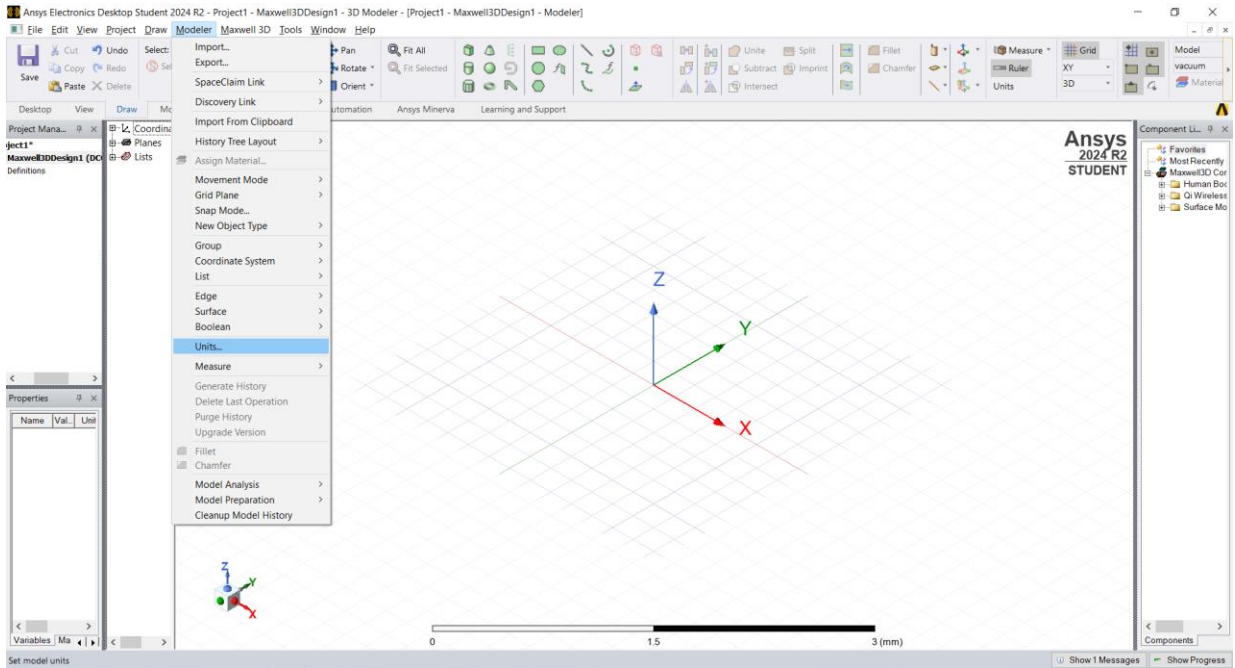


Slika 8.2. Kako odabrati „SOLUTION TYPE-a“

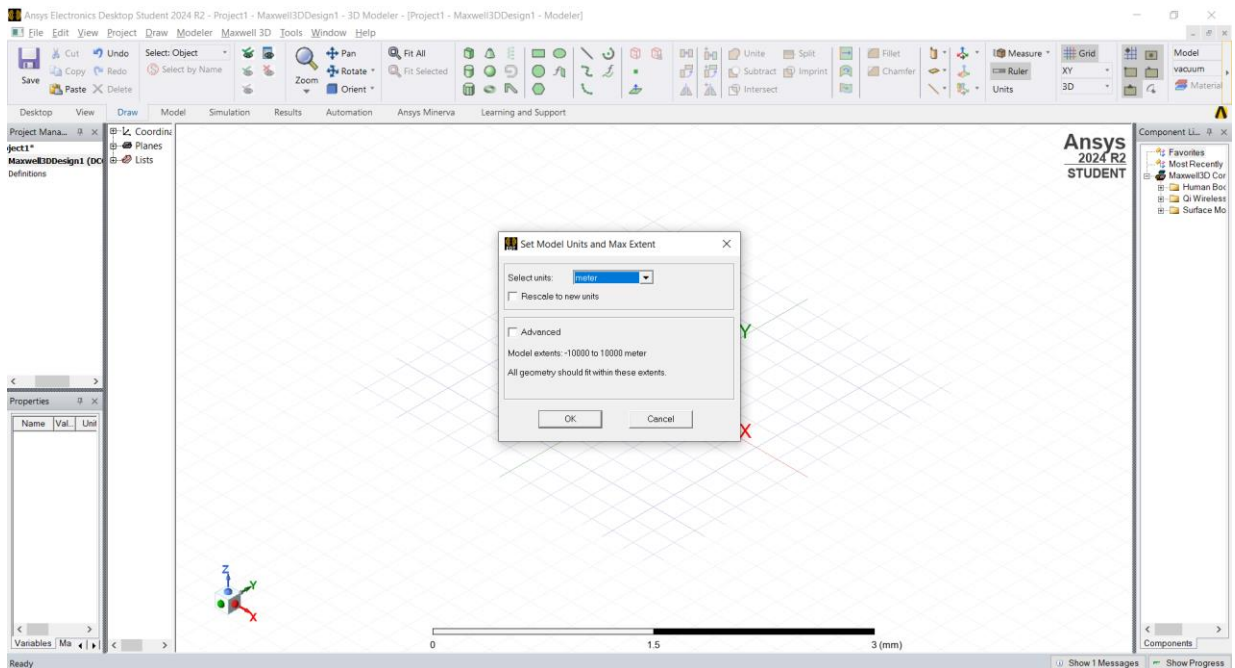


Slika 8.3. Odabir „DC CONDUCTOR-a“

Za odabir mjerne jedinice potrebno je stisnuti padajući izbornik „MODELER“ i odabrati „UNITS“, prikazano slikom 8.4., zatim se odabire kao mjerna jedinica „METER“, prikazano slikom 8.5.

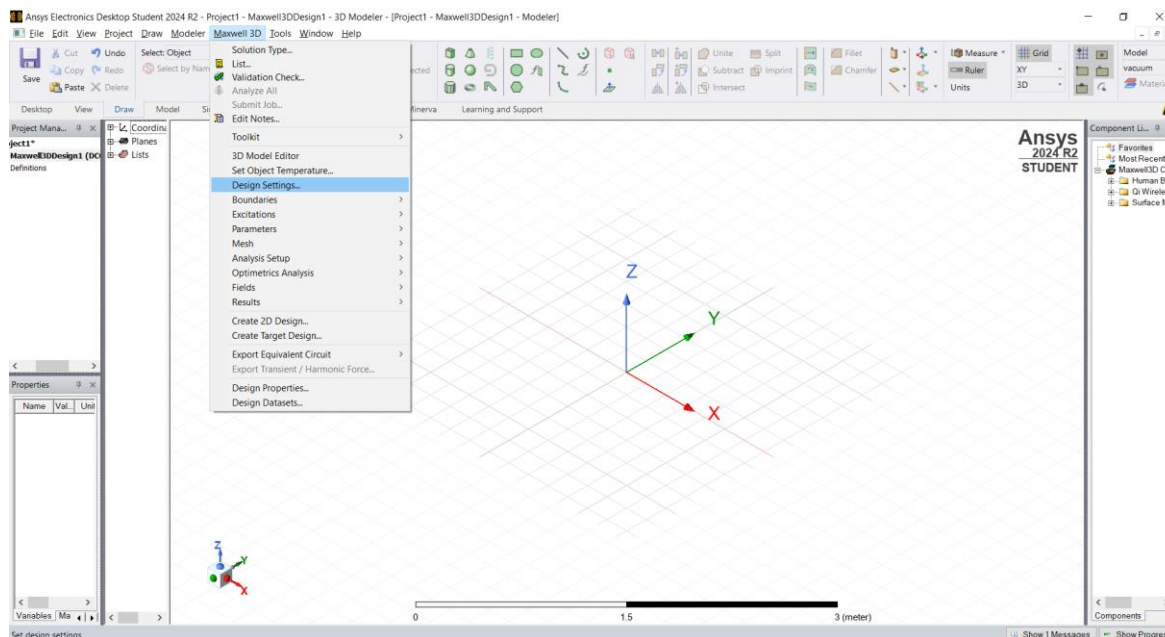


Slika 8.4. Odabir „UNITS“

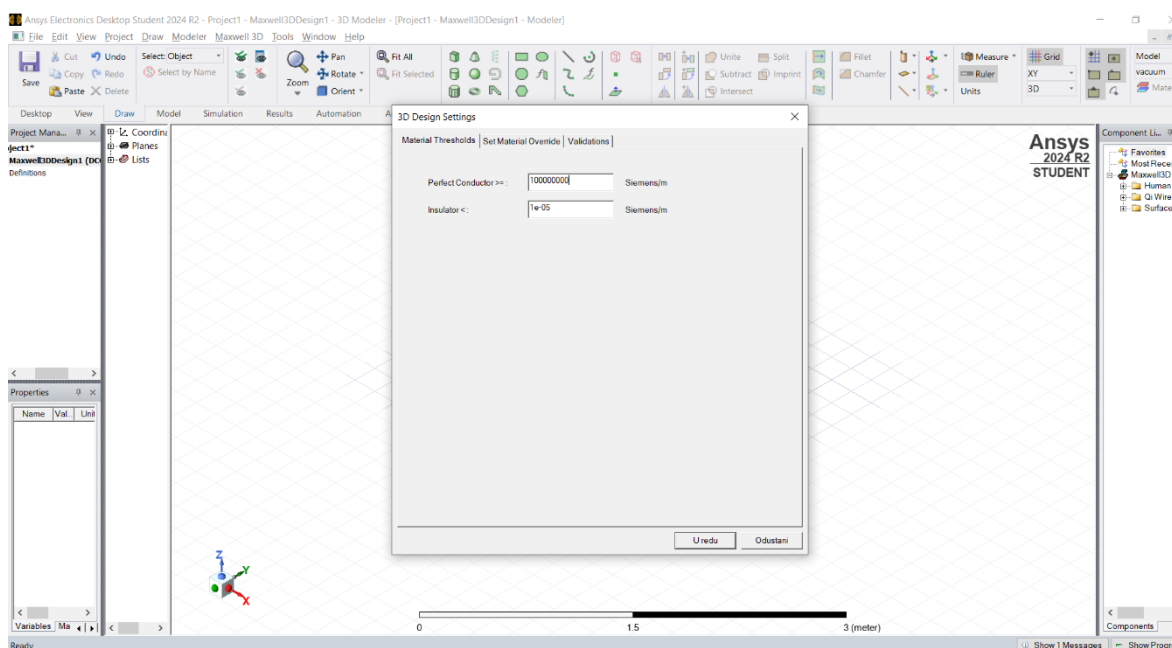


Slika 8.5. Mjerna jedinica „METER“

Iduće što se treba podesiti je Perfect Conductor i Insulator, to će se napraviti na sljedeći način: Kliknuti „MAXWELL 3D“, zatim „DESIGN SETTINGS“ prikazano na slici 8.6. te podesiti veličine: Perfect Conductor  $\geq$  : 100000000 siemens/m ( $10^8$  siemens/m) i Insulator  $<$  :  $1e-05$  siemens/m, prikazano na slici 8.7.

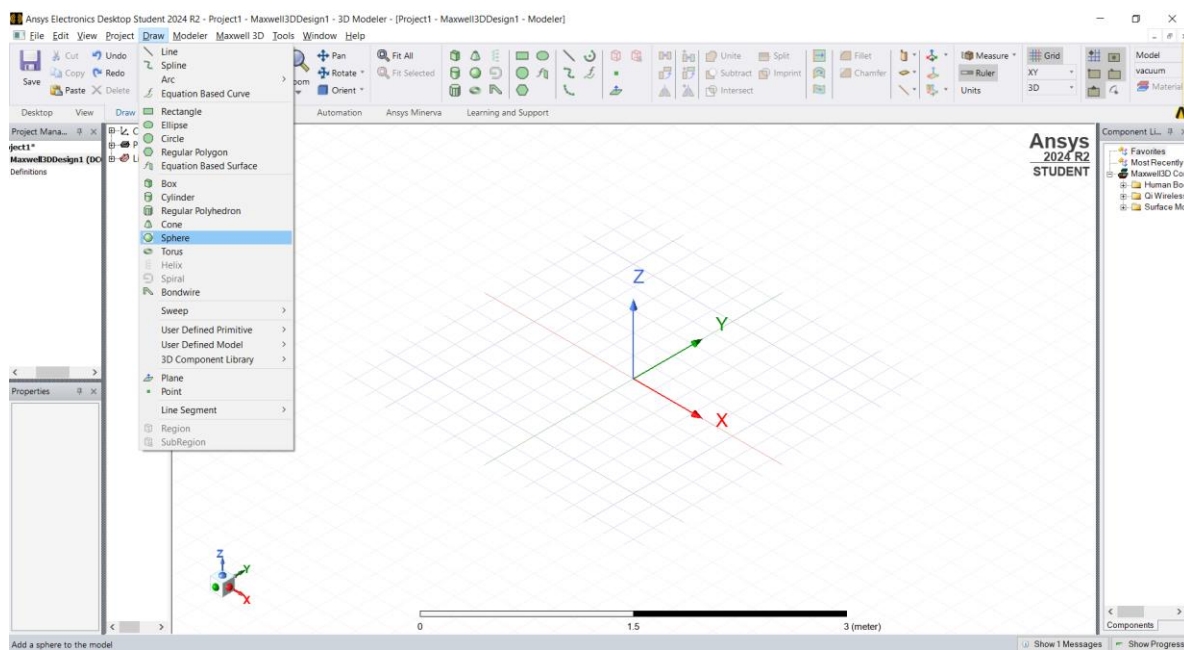


Slika 8.6. Funkcija „DESIGN SETTINGS“



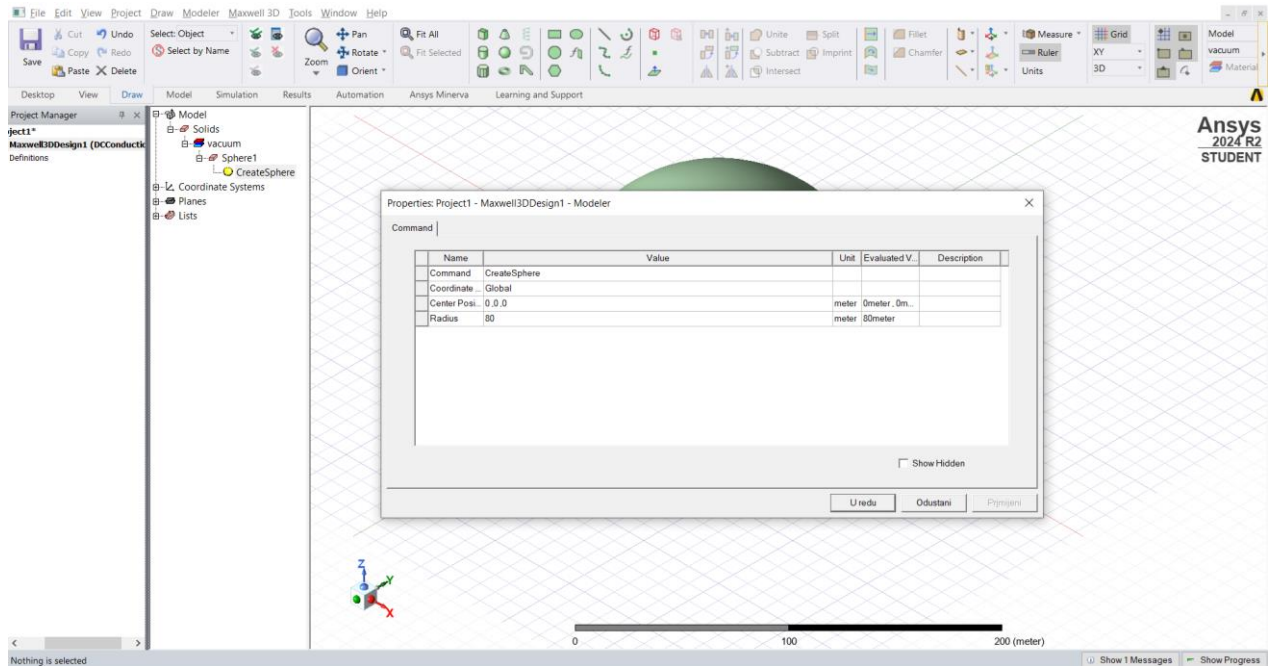
Slika 8.7. Podešavanje vrijednosti veličina „Perfect Conductor“ i „Insulator“

Zatim se na radnom listu crta sfera, klikne se na „DRAW“, zatim „SPHERE“, prikazano na slici 8.8, koordinate su prikazane na slici 8.9. do njih se dođe tako što se dvoklikne na „CREATESPHERE“ u lijevom izborniku, potrebno je za radijus upisati 80 m, a kako izgleda nacrtana sfera prikazano je na slici 8.10.

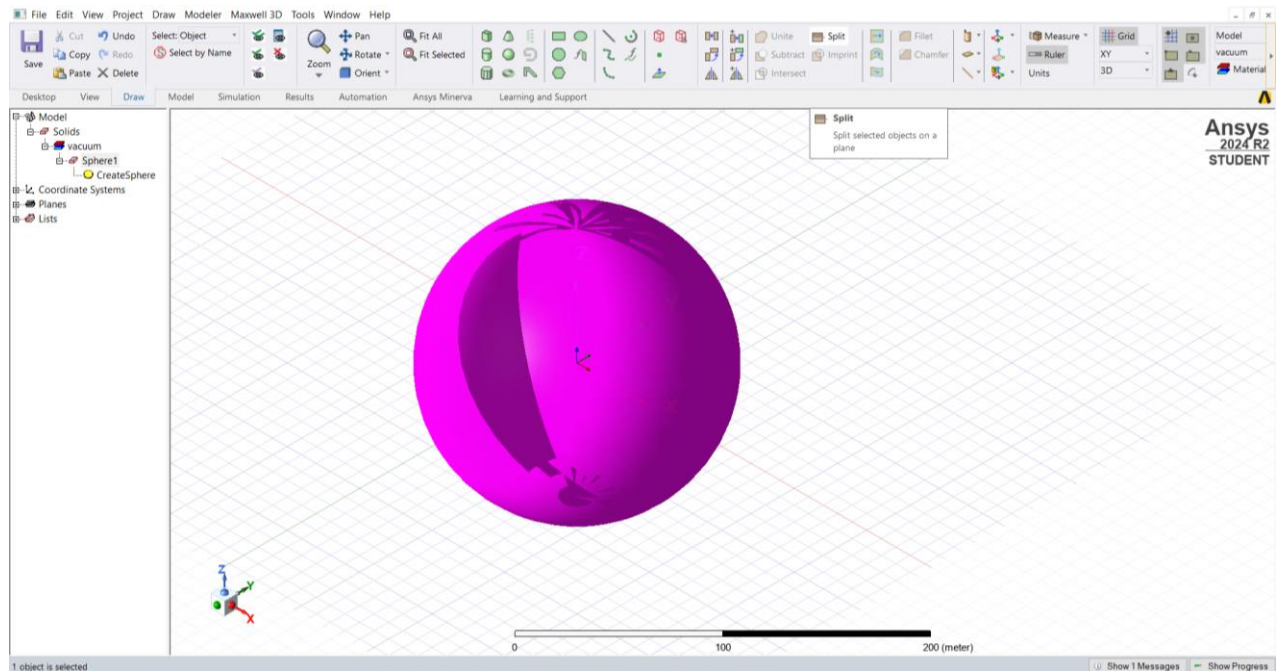


Slika 8.8. Postupak crtanja sfere



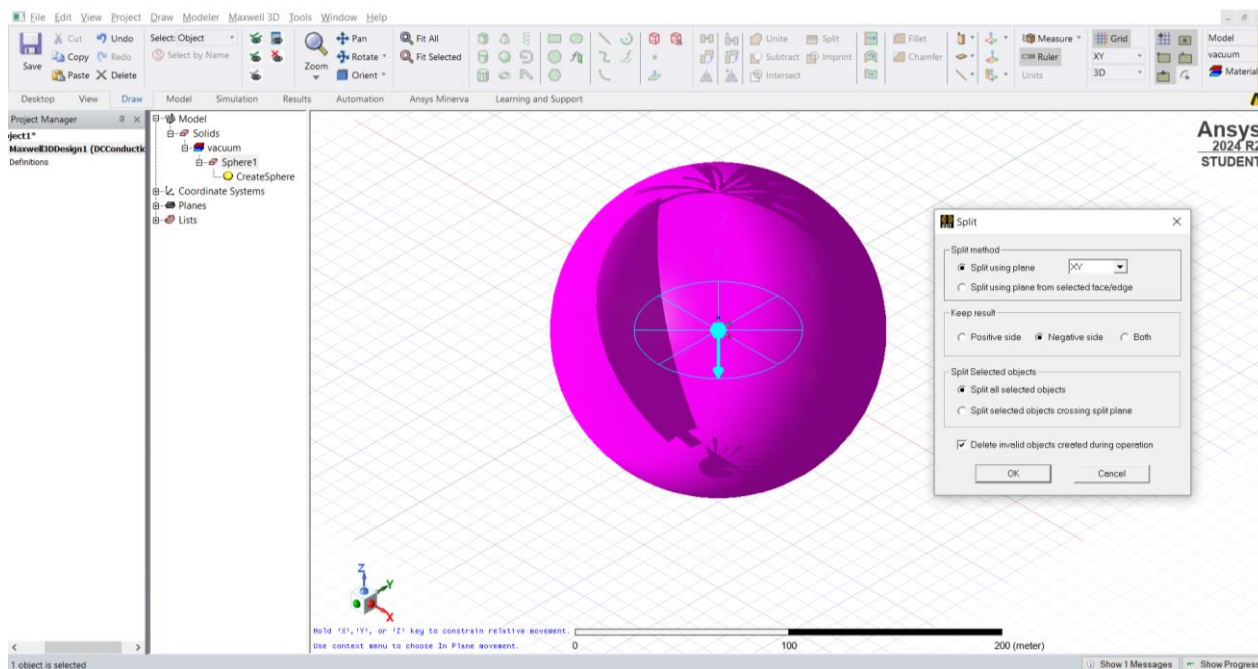


Slika 8.9. Koordinate sfere i radijus

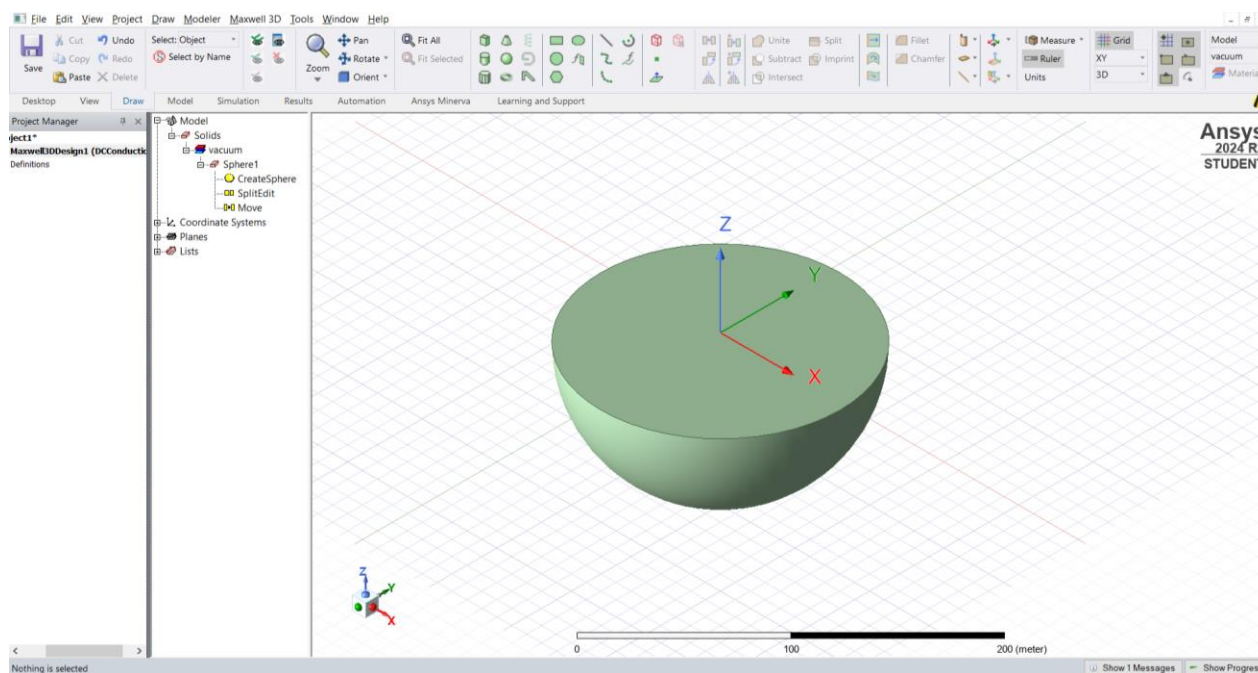


Slika 8.10. Nacrtna sferu

Dobivenu sferu potrebno je prepoloviti prema negativnoj strani. Klikne se na „**SPLIT**“, zatim „**NEGATIVE SIDE**“, postupak se može vidjeti na slici 8.11

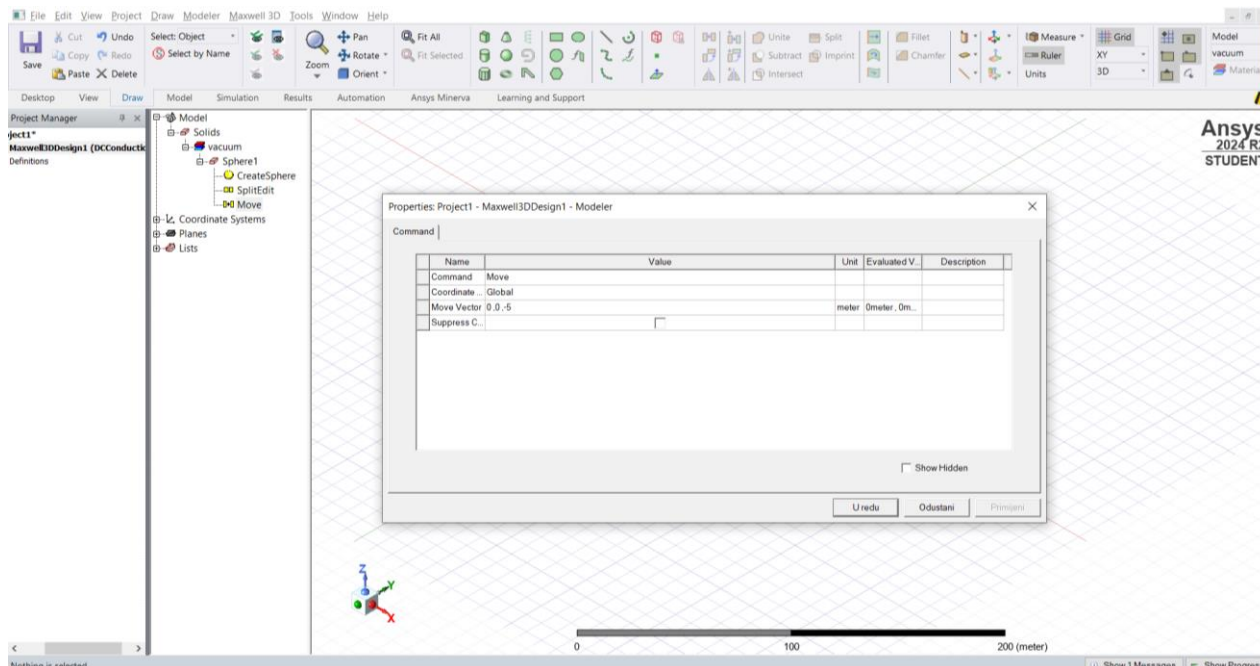


Slika 8.11. Prepolov sfere prema negativnoj strani



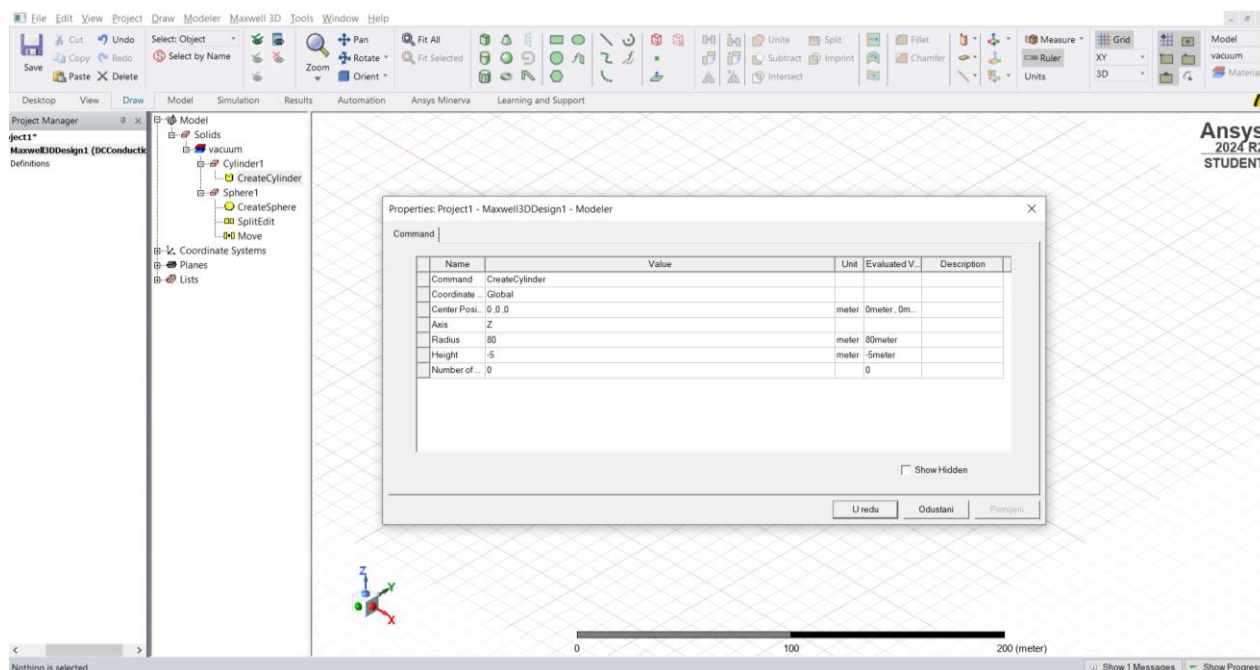
Slika 8.12. Dobivena sfera poslije prepolova

Potrebno je dobivenu sferu pomaknuti naredbom „**MOVE**“, prikazano na slici 8.13.



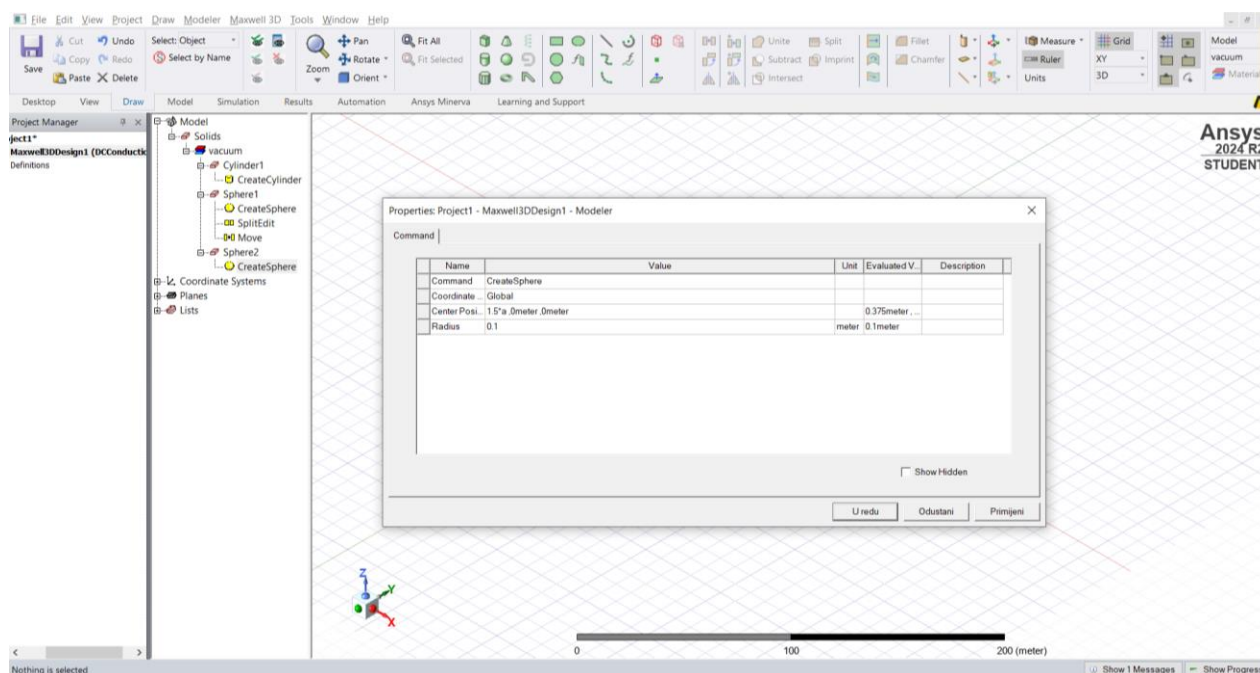
Slika 8.13. Naredba „**MOVE**“

Osim sfere koja predstavlja donji sloj zemlje potrebno je nacrtati i gornji sloj, gornji sloj napraviti će se pomoću crtanja valjka. Stisne se „**DRAW CYLINDER**“, desni klik na „**CREATECYLINDER**“ i kliknuti na „**PROPERTIES**“ te podesiti veličine kao one na slici 8.14.

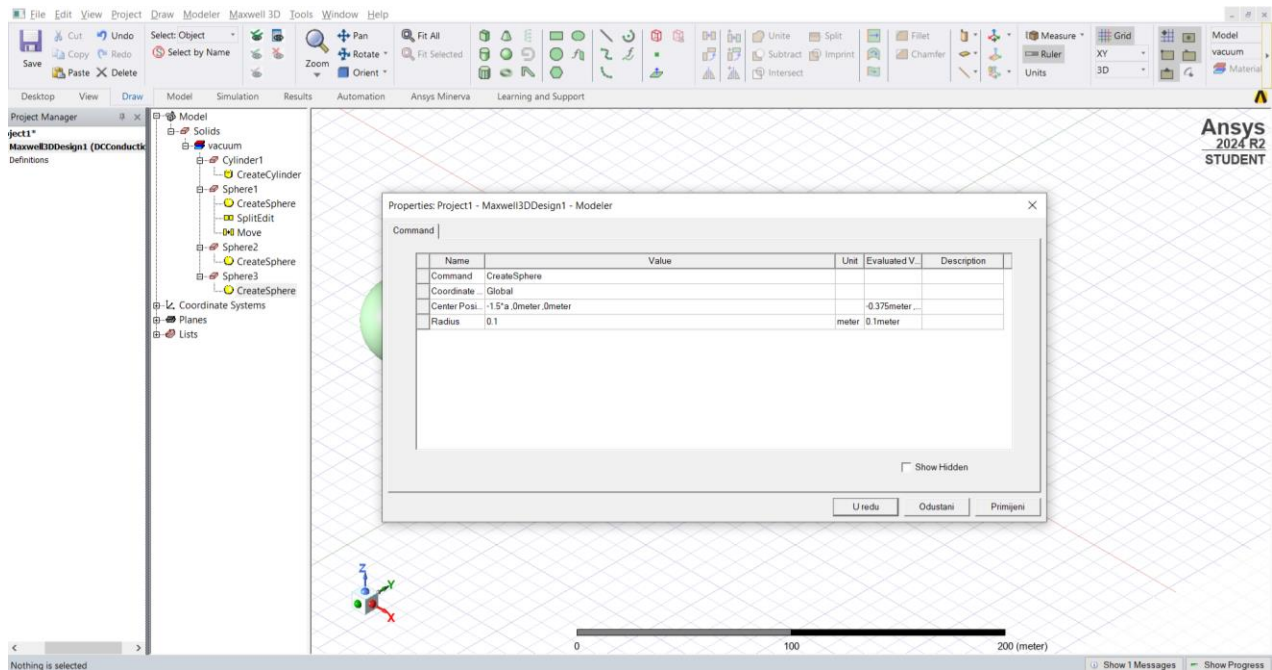


Slika 8.14. Koordinate i veličina valjka

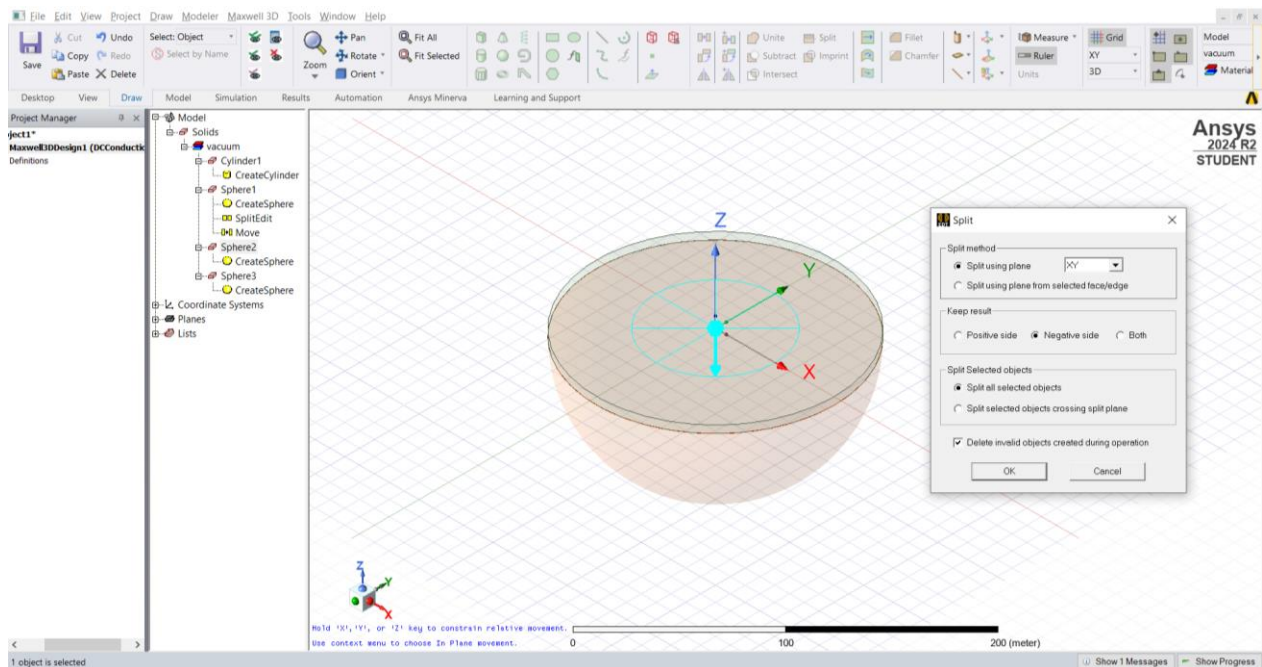
Nakon valjka crtaju se 4 sfere koje će predstavljati elektrode, radijusa 0.1m koje se također kao i originalna sfera moraju prepoloviti po negativnoj strani, pozicije sfera su prikazane slikama 8.15., i 8.16., a na slici 8.17. prepolov prema negativnoj strani. Radi lakšeg prepoznavanja sfere, elektroda i valjka mijenjaju se boje. To će se učini tako što u dvoklikom na sferu, valjak i elektrode promijeni boja. U modelu nisu nacrtane naponske elektrode zbog jednostavnijeg proračuna modela, dakle nacrtane su samo strujne.



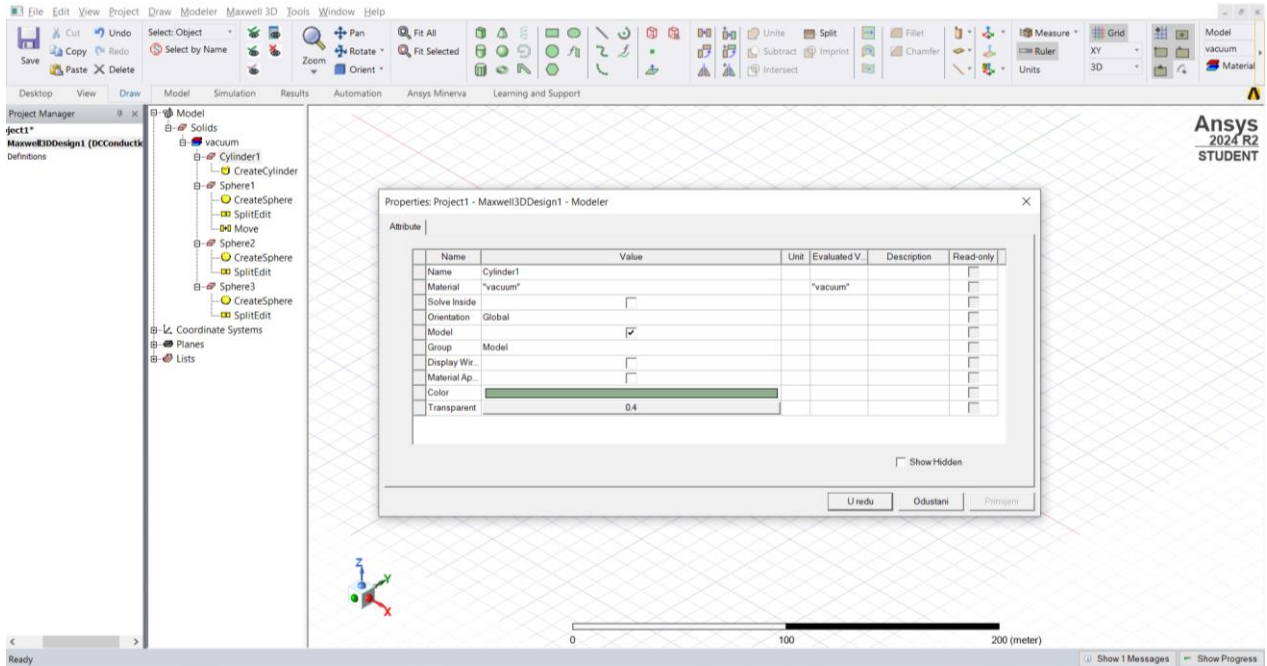
Slika 8.15. Koordinate prve sfere



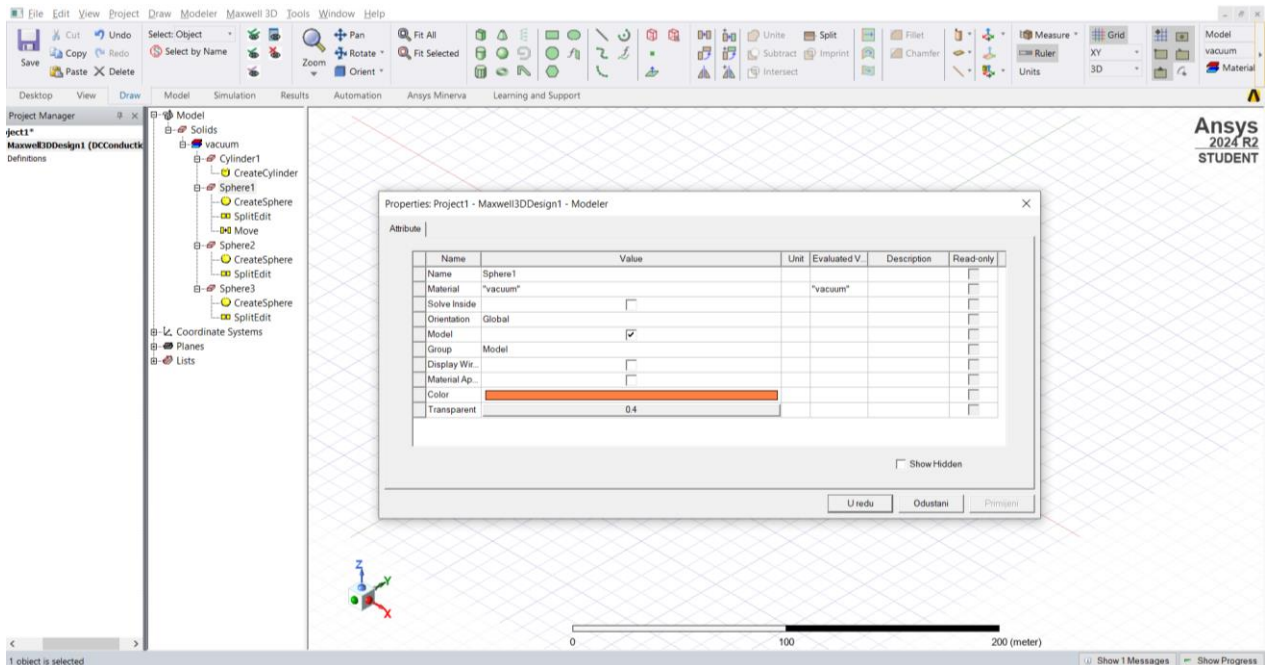
Slika 8.16. Koordinate druge sfere



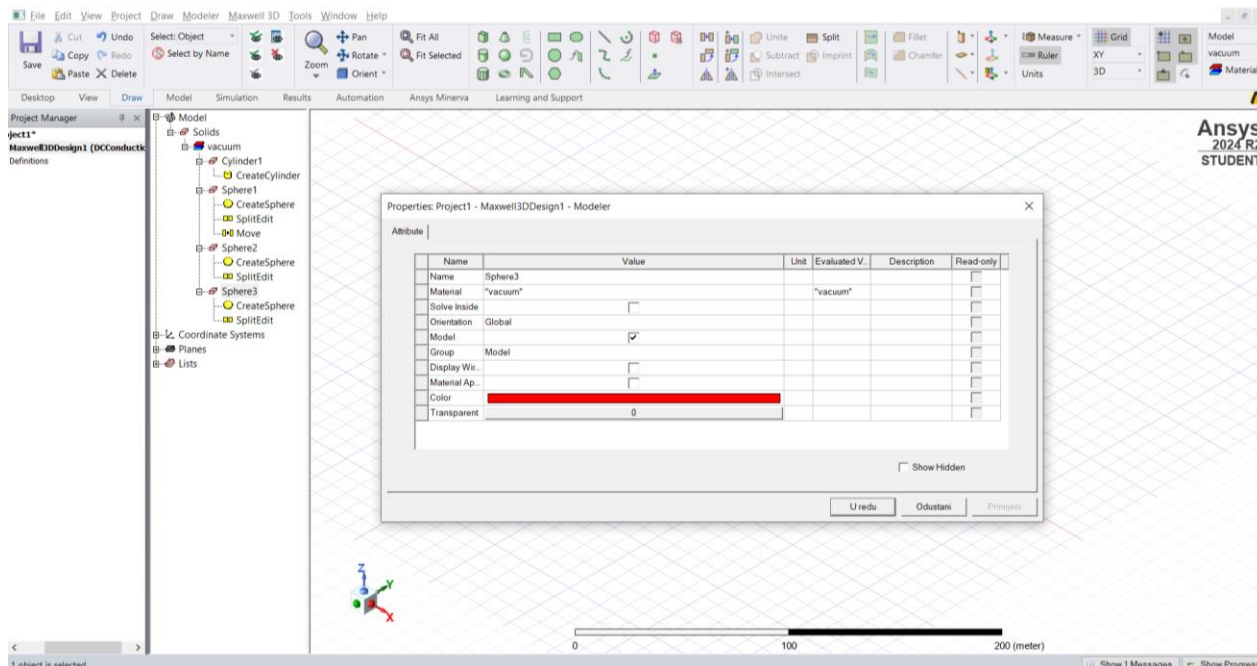
Slika 8.18. Funkcija „SPLIT“ na elektrodama



Slika 8.19. Mijenjanje boja i gustoće valjka

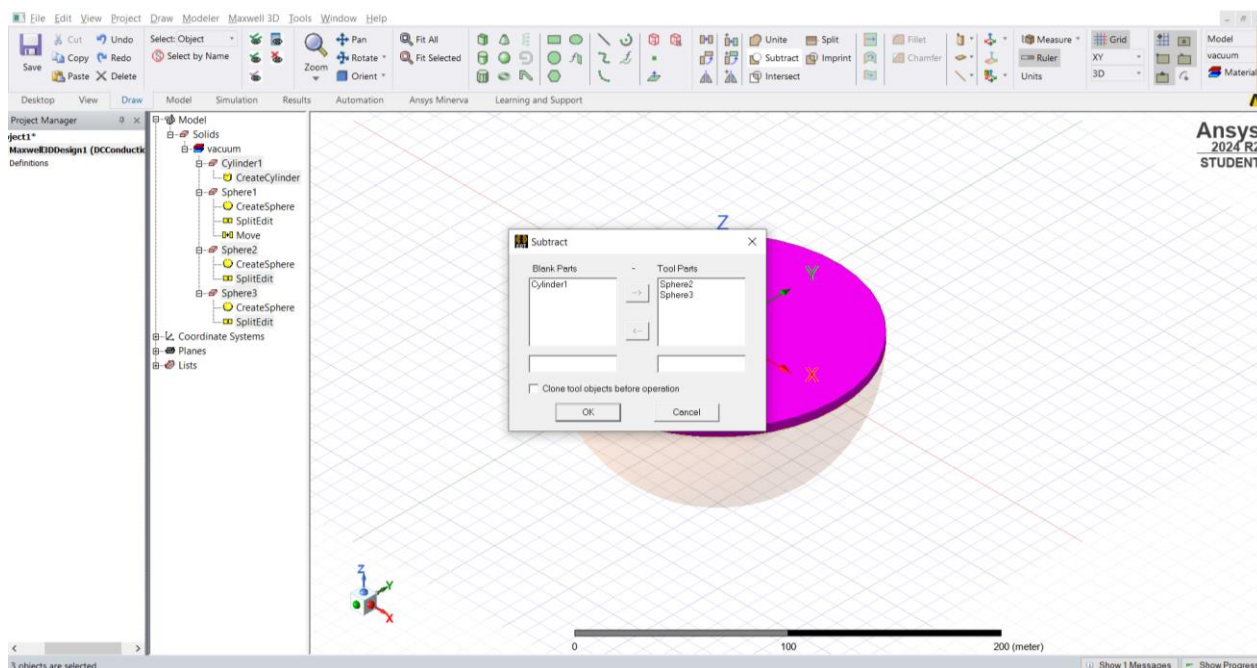


Slika 8.20. Mijenjanje boje polukugle



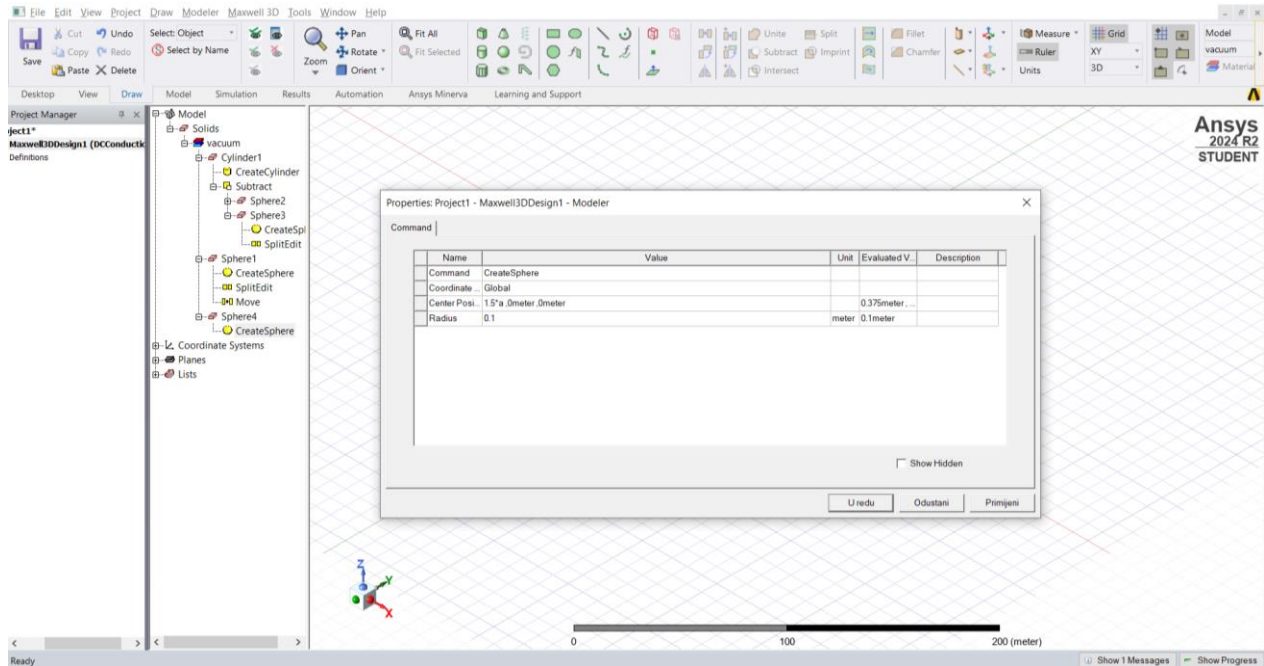
Slika 8.21. Mijenjanje boje elektroda

Kako bi se napravile rupe u gornjem sloju, tj. valjku potrebno je označiti dvije elektrode i valjak te stisnuti „SUBTRACT“, od valjka je potrebno oduzeti elektrode kako bi nastale rupe, prikazano slikom 8.22. s lijeve strane treba biti samo valjak s desne elektrode.

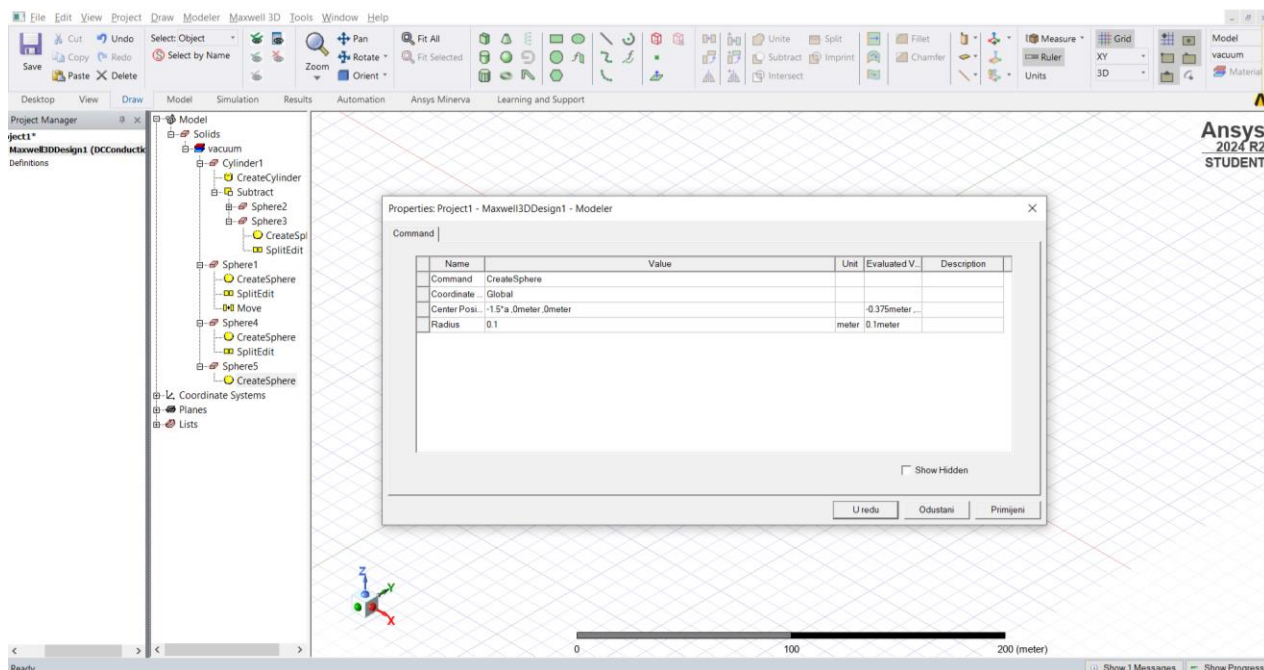


Slika 8.22. Dobivene rupe naredbom „SUBTRACT“

Ponovno se crtaju dvije elektrode prema već zadanim vrijednostima, radijusa 0.1m, zatim se prepolavljaju po negativnoj osi, prikazano na slici 8.25. koordinate su prikazane na slikama 8.23. i 8.24. Za vrijednost varijable  $a$  uzela se vrijednost 0.25 m.

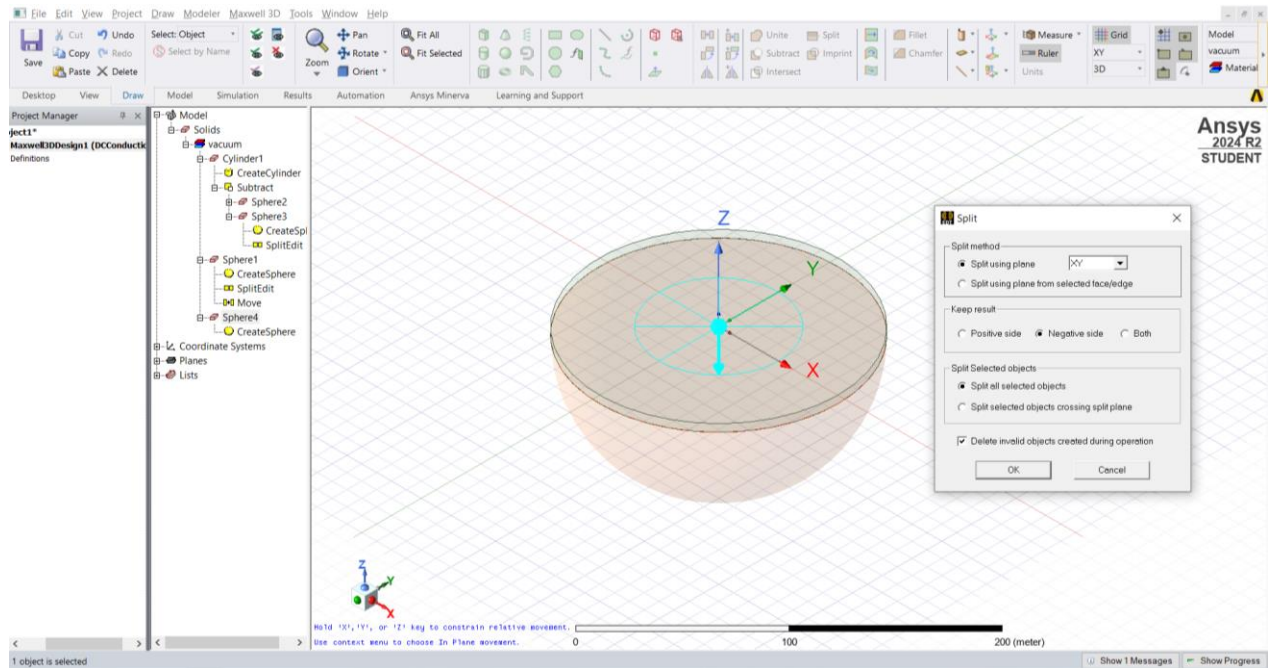


Slika 8.23. Prva elektroda



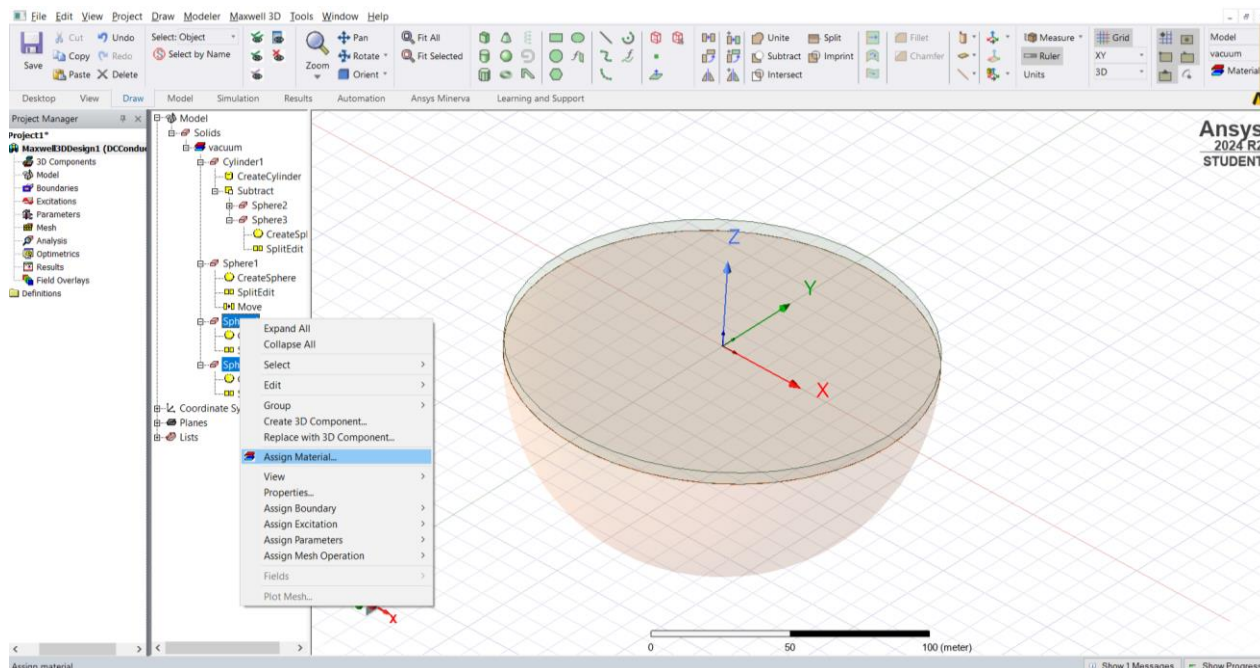
Slika 8.24. Druga elektroda



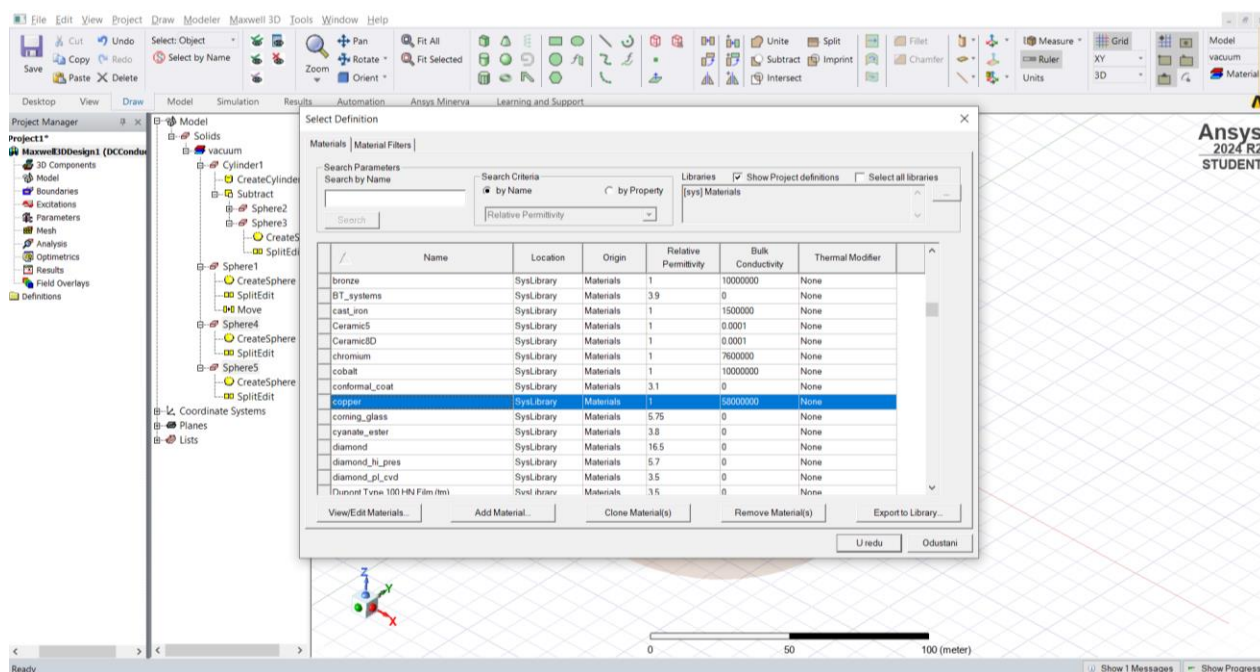


Slika 8.25. Prepolov elektroda

Nakon nacrtanih elektroda, elektrodama se pridružuju svojstva materijala. Označe se elektrode te klikne na „ASSIGN MATERIAL“, prikazano slikom 8.26, zatim se stisne „COPPER“, prikazano slikom 8.27.

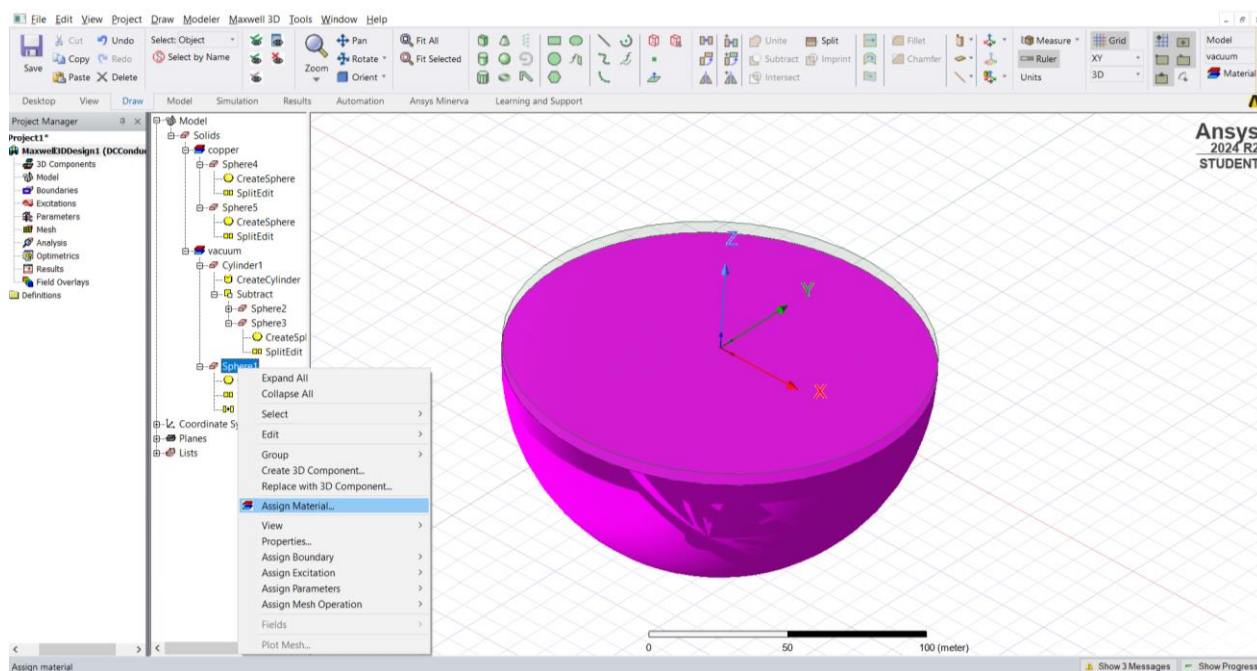


Slika 8.26. Dodavanje materijala elektrodama

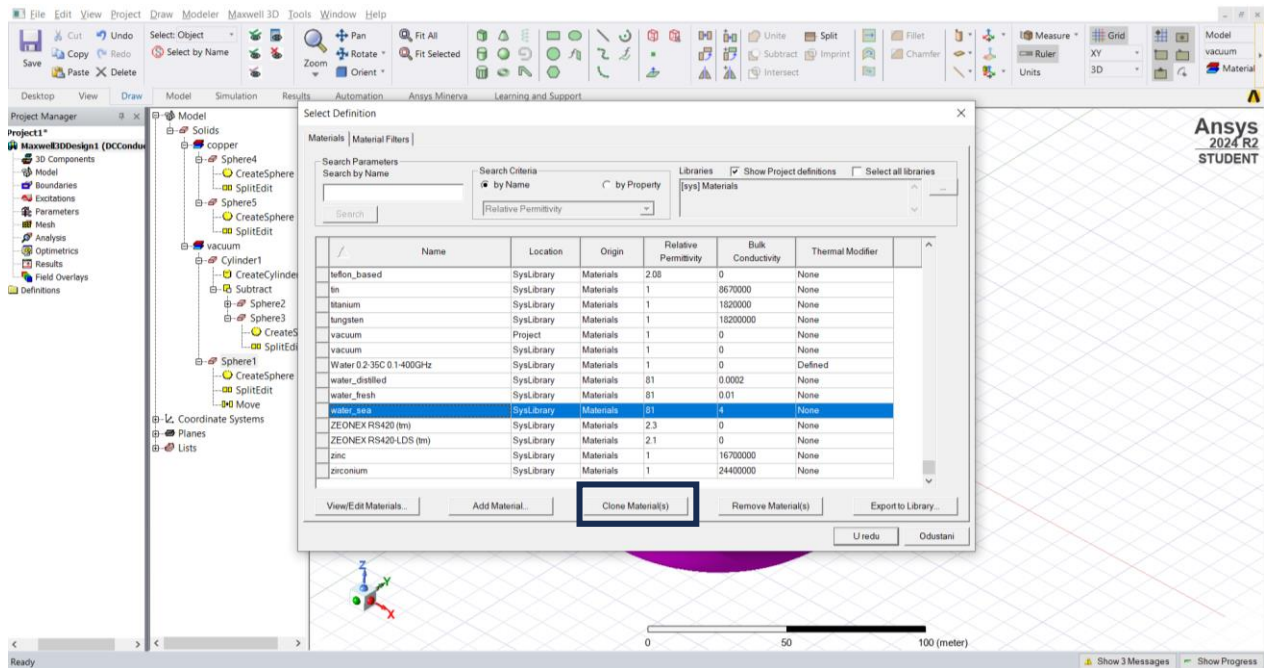


Slika 8.27. Dodjela bakra elektrodama

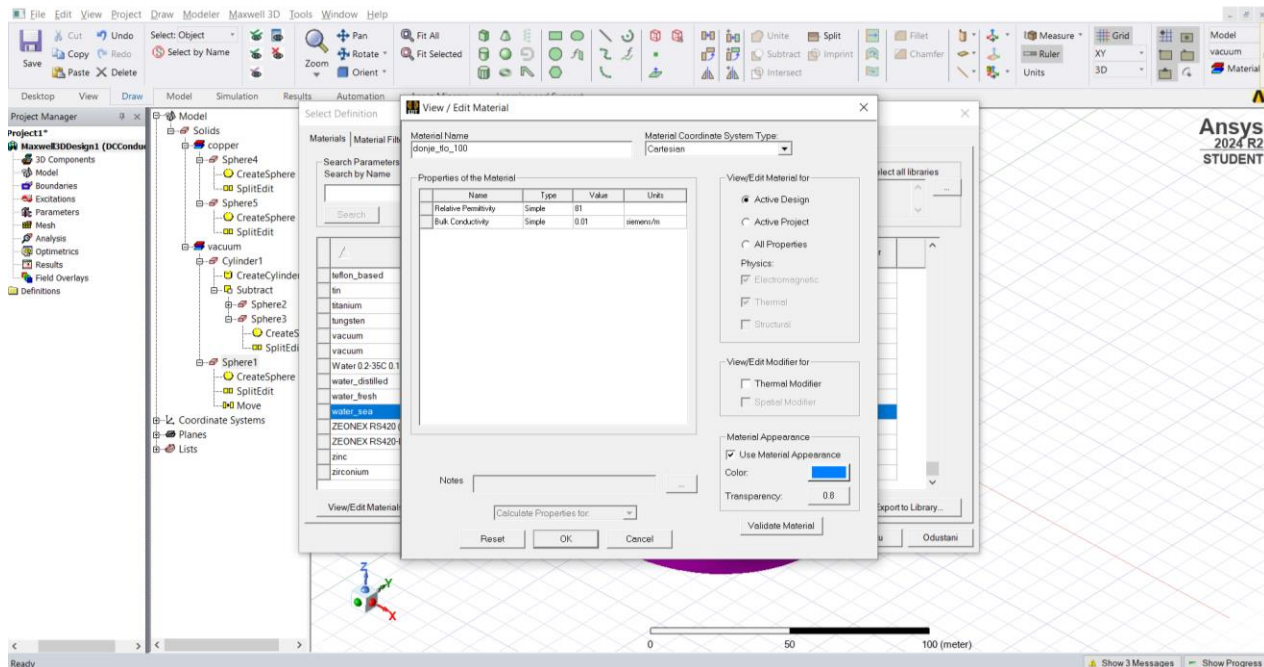
Za sferu se također stisne na sferu i na „**ASSIGN MATERIAL**“. Budući da materijal koji je potreban nema među ponuđenim potrebno ga je napraviti. Nađe se „*water sea*“ materijal stisne se „**CLONE MATERIAL**“ i pod Relative Permittivity i Bulk Conductivity upisuje se: Relative Permittivity=81, Bulk Conductivity=0.01. prikazano na slici 8.30., isti postupak se ponovi za valjak s pripadajućim vrijednostima Permittivity=81, Bulk Conductivity=0.005, prikazano na slici 8.31. Radi jednostavnosti i snalazljivosti imena se mogu promijeniti u gornje tlo i donje tlo.



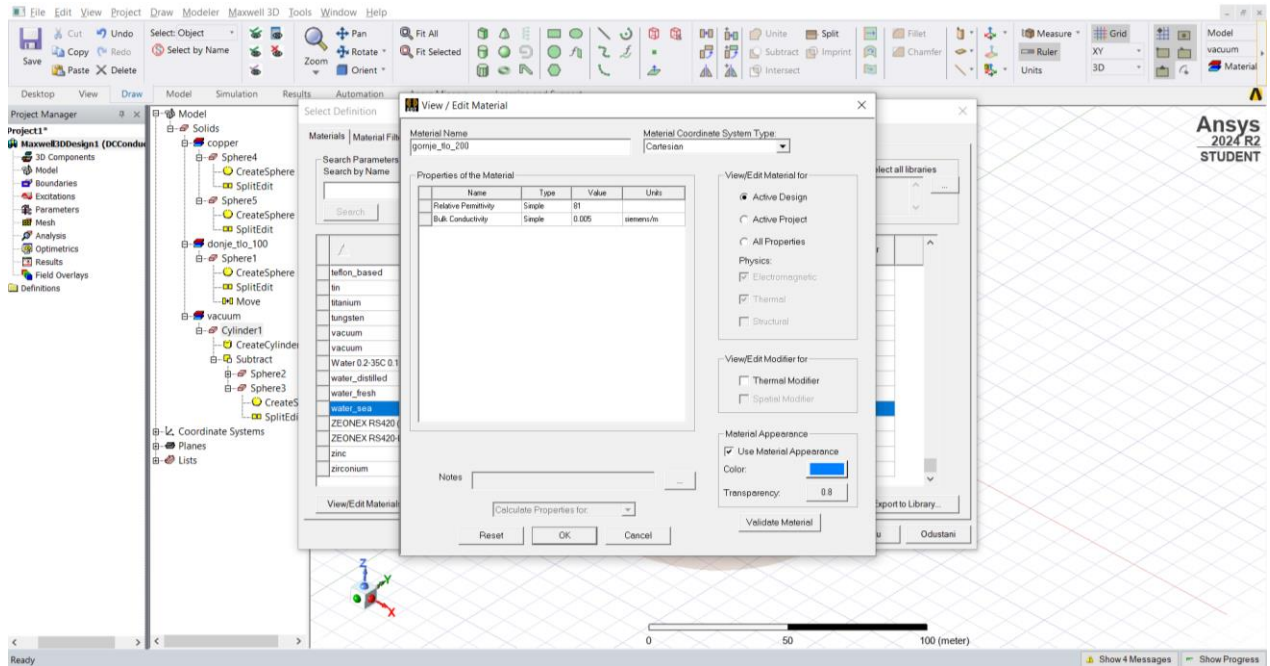
Slika 8.28. Dodjeljivanje materijala sferi



Slika 8.29. Kako napraviti novi materijal

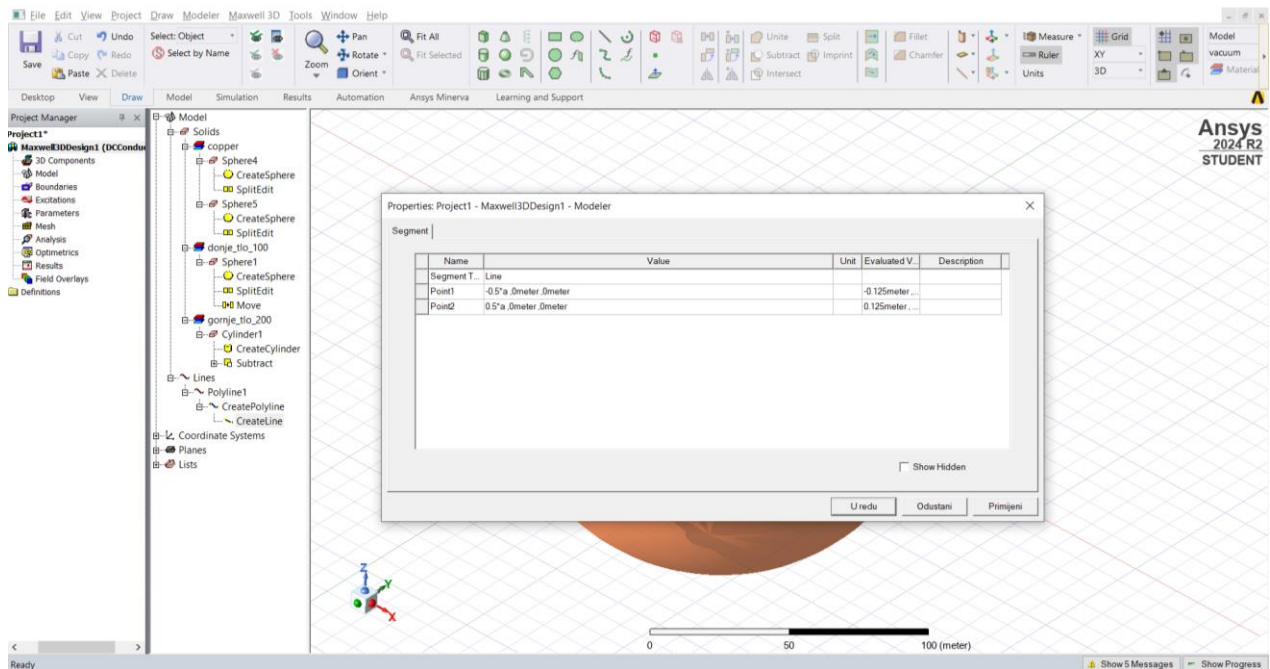


Slika 8.30. Vrijednosti donjeg tla



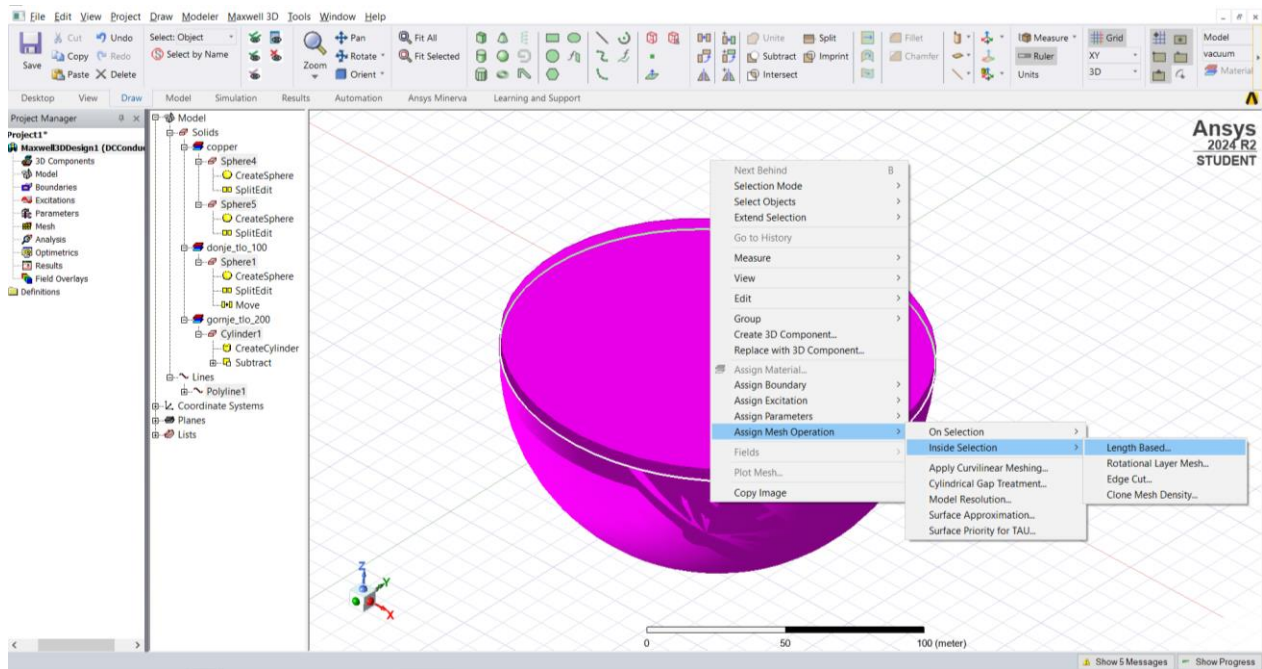
Slika 8.31. Vrijednosti gornjeg tla

Iduće što je potrebno je nacrtati liniju između naponskih elektroda, prikazano njegove koordinate prikazane su slikom 8.32.

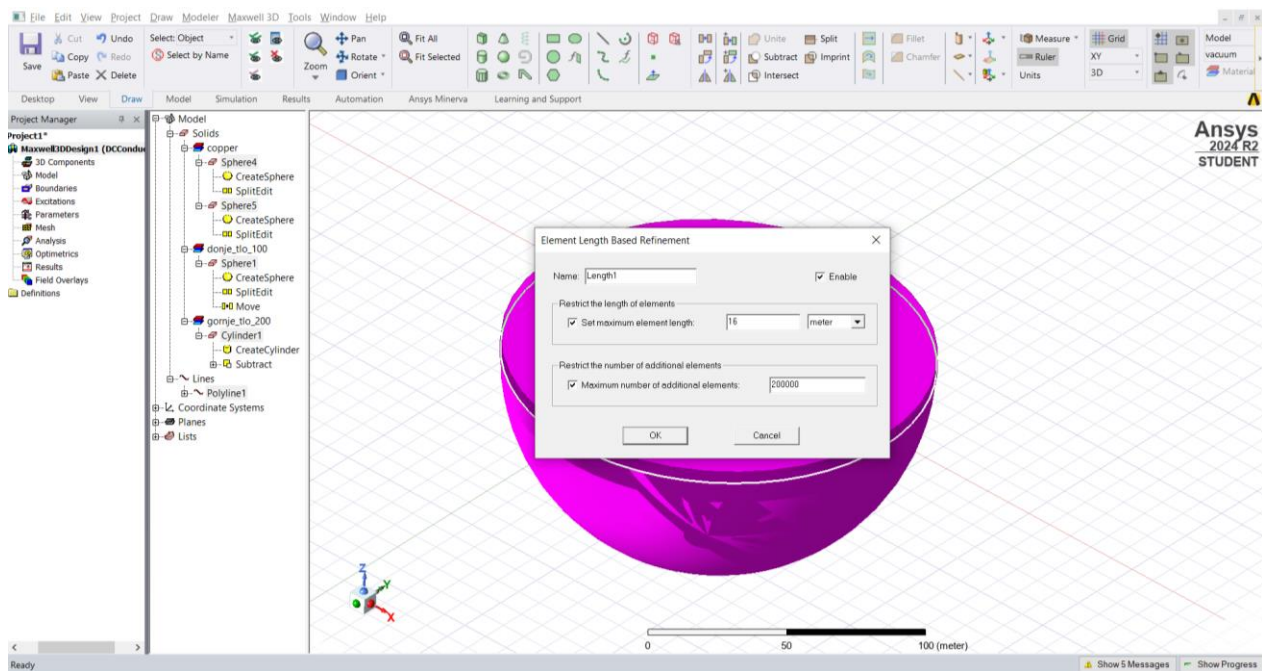


Slika 8.32. Koordinate „POLYLINE“ funkcije

Sada je potrebno za sve nacrtane objekte odabrati funkciju „MESH“, to se napravi tako da se stisne „LENGHT“ kada se odaberu svi objekti, prikazano slikama, 8.34. i 8.35.

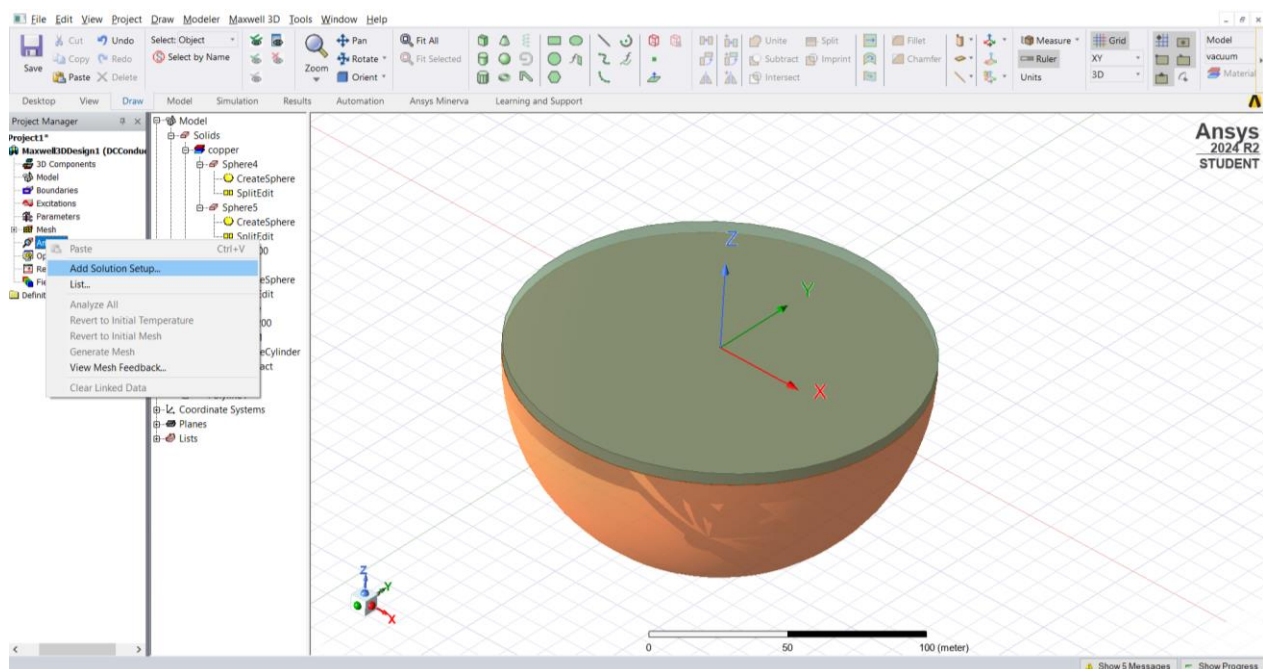


Slika 8.34. Odabir MESH-a

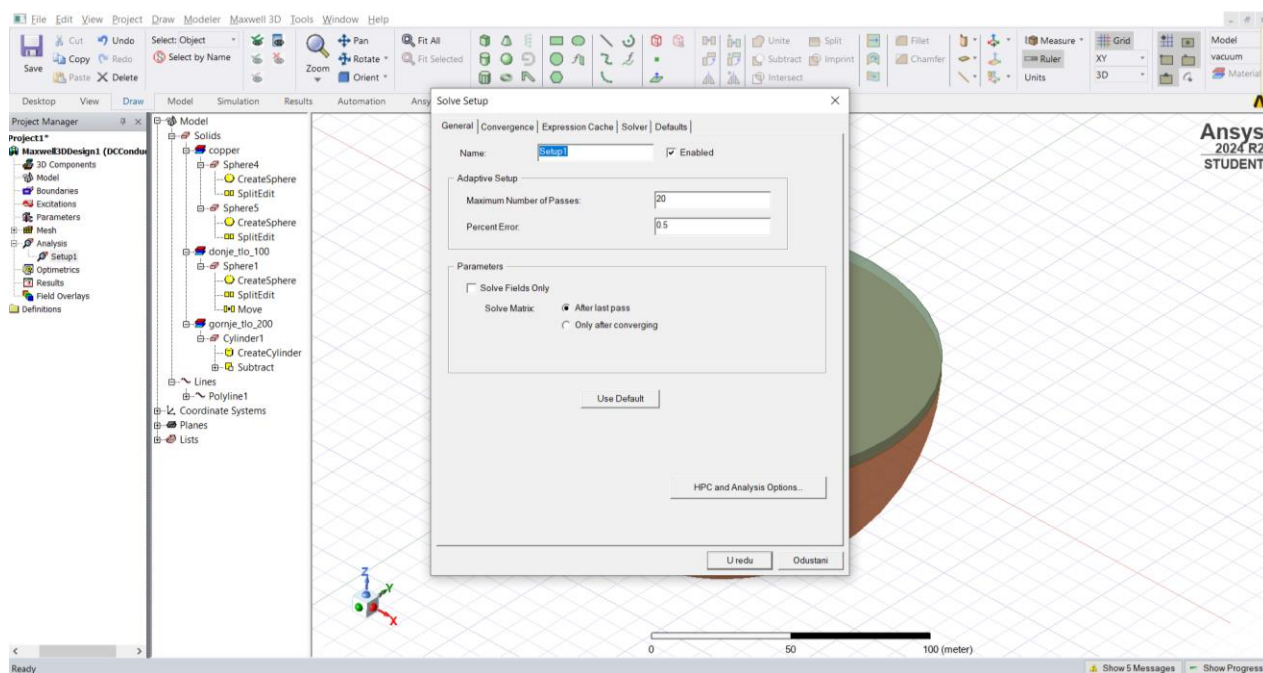


Slika 8.35. Vrijednosti MESH-a

Nakon toga potrebno je postaviti „**SETUP**“, klikne se na „**ANALYSIS**“, zatim „**ADD SOLUTION SETUP**“, postavljene vrijednosti su kao sa slike 8.36. i slike 8.37

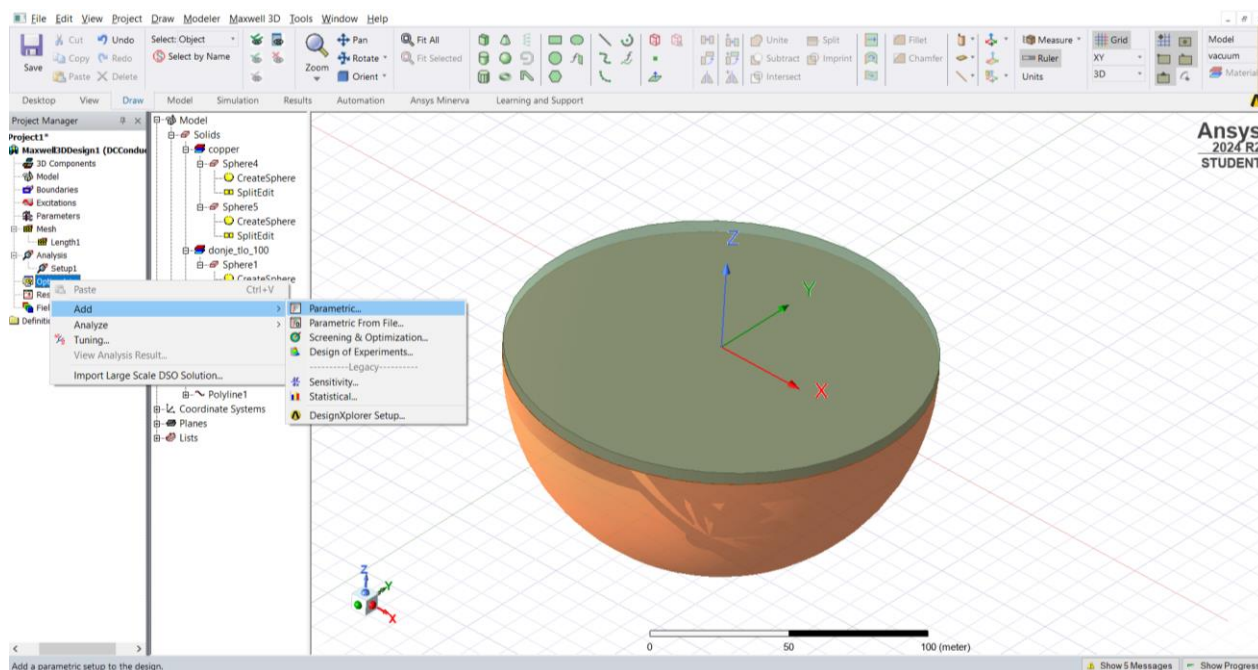


Slika 8.36. Dolazak do **SETUP**-a

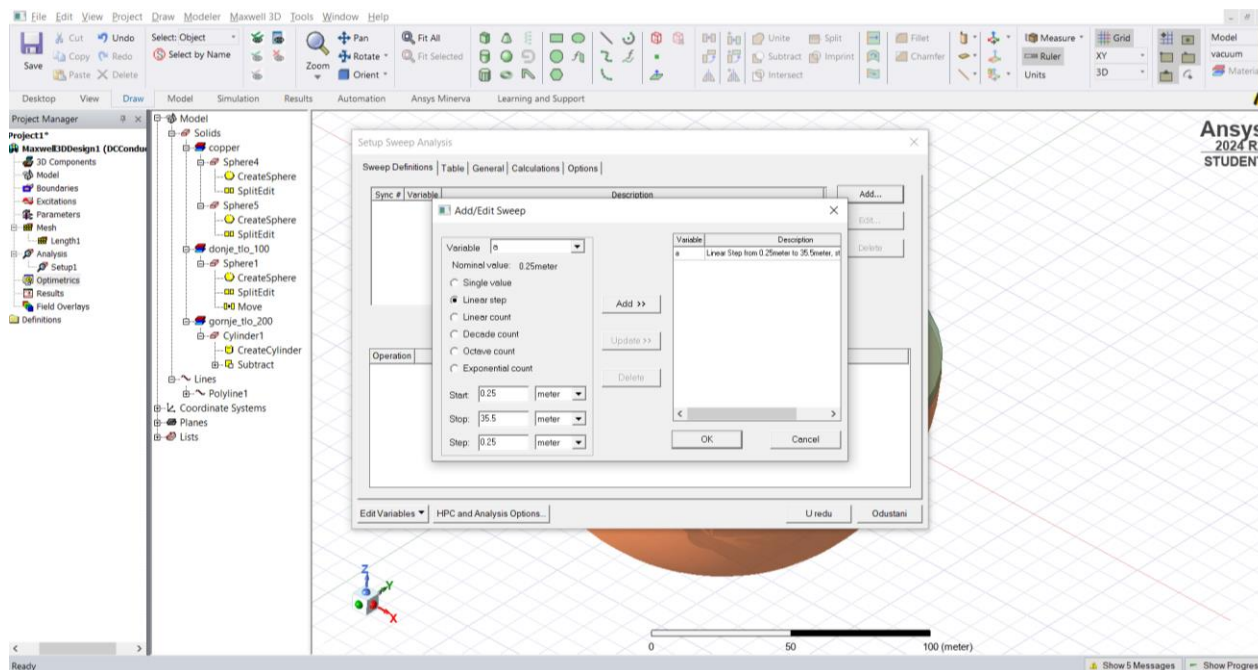


Slika 8.37. Vrijednosti funkcije „**SETUP**“

Slika 8.38. prikazuje dodavanje vrijednosti  $a$ . Kliknuti desni klik „OPTIMETRIC“, „ADD“, „PARAMETRIC“, vrijednost  $a$  dodaje se na sljedeći način stisne se „ADD“ i pod start=0.25 m, stop=35.5 m, step=0.5 m., prikazano slikom 8.39. i na kraju je potrebno u pod „OPTIONS“ staviti kvačicu na „SAVE FIELDS AND MESH“, prikazano slikom 8.40.

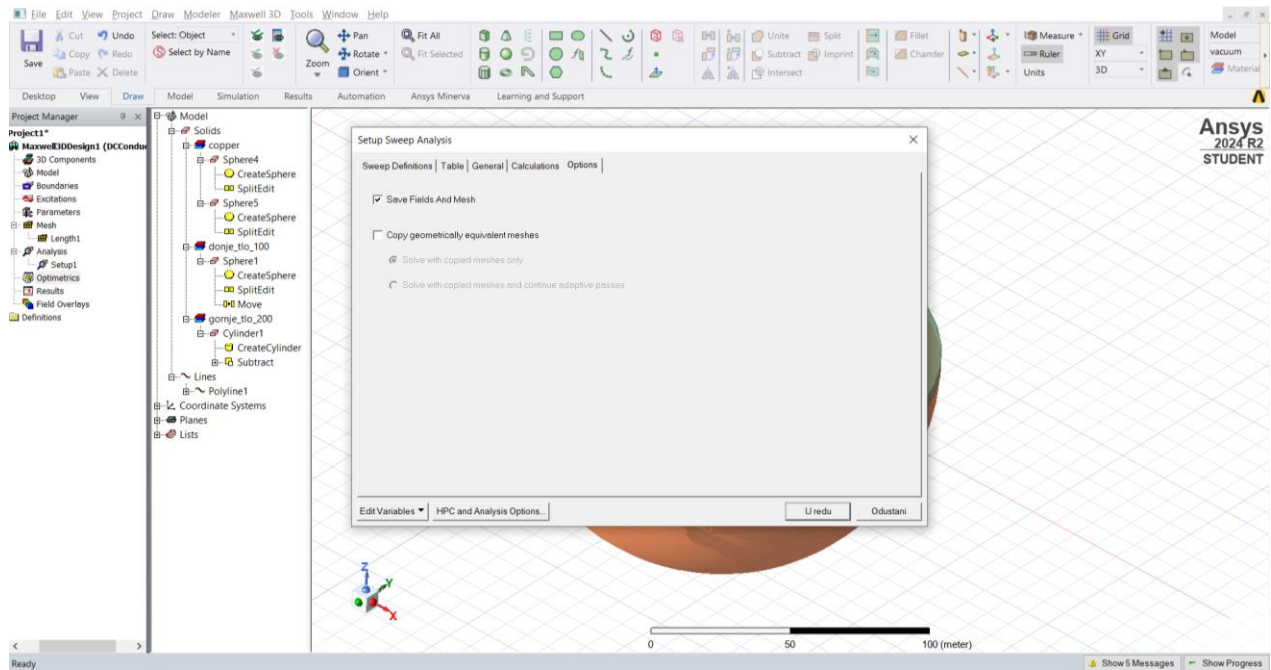


Slika 8.38. „PARAMETRIC“ funkcija

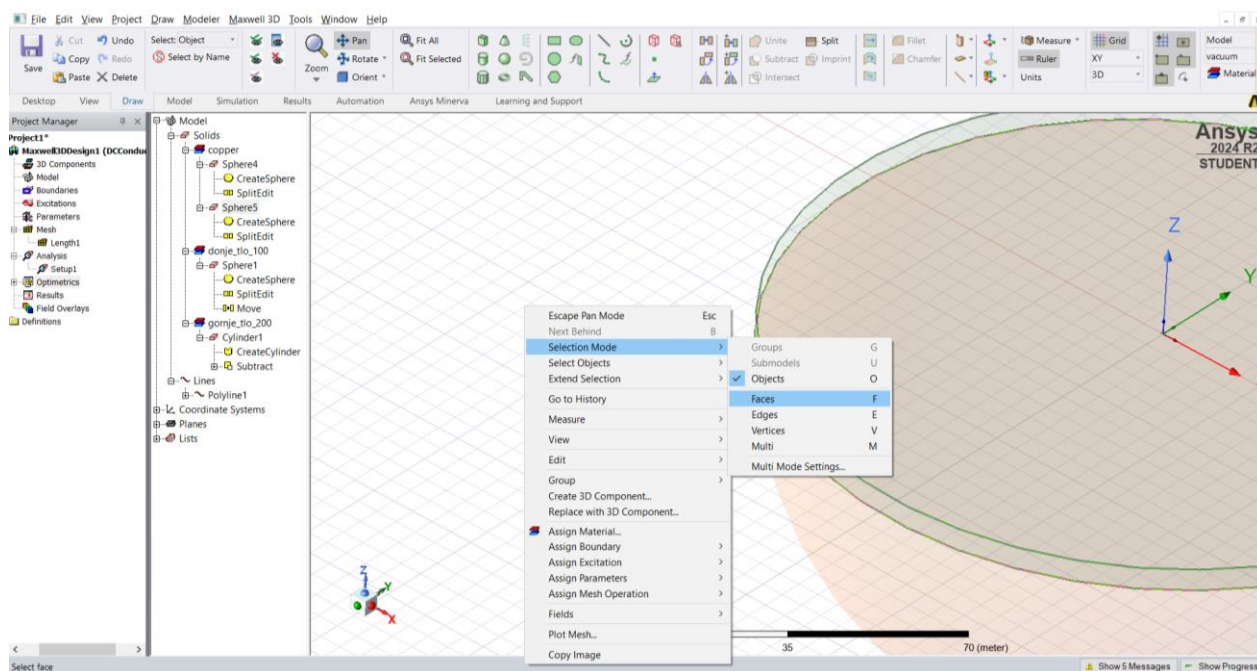


Slika 8.39. Podešavanje vrijednosti  $a$

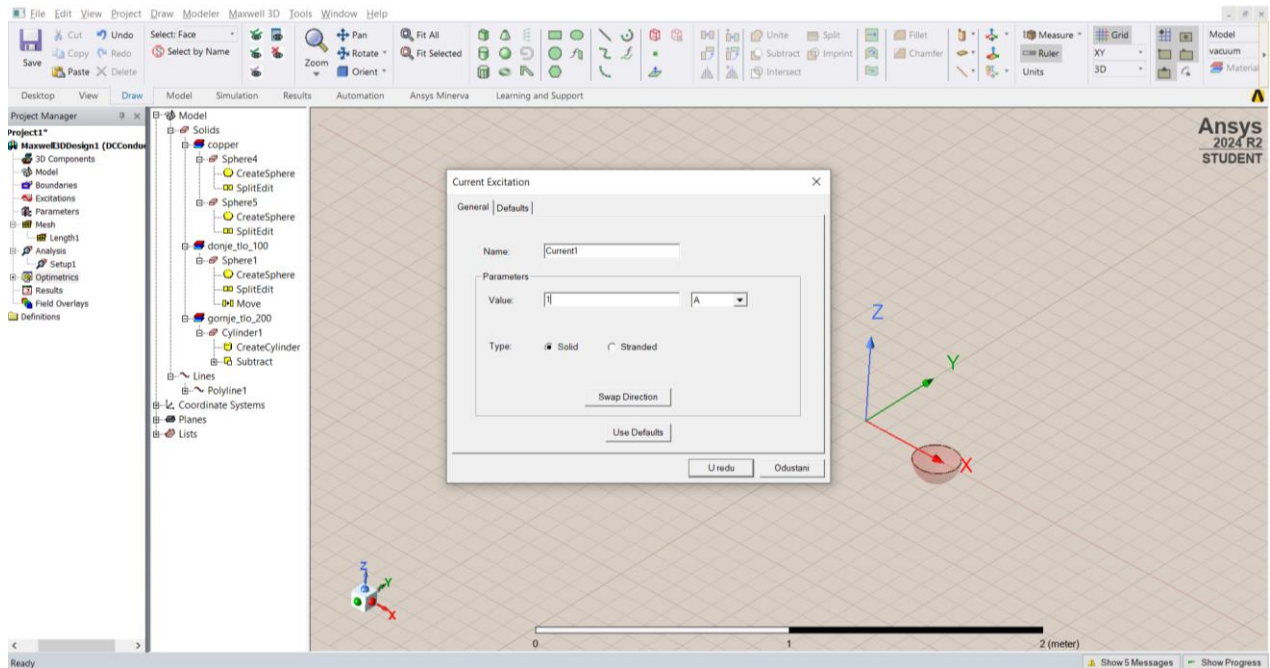


Slika 8.40. Spremanje varijable  $a$

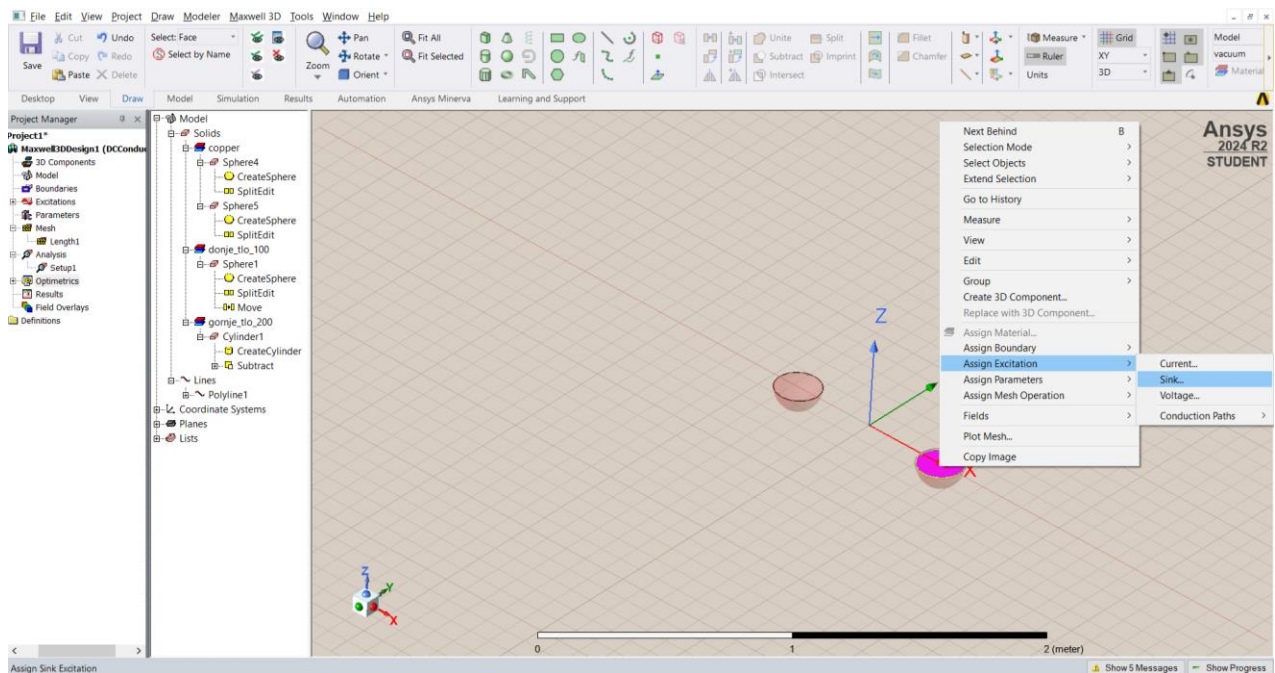
U sljedećem koraku potrebno je dodati struju na krajnje elektrode, potrebno je kliknuti „**DESNI KLIK MIŠA**“ van nacrtanog dijela i stisnuti „**FACES**“, slika 8.41. Nakon toga dodaje se struja na elektrode, struja iznosi 1A. klikne se na prvu elektrodu „**ASSIGN EXCITATION CURRENT**“, prikazano na slikama 8.42. i 8.43., za drugu elektrodu (krajnja desna) „**ASSIGN EXCITATION SINK**“, prikazano na slici 8.44.



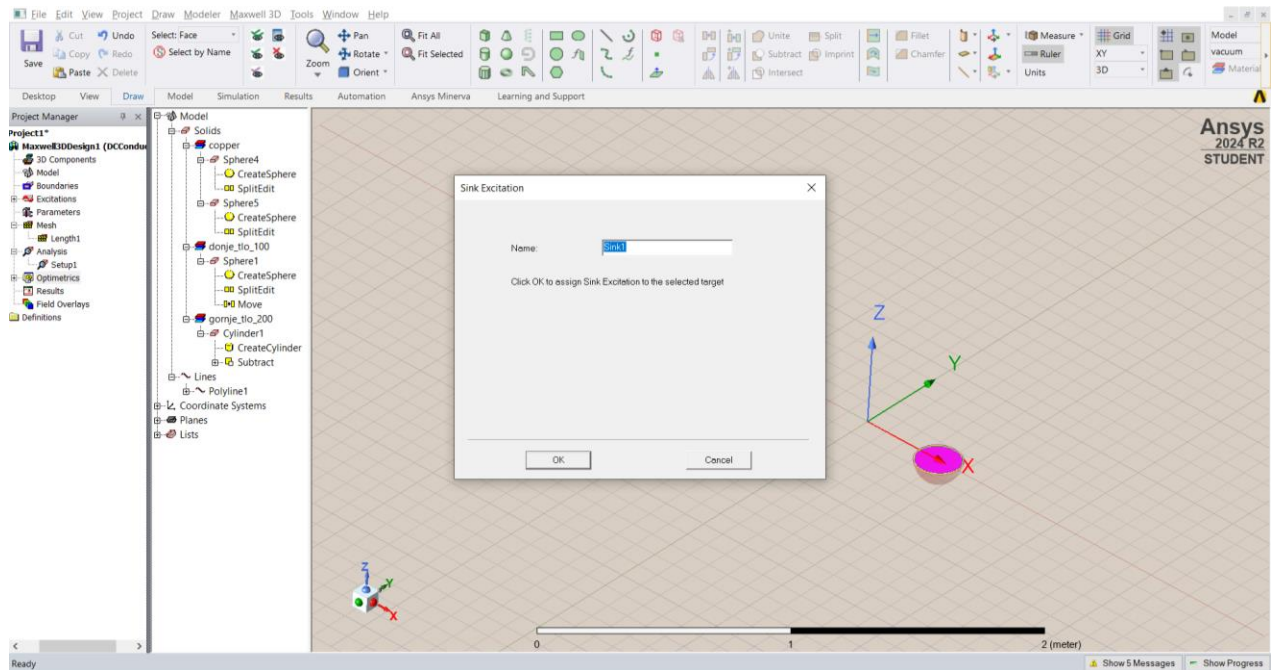
Slika 8.41. Korak prije dodavanja struja na elektrode



Slika 8.42. Vrijednosti struje



Slika 8.43. Dodavanje sink-funkcije

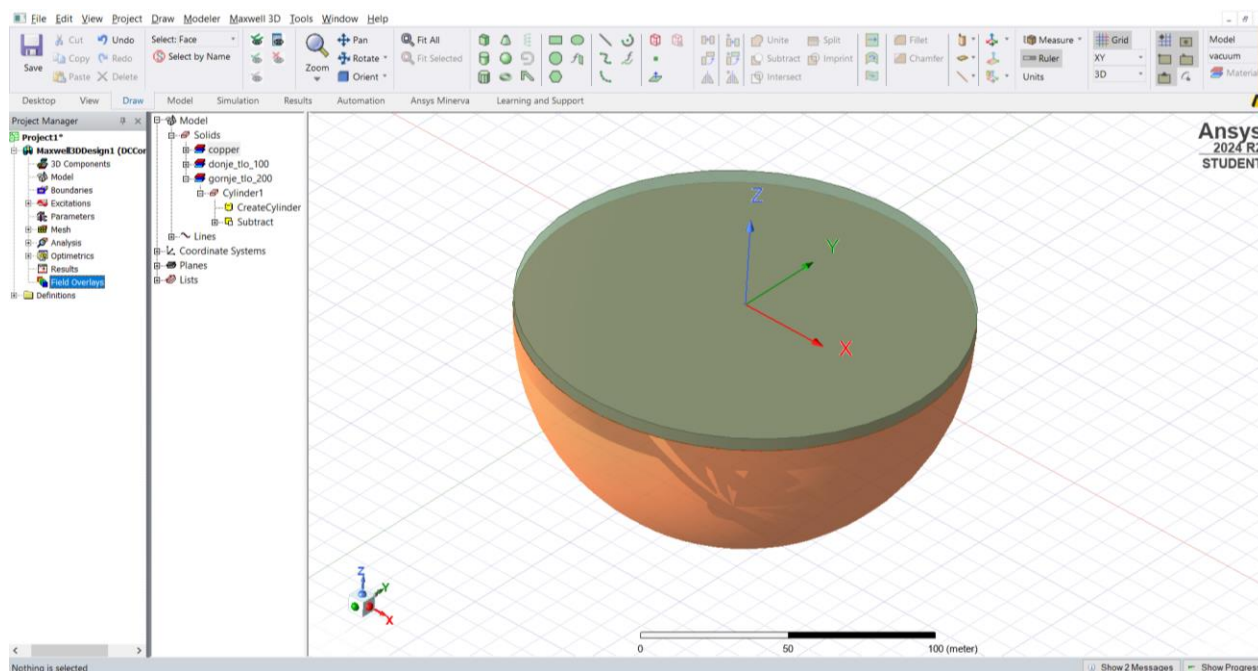


Slika 8.44. Sink-funkcija

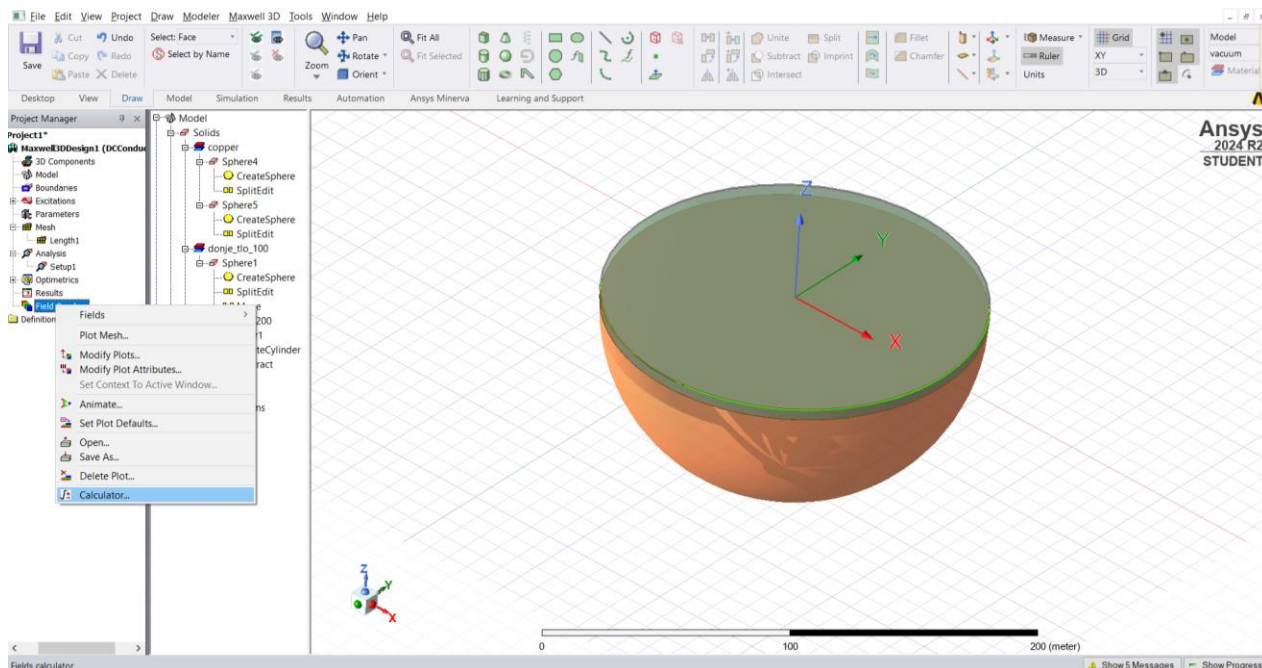
Slika 8.45. pokazuje kako doći do naredbe „**CALCULATOR**“, a slika 8.46. prikazuje kako dodati formule dodavanje vrijednosti napona koji je na „**POLYLINE**“ (U) i dodavanje specifičnog otpora (Ro)

$$U = - \int \vec{E} d\vec{l} \quad (8-1)$$

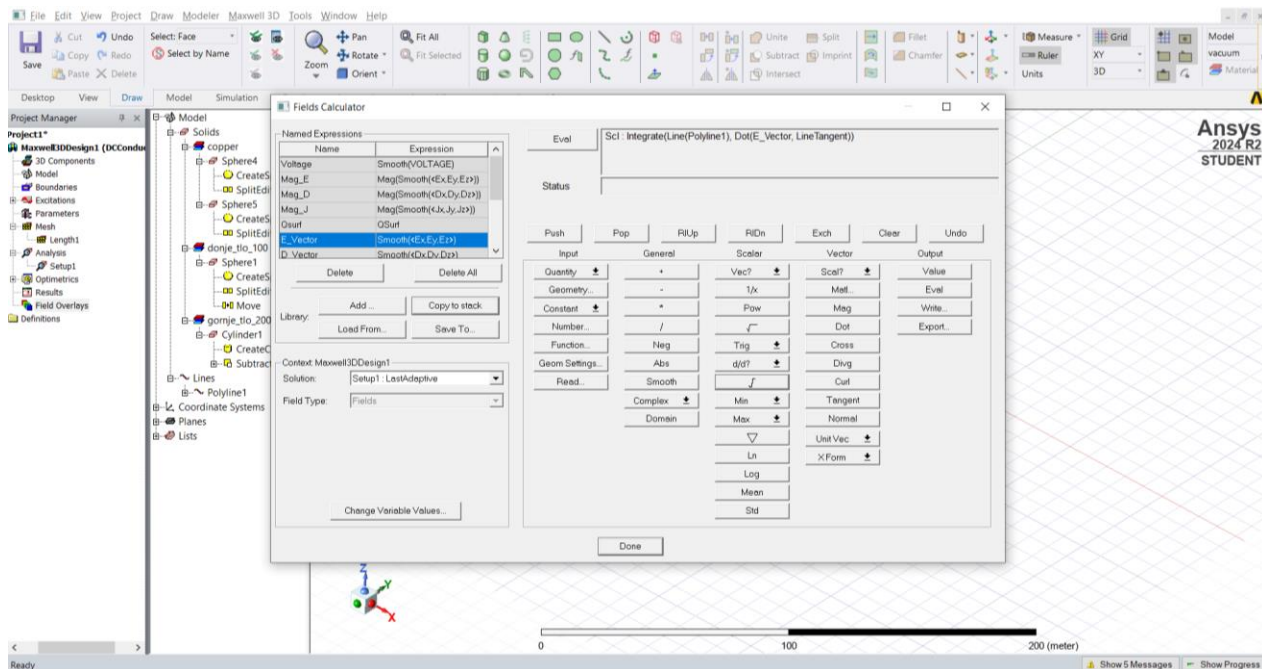
$$\rho = 2 \cdot a \cdot \pi \cdot \frac{U}{l} \quad (8-2)$$



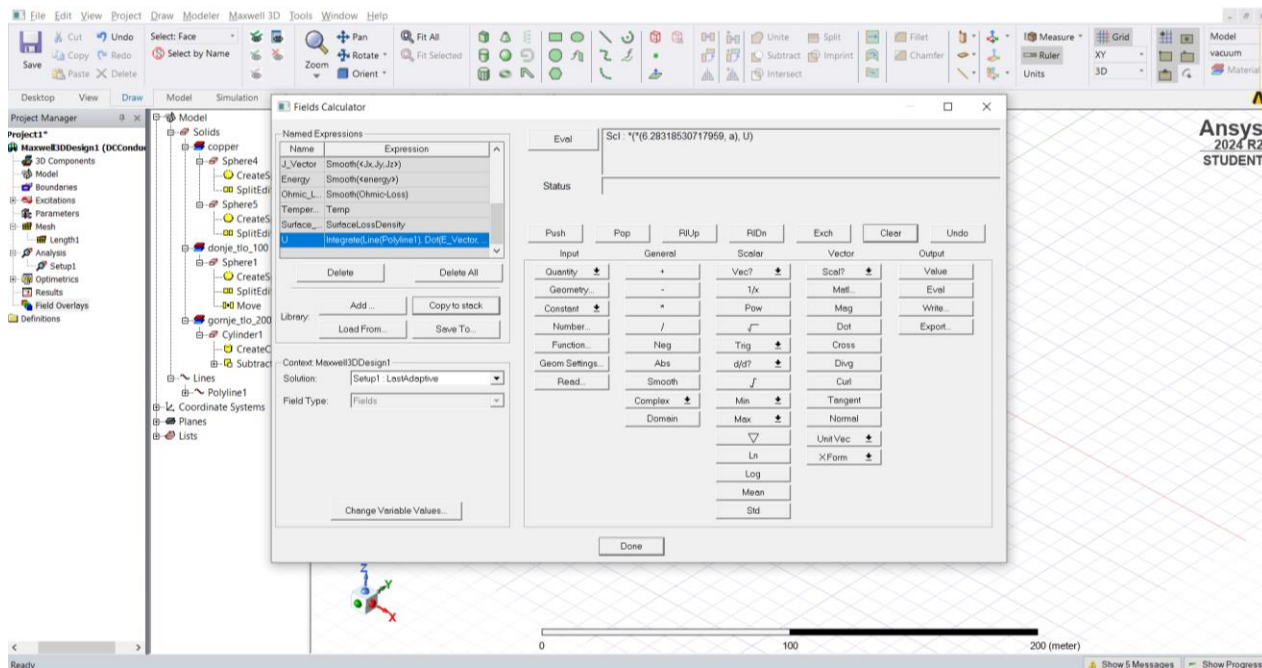
Slika 8.45. Naredba „**CALCULATOR**“



Slika 8.46. Dodavanje vrijednosti napona koji je na „POLYLINE“

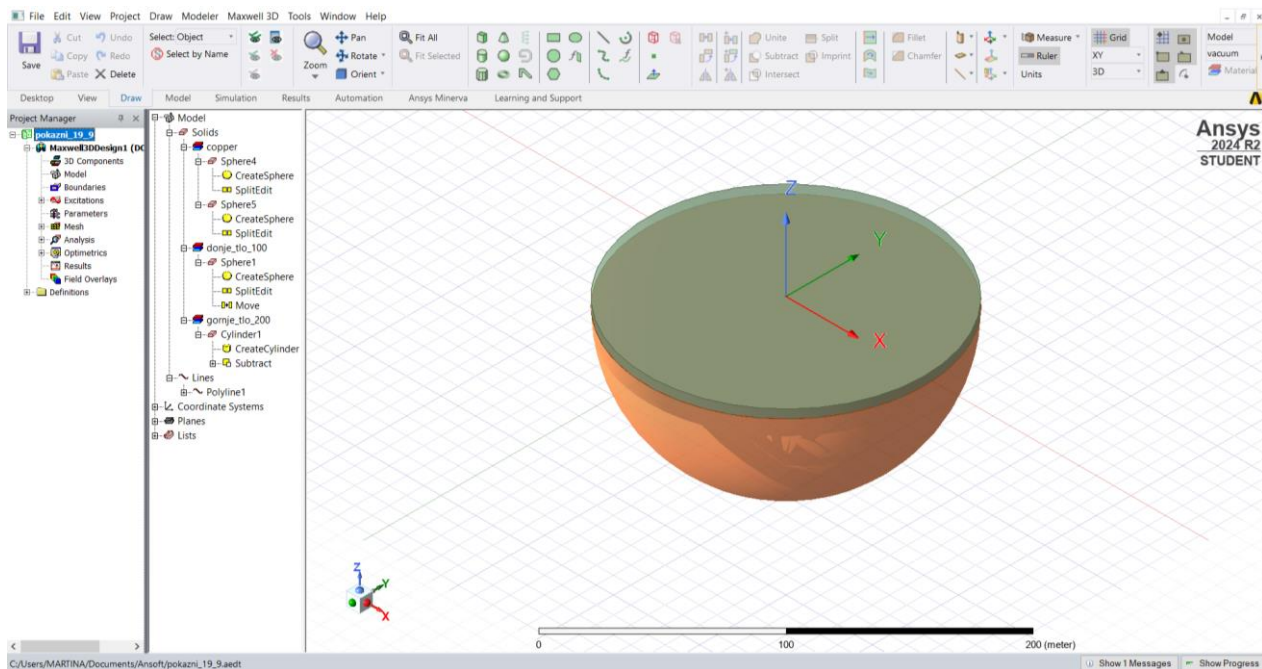


Slika 8.47. Formula za U



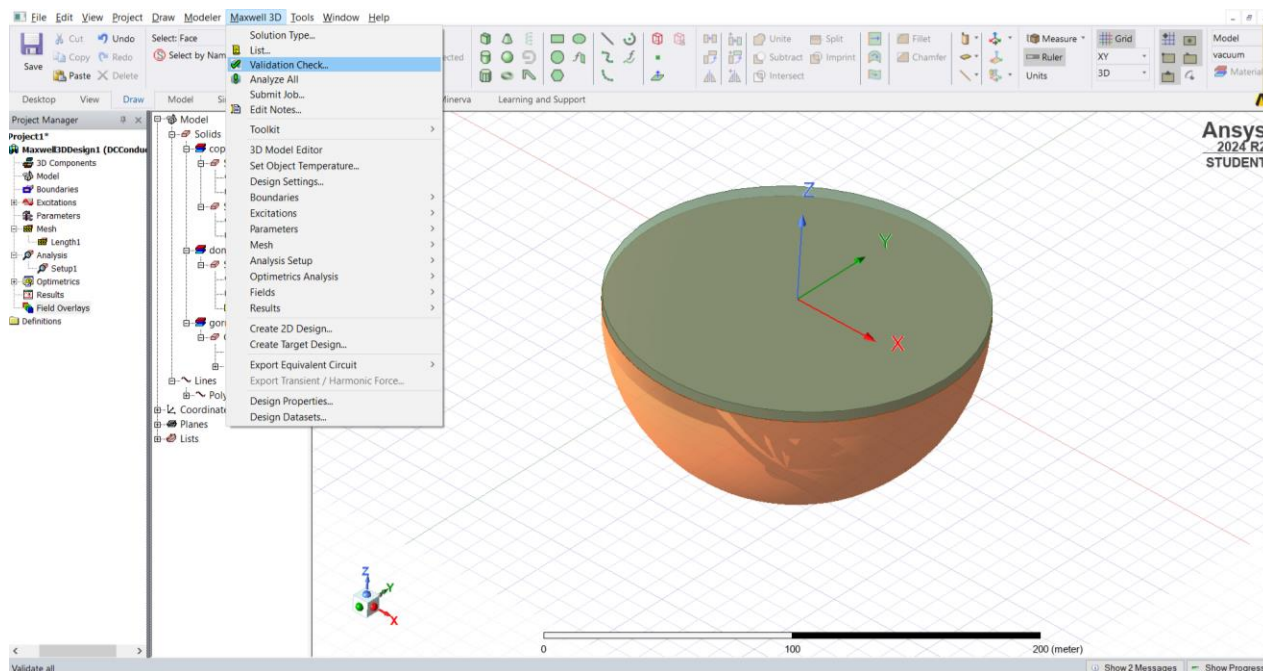
Slika 8.48. Formula za Ro

Na slici 8.49. prikazan je gotov model cilindra i polukugle.

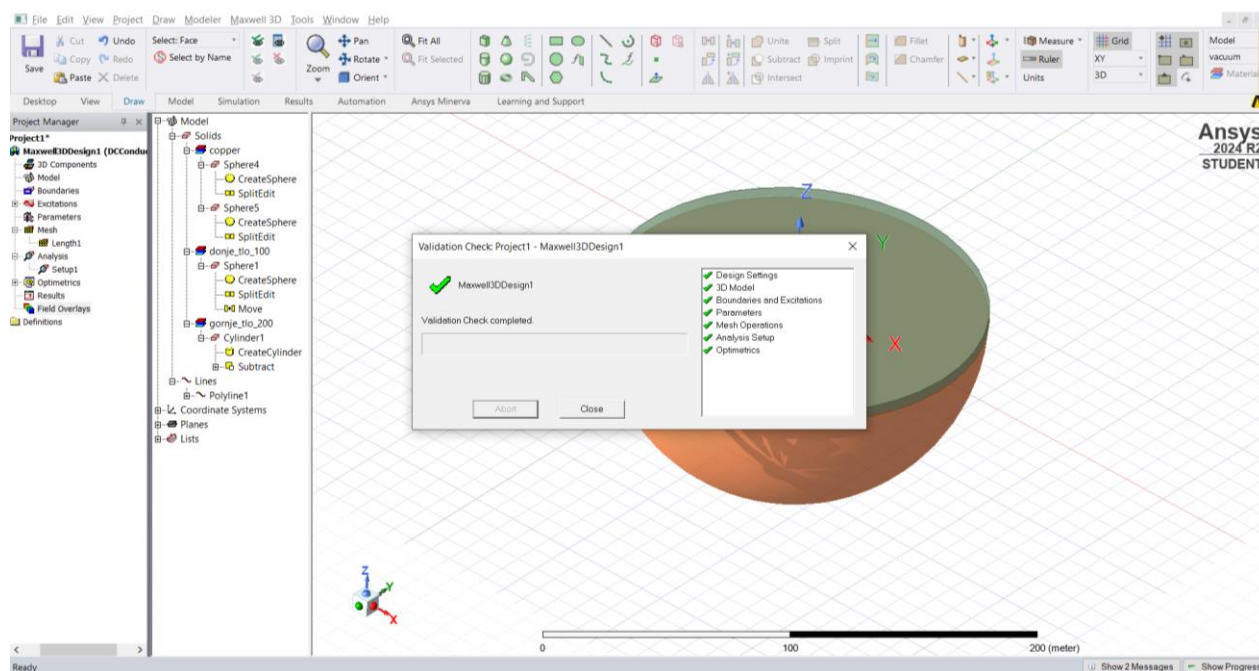


Slika 8.49. Završeni model

Na kraju je potrebno provjeriti je li sve dobro odrađeno, klikne se na „MAXWELL 3D“, zatim „VALIDATION CHECK“, prikazano na slikama 8.50. i 8.51. i na kraju se stisne „ANALYZE ALL“, prikazano na slici 8.52.

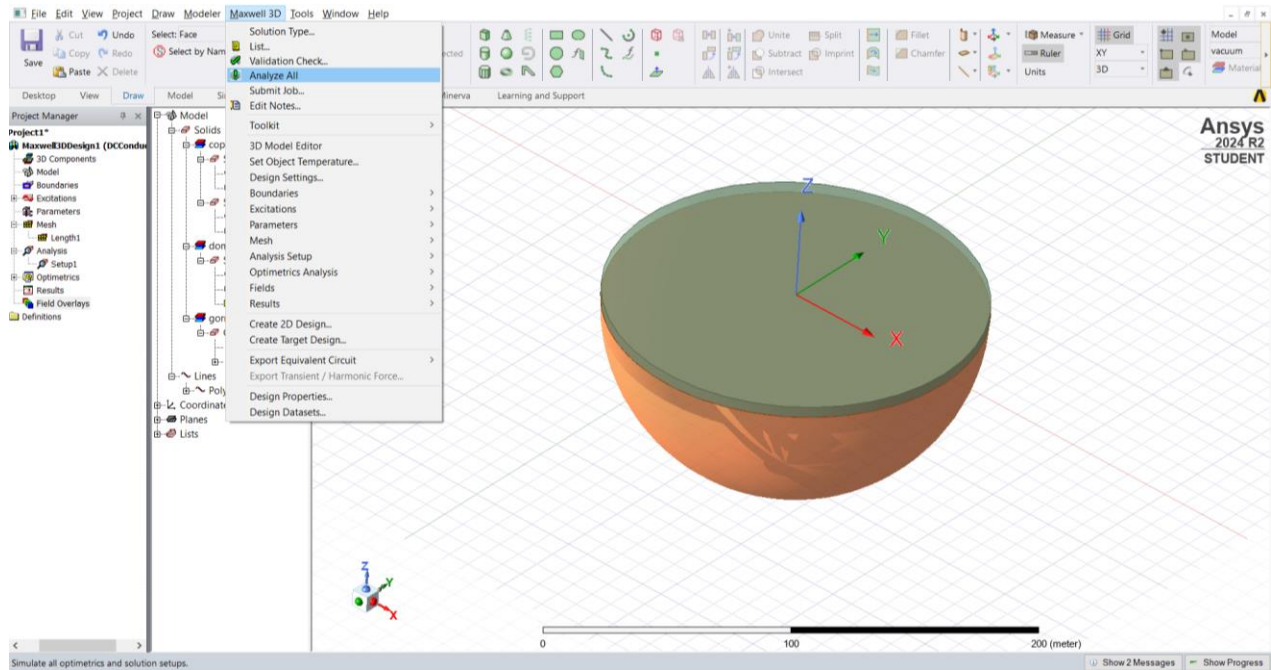


Slika 8.49. Korak prije provjere



Slika 8.50. Provjera





Slika 8.51. Funkcija „ANALYZE“

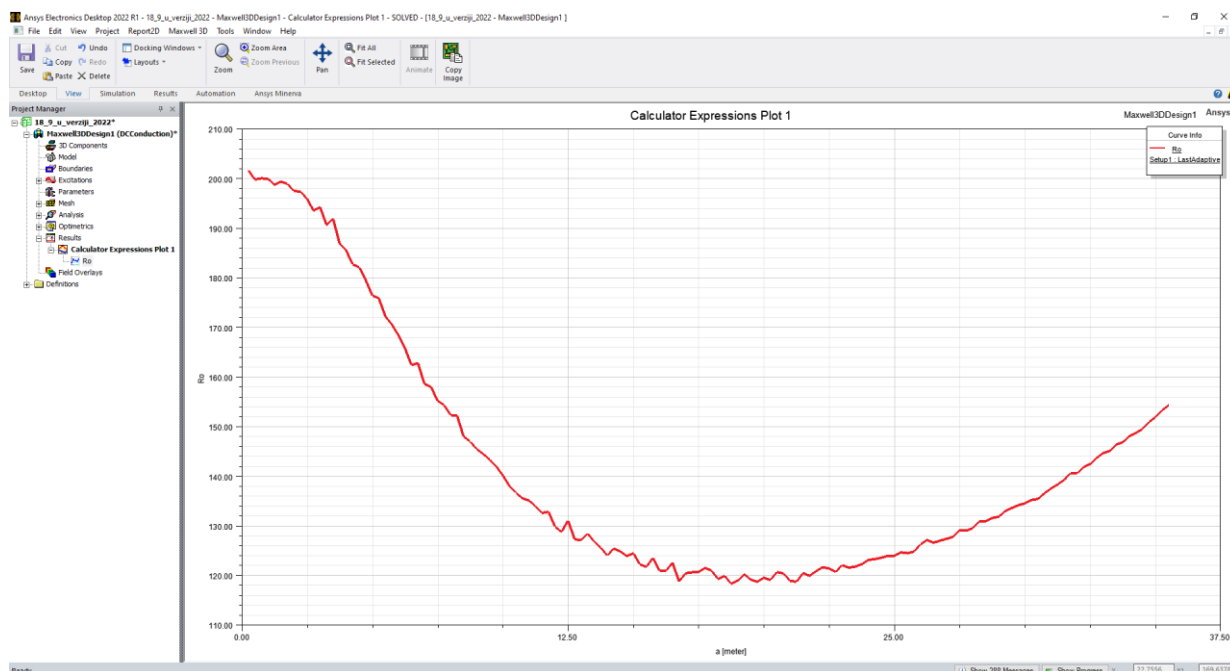
U sljedećoj tablici, 8.1. prikazano je koje su se vrijednosti koristile za određene simulacije model cilindar i polukugla, a kasnije je u radu detaljno objašnjeno za svaku posebno.

**Tablica 8.1.** Usporedba modela cilindar i polukugla za različite vrijednosti

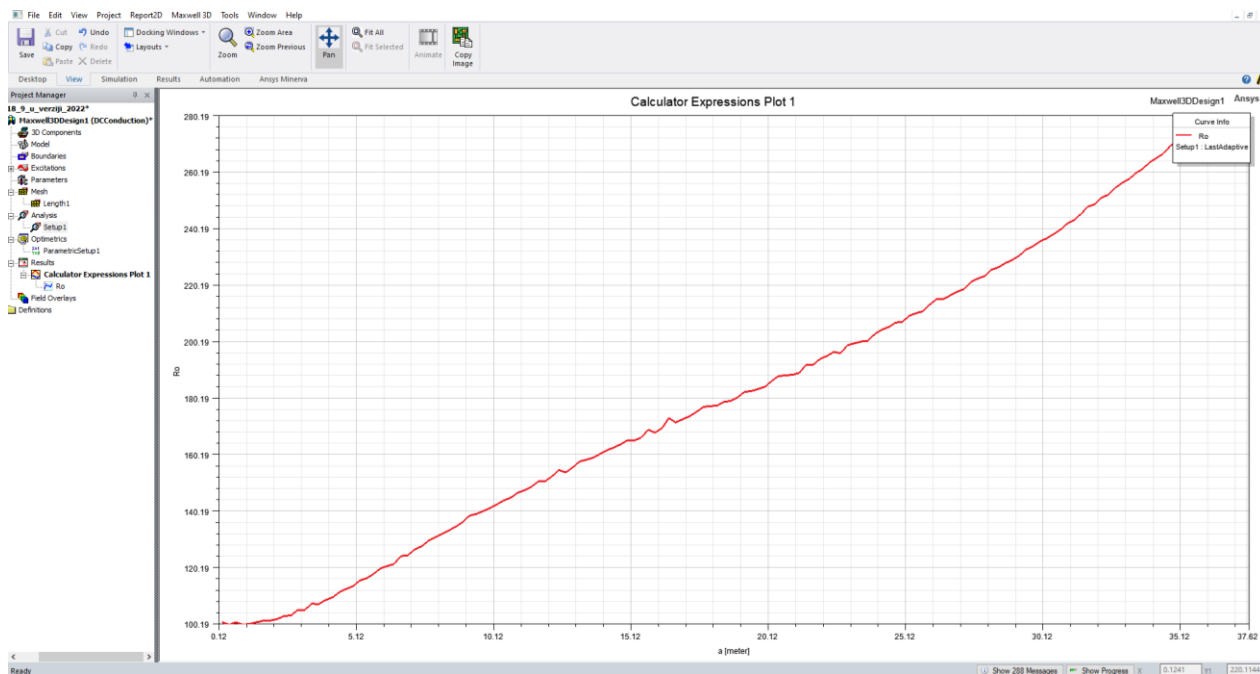
OPIS MODELA	OTPORNOST TLA ( $\Omega\text{m}$ )	RADIJUS (r)	BROJ ELEMENATA(n)	KRITERIJ ZAUSTAVLJANJA (p%)	TRAJANJE PRORAČUNA (h)	KOMENTAR
GORNJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDRA, DONJI SLOJ TLA OBLIKA POLUKUGLE	GORNJI SLOJ TLA: 200  DONJI SLOJ TLA:100	80	500 000	1	2h i 56min	divergira
GORNJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDRA, DONJI SLOJ TLA OBLIKA POLUKUGLE	GORNJI SLOJ TLA: 100  DONJI SLOJ TLA:200	80	500 000	1	2h i 53min	pravac
GORNJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDRA _OKOMITO DODAN CILINDAR NA ELEKTRODE, DONJI SLOJ TLA OBLIKA POLUKUGLE	GORNJI SLOJ TLA: 200  DONJI SLOJ TLA:100	80	500 000	1	4h i 22min	divergira
GORNJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDRA _OKOMITO DODAN CILINDAR NA ELEKTRODE, DONJI SLOJ TLA OBLIKA POLUKUGLE	GORNJI SLOJ TLA: 100  DONJI SLOJ TLA:200	80	500 000	1	4h	pravac
GORNJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDRA, DONJI SLOJ TLA OBLIKA POLUKUGLE	GORNJI SLOJ TLA: 200  DONJI SLOJ TLA:100	120	500 000	1	4h i 11min	Divergira za $a=25\text{ m}$
GORNJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDRA, DONJI SLOJ TLA OBLIKA POLUKUGLE	GORNJI SLOJ TLA: 100  DONJI SLOJ TLA:200	120	500 000	1	4h i 18min	pravac
GORNJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDRA _PARALELNO DODAN CILINDAR NA ELEKTRODE, DONJI SLOJ TLA OBLIKA POLUKUGLE	GORNJI SLOJ TLA: 200  DONJI SLOJ TLA:100	120	500 000	1	5h i 21min	Divergira za $a=25\text{ m}$

<b>GORNJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDRA _PARALELNO DODAN CILINDAR NA ELEKTRODE,DONJI SLOJ TLA OBLIKA POLUKUGLE</b>	GORNJI SLOJ TLA: 100  DONJI SLOJ TLA:200	120	500 000	1	5h i 25 min	pravac
<b>GORNJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDRA _OKOMITO DODAN CILINDAR NA ELEKTRODE,DONJI SLOJ TLA OBLIKA POLUKUGLE</b>	GORNJI SLOJ TLA: 200  DONJI SLOJ TLA:100	120	500 000	1	5h i 16min	Divergira za $\alpha=27$ m
<b>GORNJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDRA _OKOMITO DODAN CILINDAR NA ELEKTRODE,DONJI SLOJ TLA OBLIKA POLUKUGLE</b>	GORNJI SLOJ TLA: 100  DONJI SLOJ TLA:200	120	500 000	1	5h i 25 min	pravac
<b>GORNJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDRA, DONJI SLOJ TLA OBLIKA POLUKUGLE</b>	GORNJI SLOJ TLA: 200  DONJI SLOJ TLA:100	150	500 000	1	13h i 5 min	Divergira za $\alpha=30$ m
<b>GORNJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDRA, DONJI SLOJ TLA OBLIKA POLUKUGLE</b>	GORNJI SLOJ TLA: 100  DONJI SLOJ TLA:200	150	500 000	1	2h i 54min	pravac
<b>GORNJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDRA _OKOMITO DODAN CILINDAR NA ELEKTRODE,DONJI SLOJ TLA OBLIKA POLUKUGLE</b>	GORNJI SLOJ TLA: 200  DONJI SLOJ TLA:100	150	500 000	1	Za $\alpha=15$ m, vrijeme mjerjenja iznosi 3h i 46min	Pretpostavlja se da bi divergiralo prema 100 $\Omega$ m
<b>GORNJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDRA _OKOMITO DODAN CILINDAR NA ELEKTRODE,DONJI SLOJ TLA OBLIKA POLUKUGLE</b>	GORNJI SLOJ TLA: 100  DONJI SLOJ TLA:200	150	500 000	1	Za $\alpha=15$ m, vrijeme mjerjenja iznosi 3h i 47min	Pretpostavlja se da bi težilo prema 200 $\Omega$ m

Prema prethodnom prikazanom modelu nehomogenog (dvoslojnog) tla provedene su simulacije za sljedeće parametre. Prva simulacija za: otpornost gornjeg sloja tla  $200 \Omega\text{m}$ , debljina 5 m, otpornost donjeg sloja tla  $100 \Omega\text{m}$ , proračunska domena (engl. *computational domain*) je izdijeljena na 200 000 elemenata, a kriterij zaustavljanja proračuna kada promjena rezultata postane manja od 0.5%. Rezultati prve simulacije prikazani su na slici 8.53. Druga simulacija je za: otpornost gornjeg sloja tla  $100 \Omega\text{m}$ , debljine 5 m, otpornost donjeg sloja tla  $200 \Omega\text{m}$ , proračunska domena (engl. *computational domain*) je izdijeljena na 200 000 elemenata, a kriterij zaustavljanja proračuna kada promjena rezultata postane manja od 0.5%. Rezultati druge simulacije prikazani su na slici 8.54.



Slika 8.53. Promjena prividnog otpora tla u funkciji razmaka elektroda  $a$



Slika 8.54. Promjena prividnog otpora tla u funkciji razmaka elektroda  $a$

Dobiveni izračuni promjene prividnog otpora tla u funkciji razmaka elektroda  $a$  prikazani na slikama 8.53. i 8.54. nisu u skladu teorijskim predviđanjima. Početne brojčane vrijednosti na obje slike su u skladu s teorijskim predviđanjima jer odgovaraju brojčanim vrijednostima otpornosti gornjega tla, no daljnji tok funkcije ne odgovara teorijskom predviđanju.

Za dvoslojno tlo funkcija po kojoj se mijenja prividna otpornost tla, mora imati izraženu točku infleksije te za velike vrijednosti razmaka elektroda  $a$ , funkcija mora asimptotski težiti (konvergirati) prema iznosu specifičnog otpora donjeg sloja tla, kao što se može vidjeti na slikama 8.53. i 8.54. nakon približno  $a=15$  m na obje funkcije na kojima je opisana promjena prividnog otpora tla umjesto da konvergira prema donjem iznosu otpora tla, na slici 8.53. divergira, dok na slici 8.54. ima vladanje kao pravac.

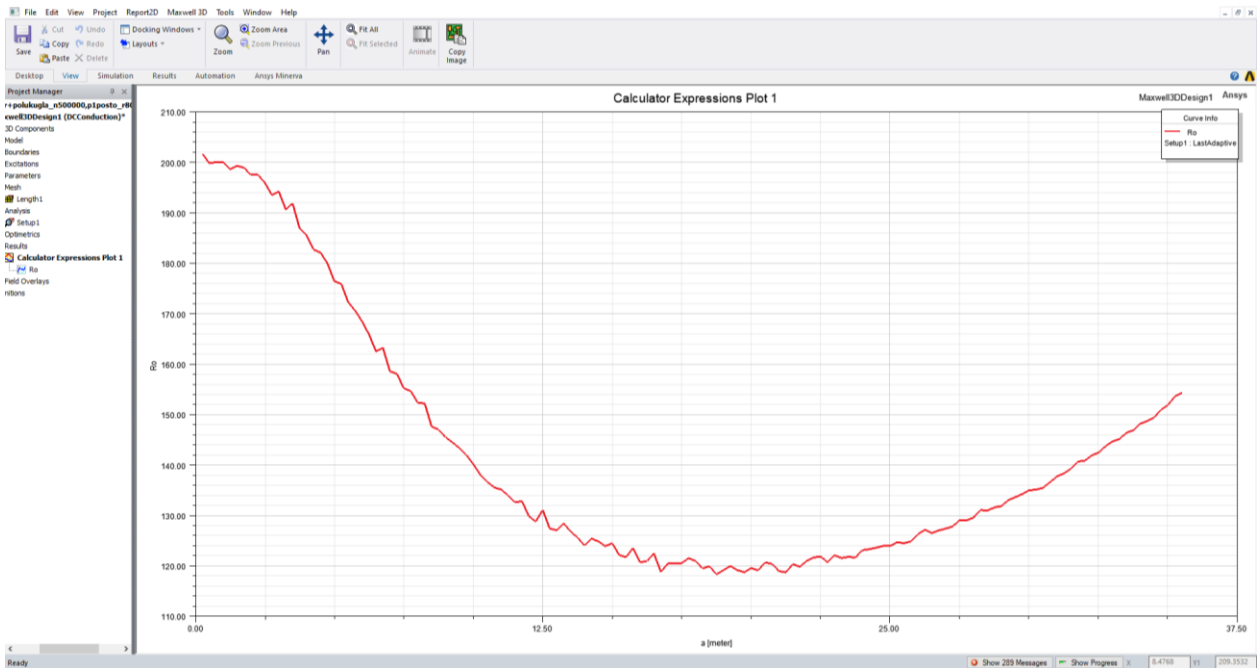
S obzirom na to da simulacija nije dala rezultate u skladu s očekivanjima, provedene su dodatne simulacije. U svrhu istraživanja isprobane su brojne simulacije s različitim radijusom (80 m, 120 m, 150 m) te brojem konačnih elemenata (100 000, 200 000, 300 000, 400 000, 500 000) te s postotnom greškom (0.1%, 0.5% i 1%).

Za postotne pogreške iznosa 0.1% i 0.5% te za broj konačnih elemenata iznosa 100 000, 200 000, 300 000 te 400 000, rezultati nisu ispadali u skladu s navedenim očekivanjima. Najbolji i „najtočniji“ rezultati dobiveni su kada je broj konačnih elemenata iznosio 500 000 te kada je postotna pogreška iznosila 1%. Budući da se ANSYS paket može preuzeti kao student verzija, ta verzija dolazi s ograničenjima, npr. maksimalan broj konačnih elemenata koji student verzija može „odsimulirati“ iznosi 100 000. Zbog toga je za daljnje potrebe izvedbi simulacija korištena računalna učionica T1-21 koja se nalazi na fakultetu.

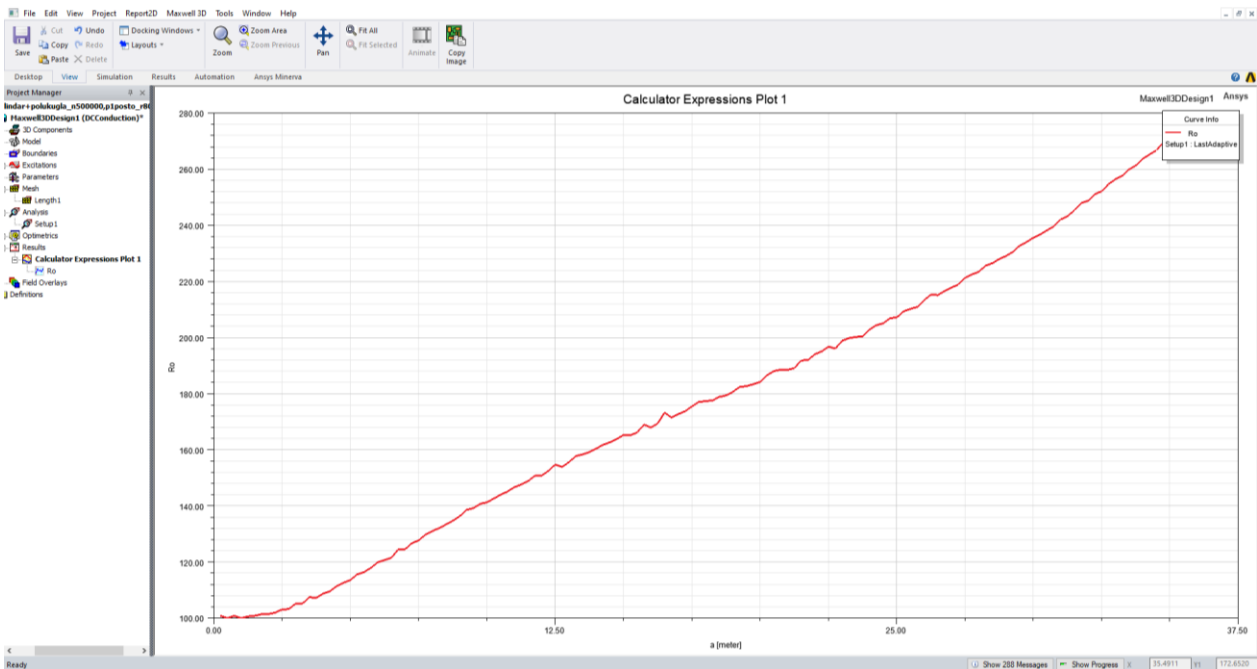
Radi navedenoga provedena je nova simulacije s većim brojem elemenata s pola milijuna elemenata s istim kriterijem zaustavljanja, kada promjena rezultata između uzastopnih iteracija bude manja od 1%. Za simulaciju određen je model polukugle prikazan kao donje tlo te cilindra kao gornje tlo.

Prva simulacija za: otpornost gornjeg sloja tla  $200 \Omega\text{m}$ , debljina sloj iznosa 5 m, otpornost donjeg sloja tla  $100 \Omega\text{m}$ , proračunska domena (engl. *computational domain*) je izdijeljena na 500 000 elemenata, a kriterij zaustavljanja proračuna kada promjena rezultata postane manja od 1%. Rezultati prve simulacije prikazani su na slici 8.55.

Druga simulacija za: otpornost gornjeg sloja tla  $100 \Omega\text{m}$ , debljine 5 m, otpornost donjeg sloja tla  $200 \Omega\text{m}$ , proračunska domena (engl. *computational domain*) je izdijeljena na 500 000 elemenata, a kriterij zaustavljanja proračuna kada promjena rezultata postane manja od 1%. Rezultati druge simulacije prikazani su na slici 8.56.



Slika 8.55. Promjena prividnog otpora tla u funkciji razmaka elektroda  $a$ , za  $r=80$  m



Slika 8.56. Promjena prividnog otpora tla u funkciji razmaka elektroda  $a$ , za  $r=80$  m

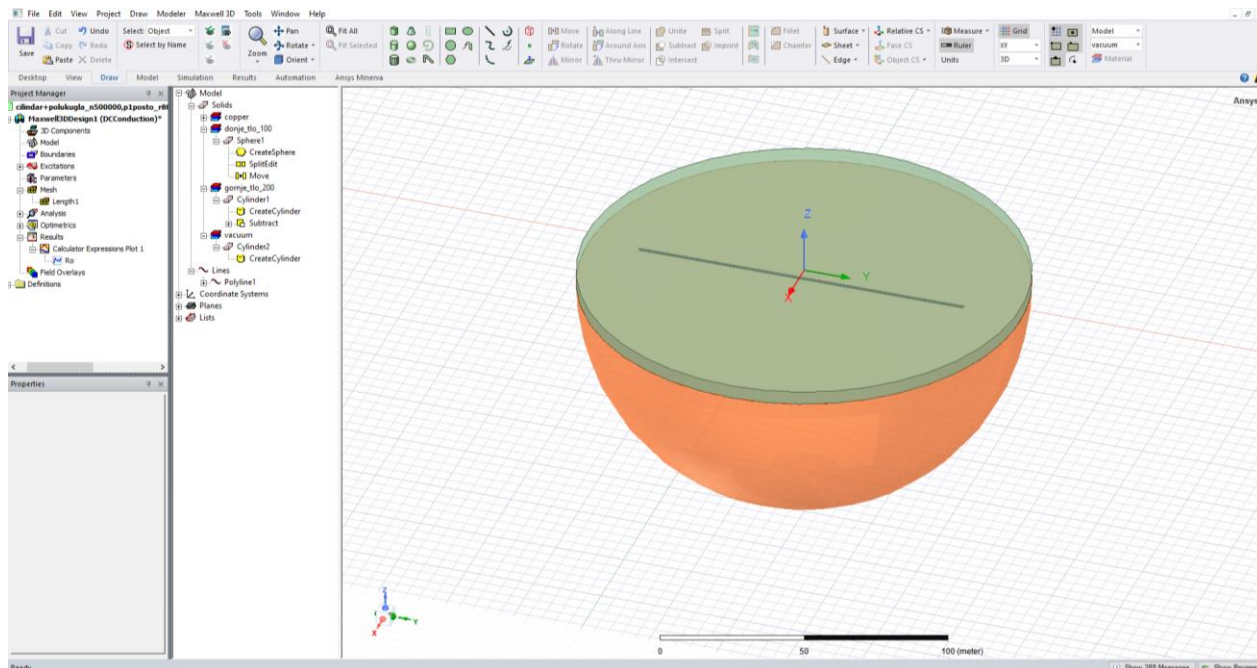
U skladu sa zadatkom diplomskog rada dodana je lokalna heterogenost u gornjem sloju tla koja se modelirala kao cilindar. Iako su numerički artefakti očigledni (područje do  $a=10$  m) i rezultat je nezadovoljavajući, ali uz prikazane ostale simulacije kasnije u radu daje odličnu usporedbu da radijus ima veliki utjecaj na rezultat.

Prva simulacija za: otpornost gornjeg sloja tla  $200 \Omega\text{m}$ , debljina sloj iznosa 5 m, otpornost donjeg sloja tla  $100 \Omega\text{m}$ , proračunska domena (engl. *computational domain*) je izdijeljena na 500 000 elemenata, a kriterij zaustavljanja proračuna kada promjena rezultata postane manja od 1%. Rezultati prve simulacije prikazani su na slici 8.58.

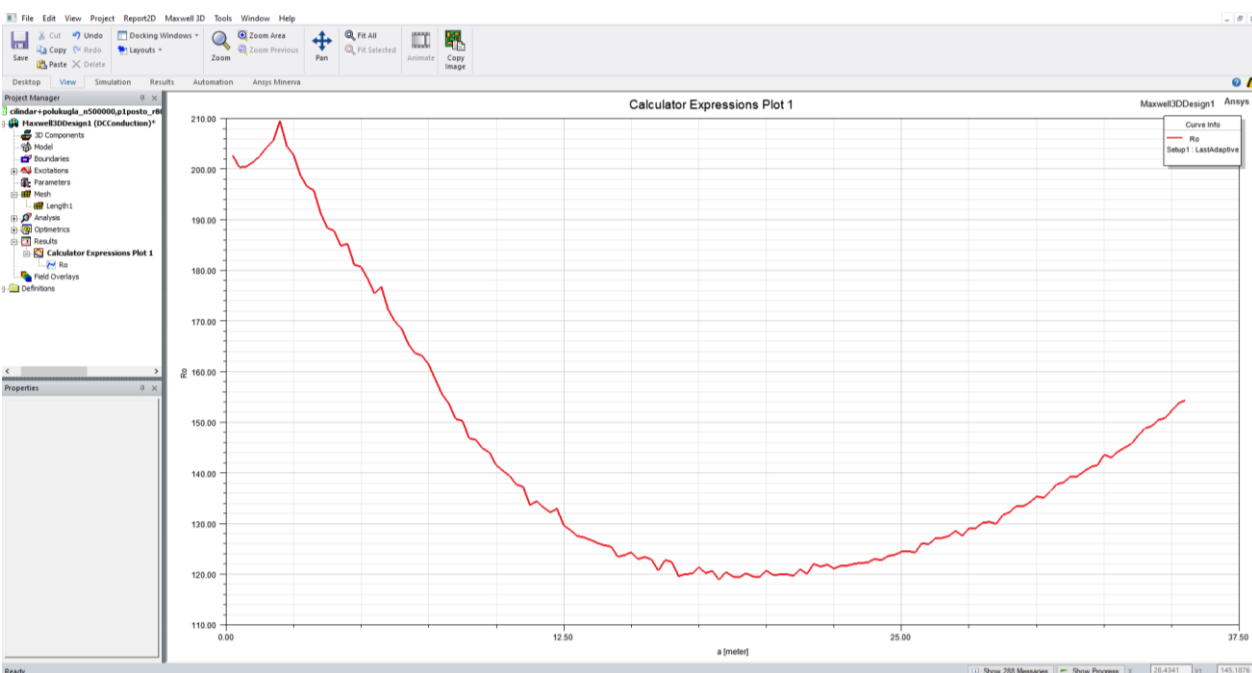
Druga simulacija za: otpornost gornjeg sloja tla  $100 \Omega\text{m}$ , debljine 5 m, otpornost donjeg sloja tla  $200 \Omega\text{m}$ , proračunska domena (engl. *computational domain*) je izdijeljena na 500 000 elemenata, a kriterij zaustavljanja proračuna kada promjena rezultata postane manja od 1%. Rezultati druge simulacije prikazani su na slici 8.60.

Kao i u simulaciji kada nije bio dodan cilindar u gornjem sloju tla pa tako i u ovoj kada je prisutan jasno se može vidjeti kako krivulja divergira za rezultat kada je iznos otpornosti gornjeg tla  $200 \Omega\text{m}$ , odnosno kreće se kao pravac kada je iznos otpornosti donjeg tla  $100 \Omega\text{m}$ .

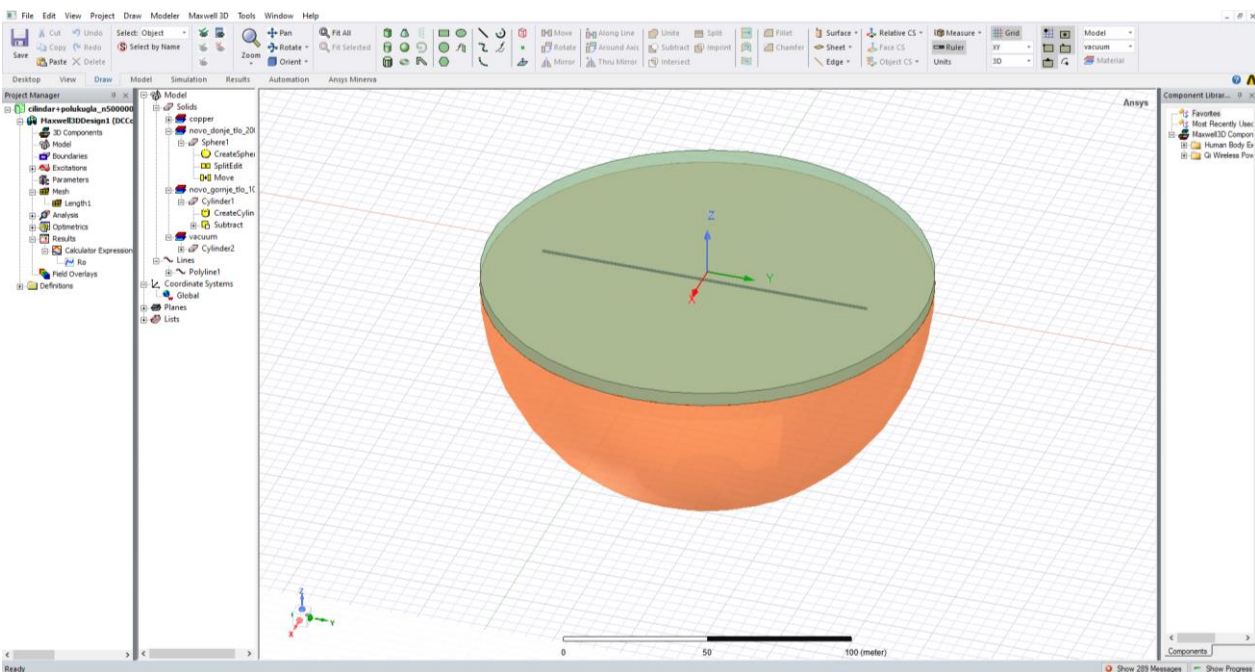




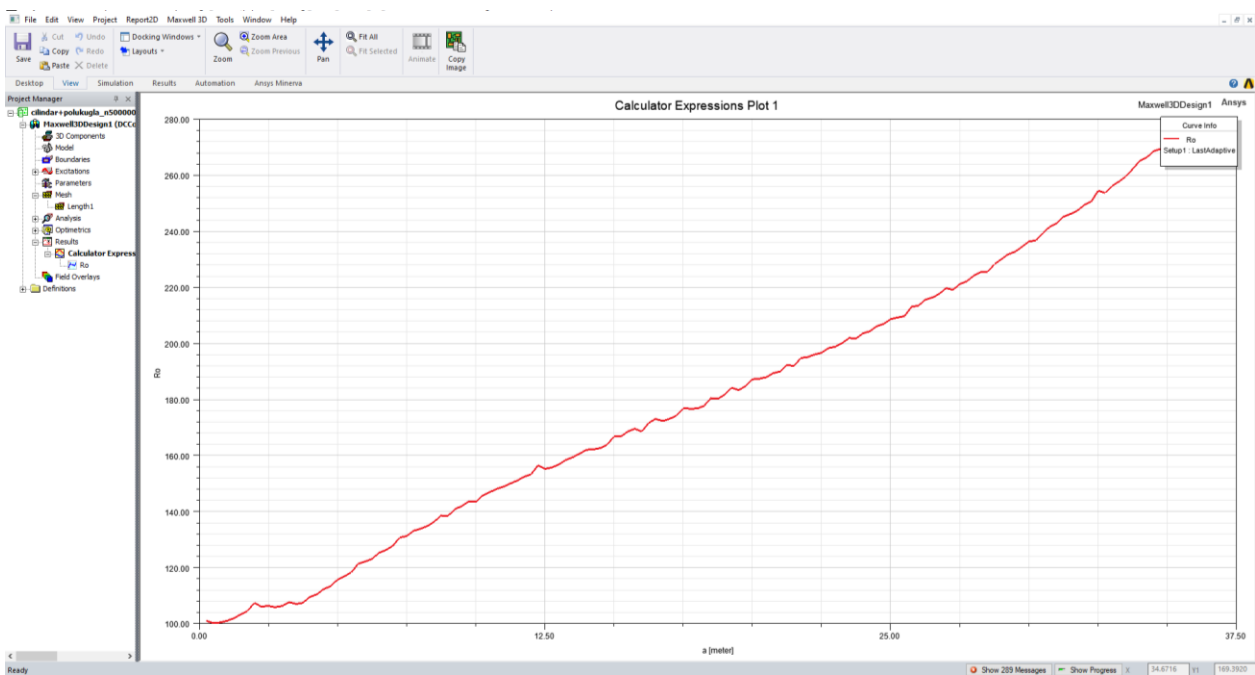
Slika 8.57. Model polukugle i cilindra za radijus 80 m, uz prisustvo cilindra u gornjem sloju tla



Slika 8.58. Promjena prividnog otpora tla u funkciji razmaka elektroda  $a$ , za  $r=80$  m uz prisustvo cilindra u gornjem sloju tla



Slika 8.59. Model polukugle i cilindra za radijus 80 m, uz prisustvo cilindra u gornjem sloju tla

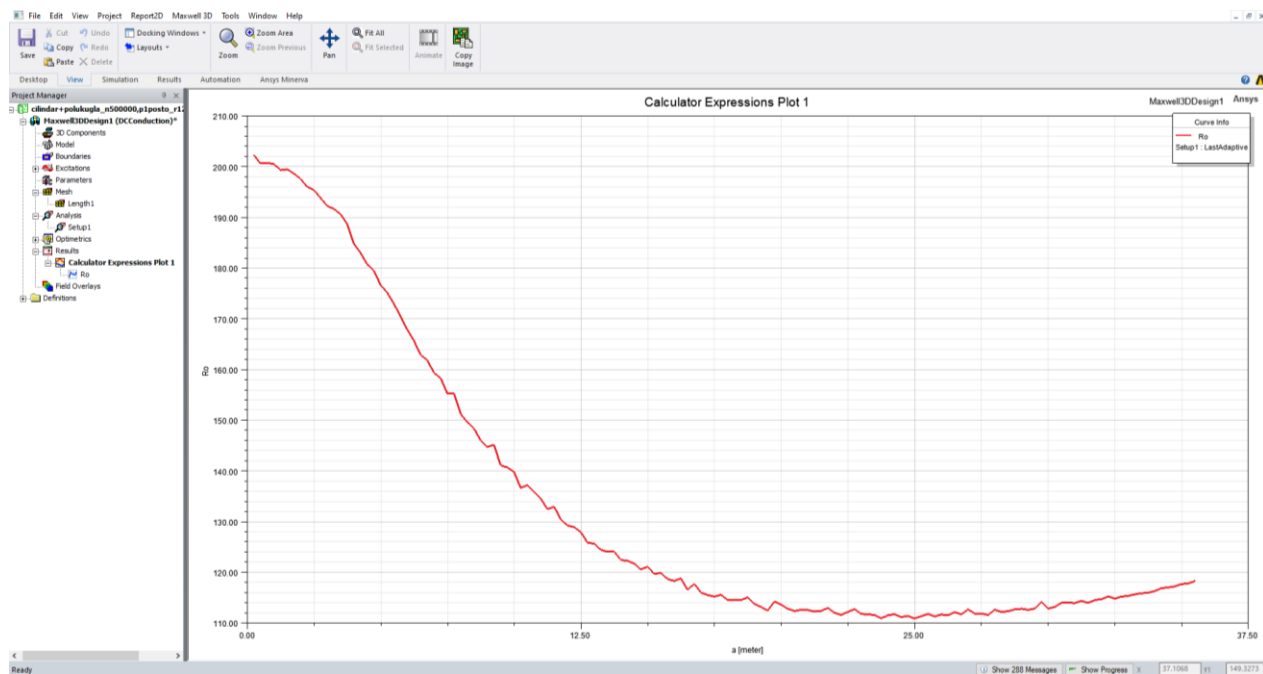


Slika 8.60. Promjena prividnog otpora tla u funkciji razmaka elektroda  $a$ , za  $r=80$  m uz prisustvo cilindra u gornjem sloju tla

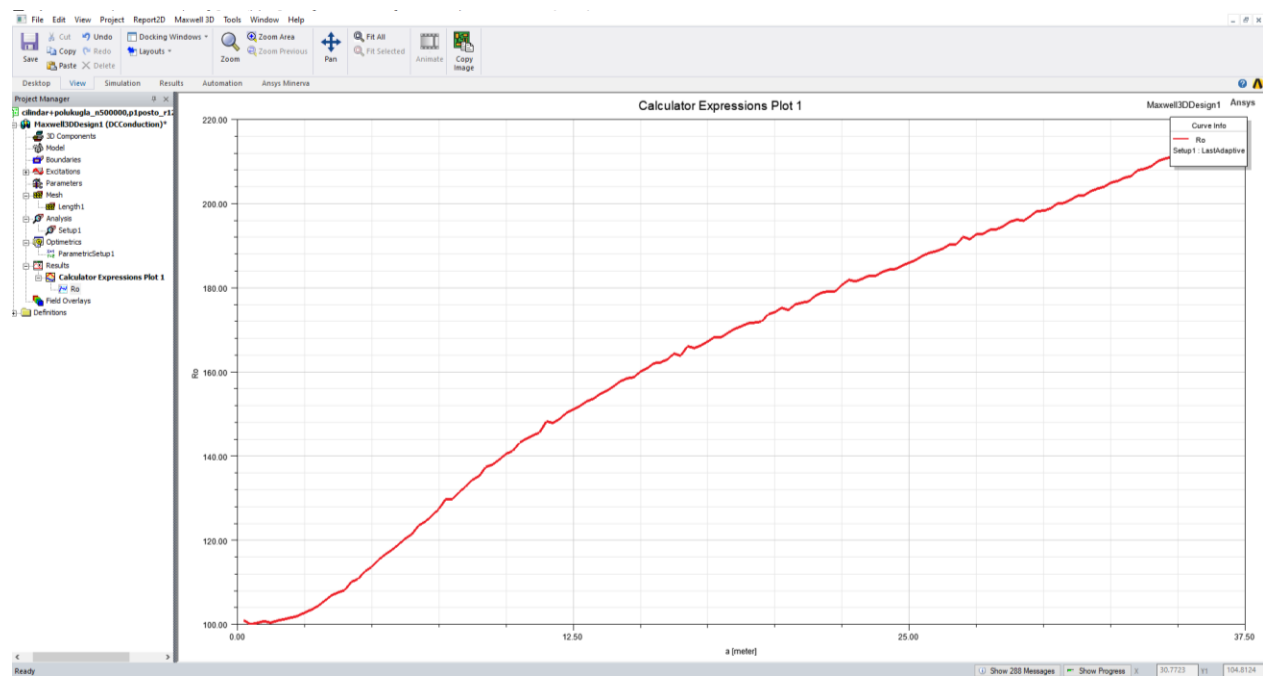
Kada je model (cilindar i polukugla) radijusa 120 m, uočena je razlika u odnosu na model (cilindar i polukugla) radijusa 80 m, krivulja i dalje divergira, odnosno ponaša se kao pravac za drugi slučaj kada je iznos otpornosti gornjeg tla 100  $\Omega\text{m}$ , ali tek nakon  $a=20$  m, dobiveni rezultat je bolji u odnosu na prošli kada je r iznosio 80 m.

Prva simulacija za: otpornost gornjeg sloja tla 200  $\Omega\text{m}$ , debljina 5 m, otpornost donjeg sloja tla 100  $\Omega\text{m}$ , proračunska domena (engl. *computational domain*) je izdijeljena na 500 000 elemenata, a kriterij zaustavljanja proračuna kada promjena rezultata postane manja od 1%. Rezultati prve simulacije prikazani su na slici 8.61.

Druga simulacija za: otpornost gornjeg sloja tla 100  $\Omega\text{m}$ , debljine 5 m, otpornost donjeg sloja tla 200  $\Omega\text{m}$ , proračunska domena (engl. *computational domain*) je izdijeljena na 500 000 elemenata, a kriterij zaustavljanja proračuna kada promjena rezultata postane manja od 1%. Rezultati druge simulacije prikazani su na slici 8.62.



Slika 8.61. Promjena prividnog otpora tla u funkciji razmaka elektroda  $a$ , za  $r=120$  m

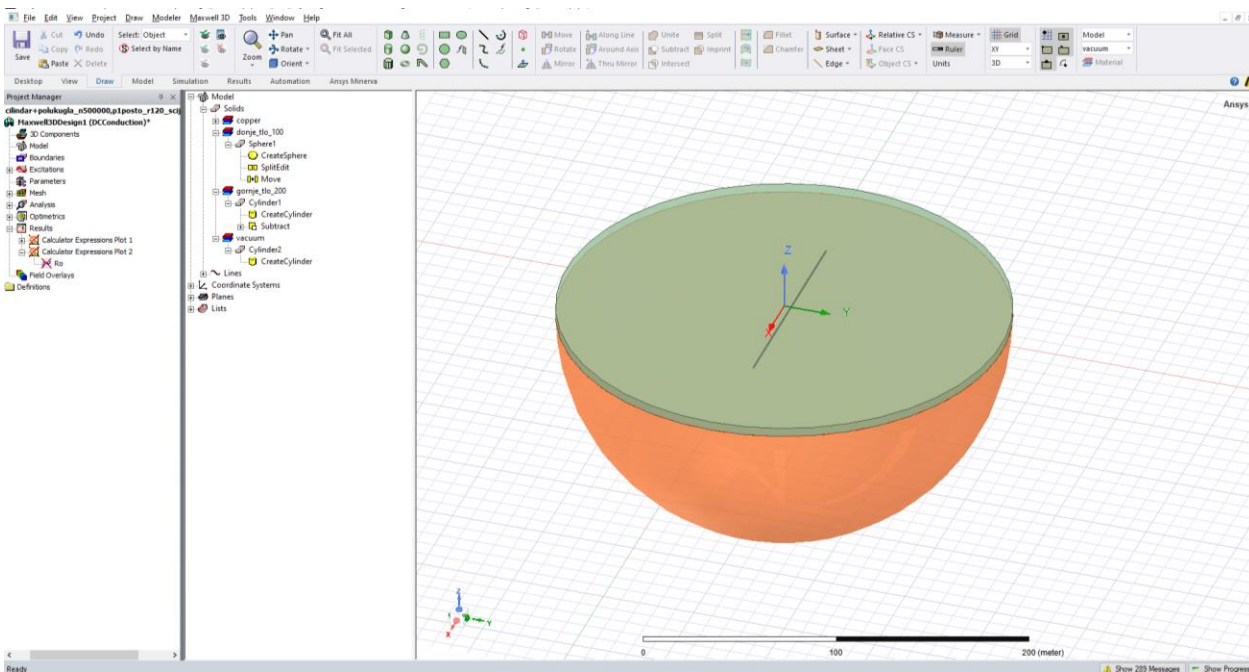


Slika 8.62. Promjena prividnog otpora tla u funkciji razmaka elektroda  $a$ , za  $r=120$  m

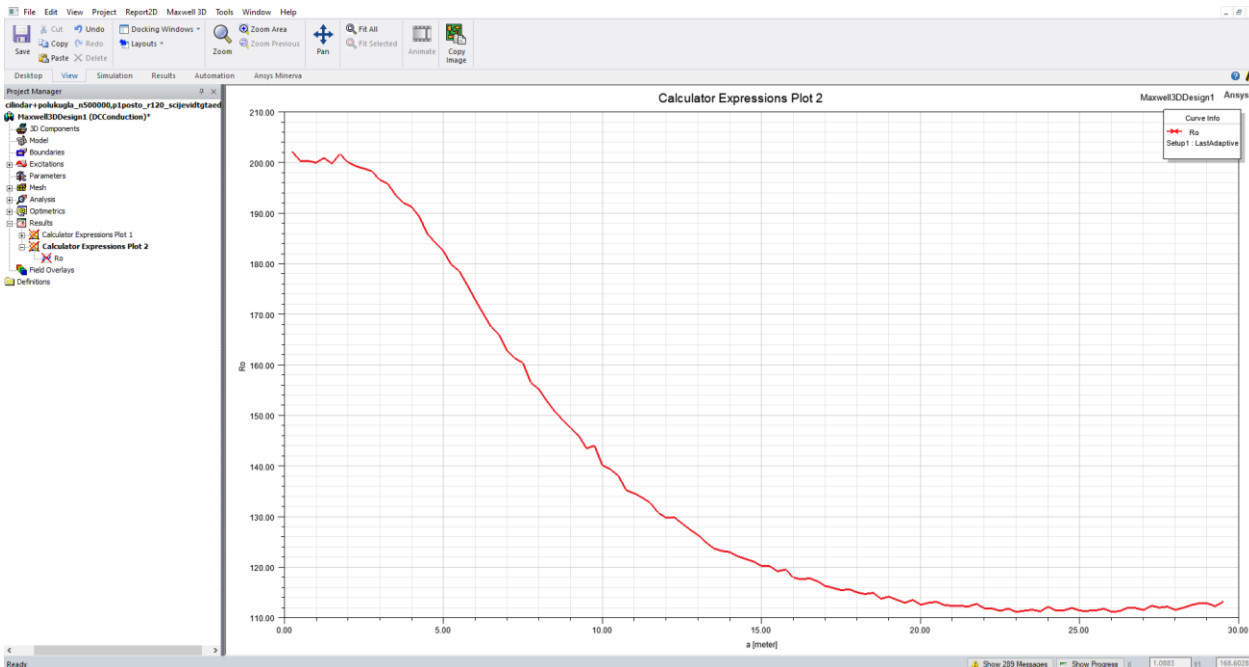
Na idućoj slici, 8.63. prikazan je model cilindar i polukugla, radijusa 120 m s prisustvom cilindra u gornjem sloju tla kada je paralelan s elektrodama kada je otpornost gornjeg sloja tla 200  $\Omega\text{m}$ , debljina 5 m, otpornost donjeg sloja tla 100  $\Omega\text{m}$ , proračunska domena (engl. *computational domain*) je izdijeljena na 500 000 elemenata, a kriterij zaustavljanja proračuna kada promjena rezultata postane manja od 1%. Rezultati prve simulacije prikazani su na slici 8.64.

Druga simulacija je za: otpornost gornjeg sloja tla 100  $\Omega\text{m}$ , debljine 5 m, otpornost donjeg sloja tla 200  $\Omega\text{m}$ , proračunska domena (engl. *computational domain*) je izdijeljena na 500 000 elemenata, a kriterij zaustavljanja proračuna kada promjena rezultata postane manja od 1%. Model je prikazan na slici 8.65., dok su rezultati druge simulacije prikazani su na slici 8.66.

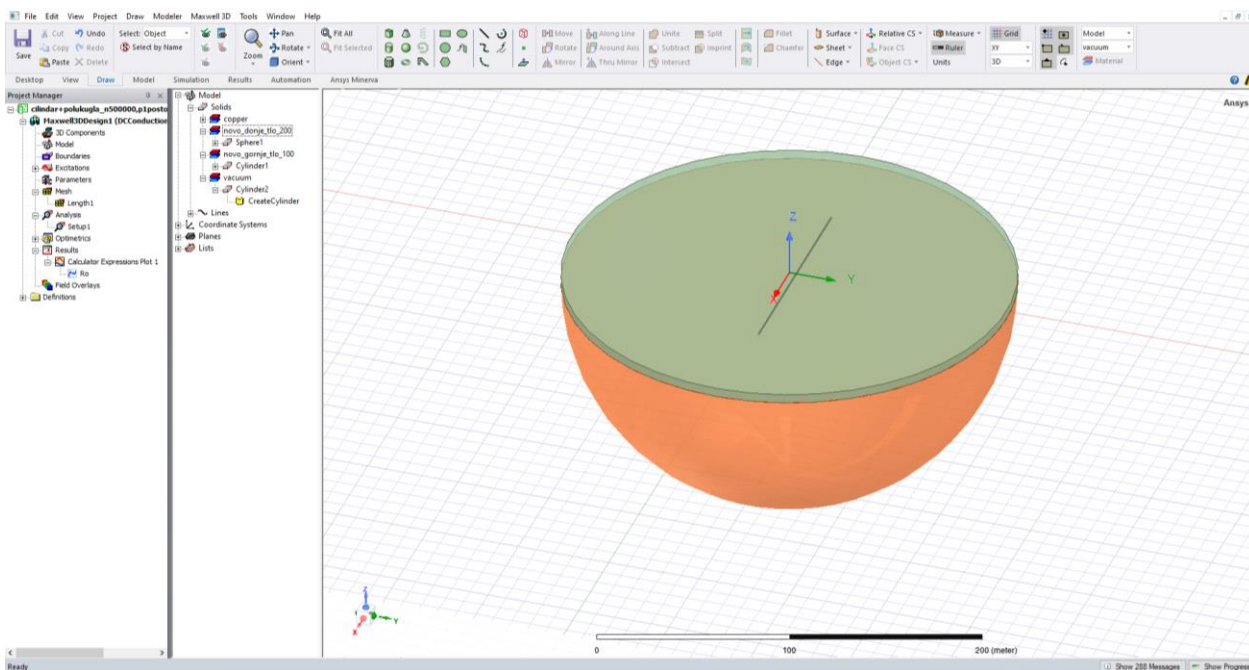
Kao rezultat ove simulacije utvrđeno je da kada se cilindar postavi u gornji sloj tla i paralelan je s elektrodama koje se nalaze u gornjem sloju tla, on nema značajnu ulogu na promjenu rezultata te je rezultat približno jednak kao u slučaju kada nema prisustva cilindra u gornjem sloju tla.



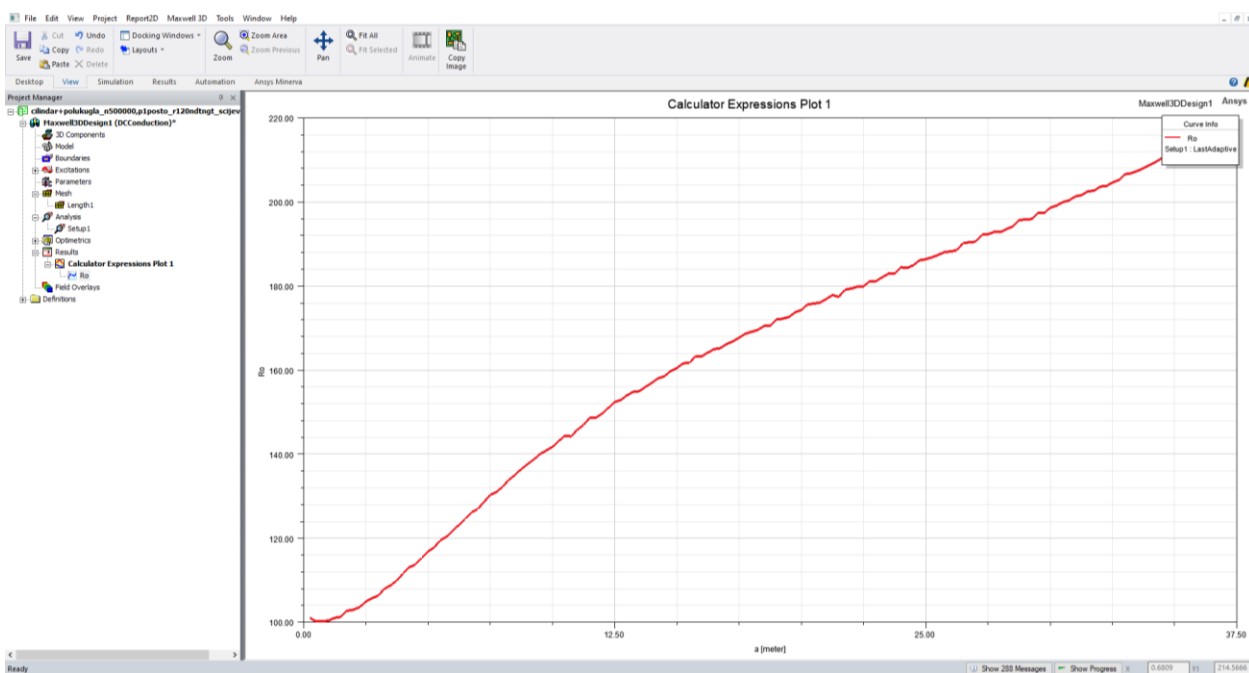
Slika 8.63. Model polukugle i cilindra za radijus 120 m, uz prisustvo paralelnog cilindra u gornjem sloju tla



Slika 8.64. Promjena prividnog otpora tla u funkciji razmaka elektroda  $a$ , za  $r=120$  m



Slika 8.65. Model polukugle i cilindra za radijus 120 m, uz prisustvo paralelnog cilindra u gornjem sloju tla



Slika 8.66. Promjena prividnog otpora tla u funkciji razmaka elektroda  $a$ , za  $r=120$  m

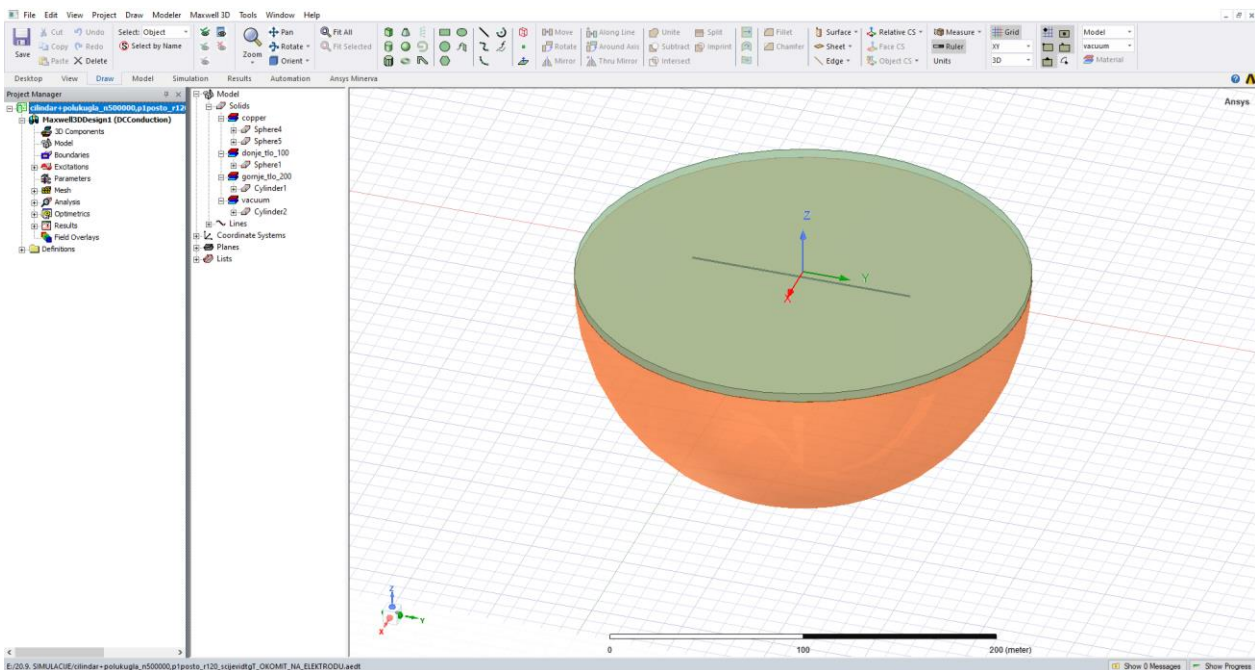
Na idućoj slici, 8.67. prikazan je model cilindar i polukugla, radijusa 120 m s prisustvom cilindra u gornjem sloju tla kada je okomit na elektrode. U skladu sa zadatkom diplomskog rada dodana je lokalna heterogenost u gornjem sloju tla koja se modelirala kao cilindar, taj cilindar radijusa je 120 m, te njegova debljina iznosi 0.5 m. Koordinate su iznosile 3, -60, -1.5. Koordinate mogu imati i drugačiji redoslijed, bitno je samo da je cilindar okomit na elektrode.

Kada je otpornost gornjeg sloja tla 200  $\Omega\text{m}$ , debljina 5 m, otpornost donjeg sloja tla 100  $\Omega\text{m}$ , proračunska domena (engl. *computational domain*) je izdijeljena na 500 000 elemenata, a kriterij zaustavljanja proračuna kada promjena rezultata postane manja od 1%. Rezultati prve simulacije prikazani su na slici 8.68.

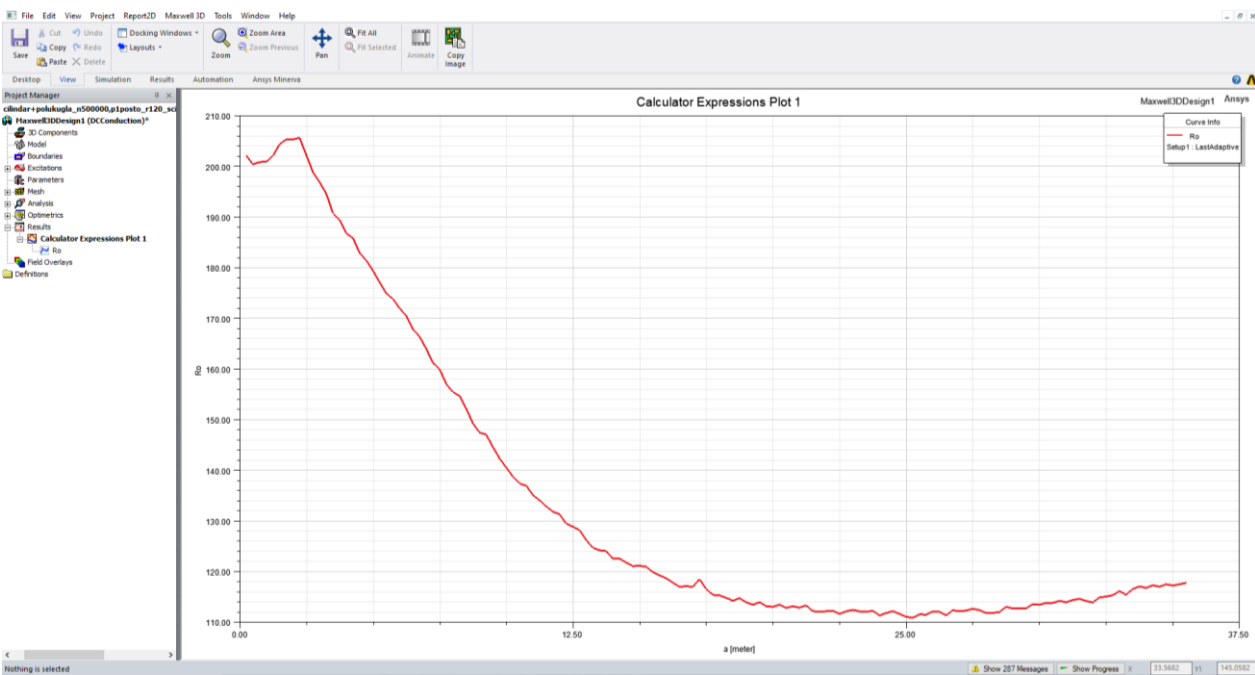
Druga simulacija je za: otpornost gornjeg sloja tla 100  $\Omega\text{m}$ , debljine 5 m, otpornost donjeg sloja tla 200  $\Omega\text{m}$ , proračunska domena (engl. *computational domain*) je izdijeljena na 500 000 elemenata, a kriterij zaustavljanja proračuna kada promjena rezultata postane manja od 1%. Model je prikazan na slici 8.69. dok su rezultati druge simulacije prikazani su na slici 8.70.

Kao rezultat ove simulacije utvrđeno je da kada se cilindar postavi u gornji sloj tla i okomit je na elektrode koje se nalaze u gornjem sloju tla, on ima značajnu ulogu na promjenu rezultata te je rezultat vidno drugačiji nego kada nema prisustva cilindra u gornjem sloju tla, vide se numerički artefakti u prvom dijelu grafa. Vidi se kako divergira tek nakon za  $a=25$  m.

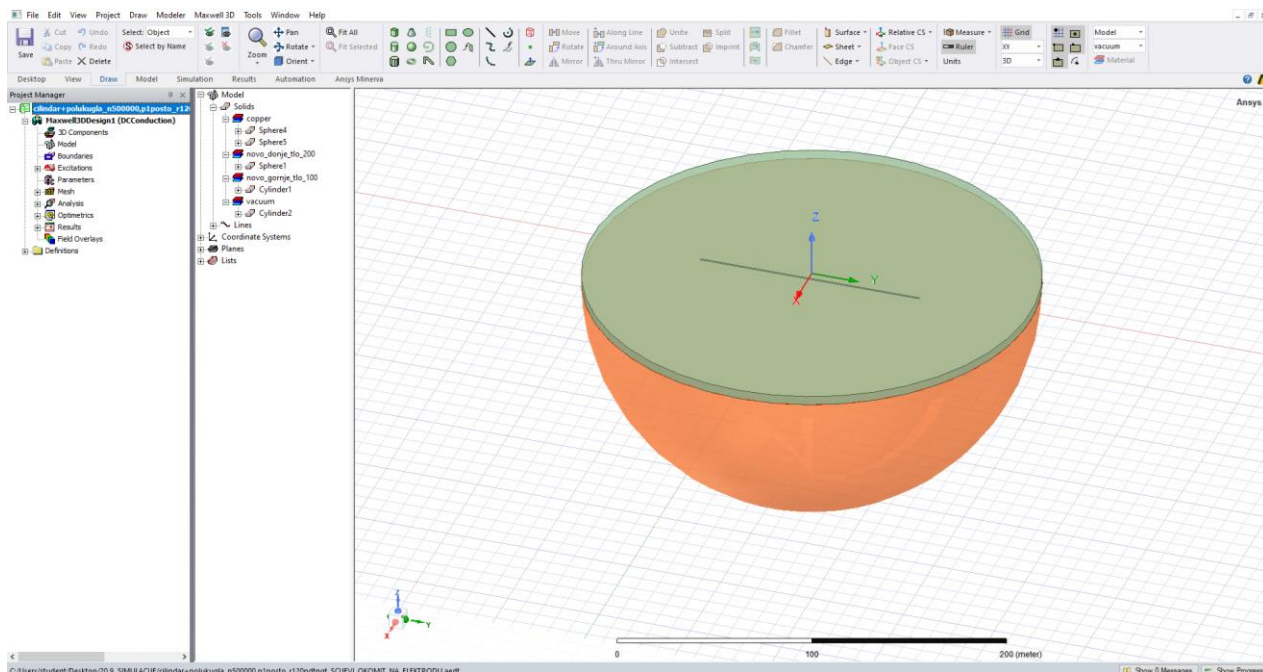




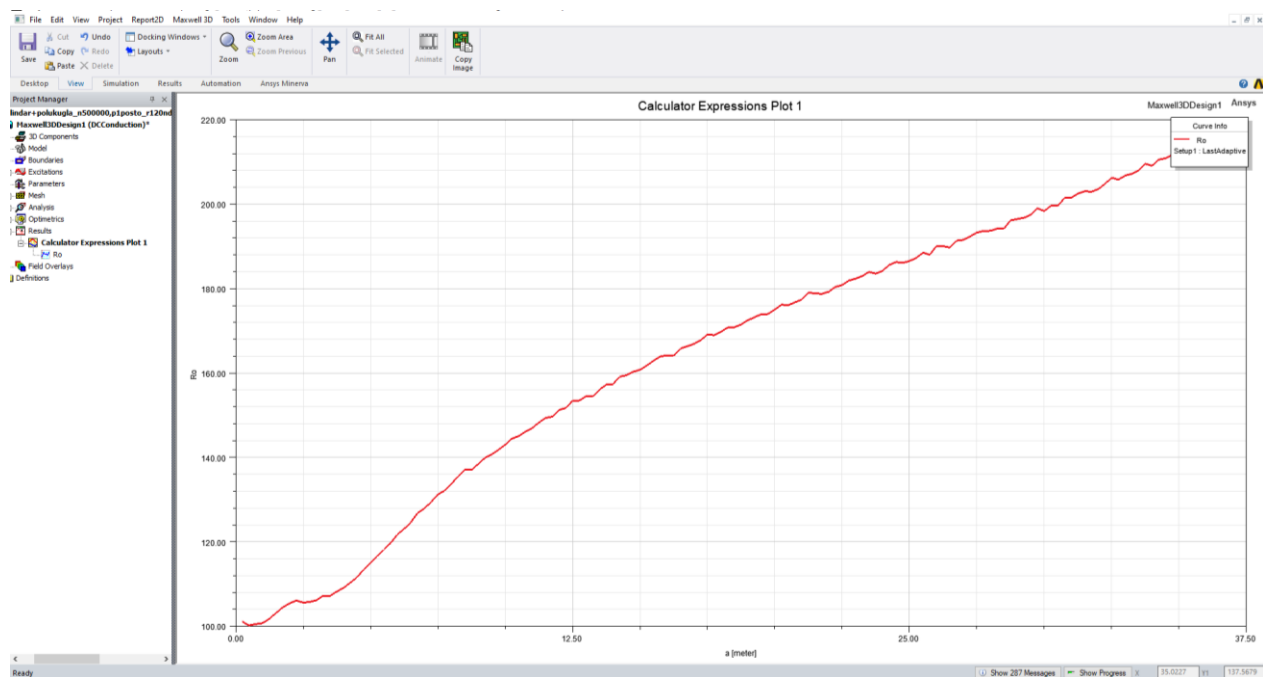
Slika 8.67. Model polukugle i cilindra za radijus 120 m, uz prisustvo okomitog cilindra u gornjem sloju tla



Slika 8.68. Promjena prividnog otpora tla u funkciji razmaka elektroda  $a$ , za  $r=120$  m



Slika 8.69. Model polukugle i cilindra za radijus 120 m, uz prisustvo okomitog cilindra u gornjem sloju tla

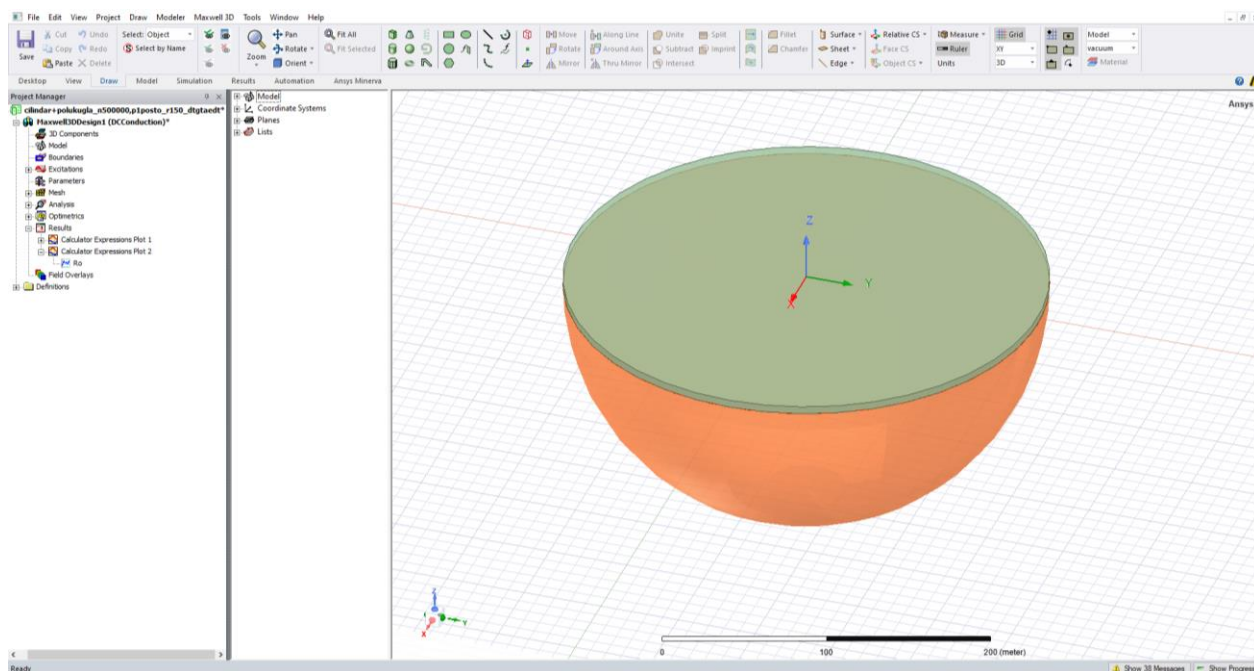


Slika 8.70. Promjena prividnog otpora tla u funkciji razmaka elektroda  $a$ , za  $r=120$  m

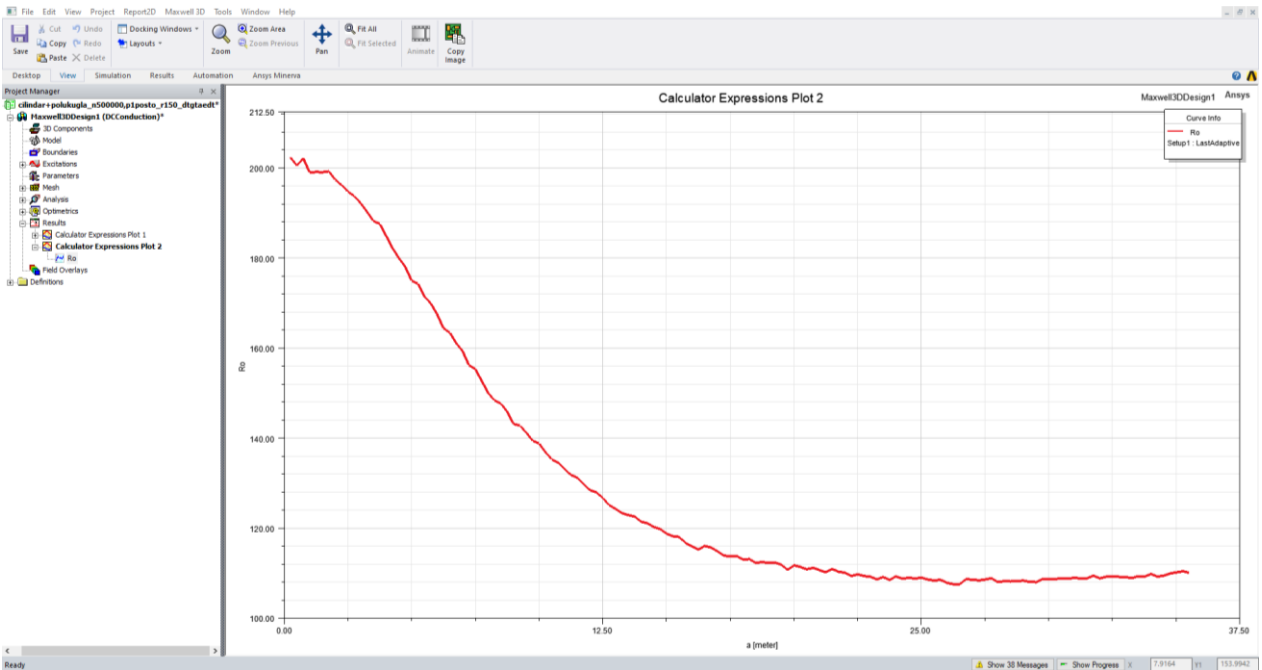
Kada je model (cilindar i polukugla) radijusa 150 m, uočena je razlika u odnosu na model (cilindar i polukugla) radijusa 120 m i model (cilindar i polukugla) radijusa 80 m, krivulja i dalje divergira, ali tek  $a=27$  m, dok su u prijašnjim slučajevima divergirale za manji  $a$ , odnosno ponaša se kao pravac za drugi slučaj kada je iznos otpornosti gornjeg tla  $100 \Omega\text{m}$ , ali tek nakon  $a=20$  m, dobiveni rezultat je bolji u odnosu na prošli kada je  $r$  iznosio 80 m. Model je prikazan na slici 8.71.

Prva simulacija za: otpornost gornjeg sloja tla  $200 \Omega\text{m}$ , debljina 5 m, otpornost donjeg sloja tla  $100 \Omega\text{m}$ , proračunska domena (engl. *computational domain*) je izdijeljena na 500 000 elemenata, a kriterij zaustavljanja proračuna kada promjena rezultata postane manja od 1%. Rezultati prve simulacije prikazani su na slici 8.72.

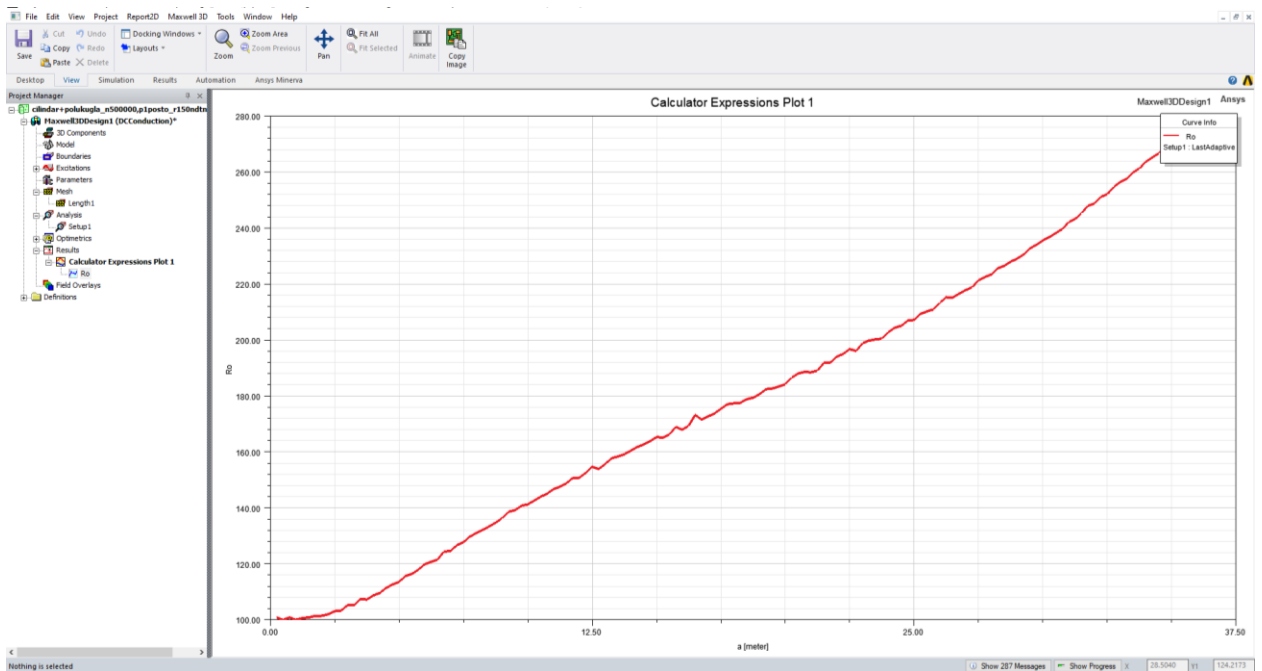
Druga simulacija za: otpornost gornjeg sloja tla  $100 \Omega\text{m}$ , debljine 5 m, otpornost donjeg sloja tla  $200 \Omega\text{m}$ , proračunska domena (engl. *computational domain*) je izdijeljena na 500 000 elemenata, a kriterij zaustavljanja proračuna kada promjena rezultata postane manja od 1%. Rezultati druge simulacije prikazani su na slici 8.73.



Slika 8.71. Model polukugle i cilindra za radijus iznosa 150 m



Slika 8.72. Promjena prividnog otpora tla u funkciji razmaka elektroda  $a$ , za  $r=150$  m



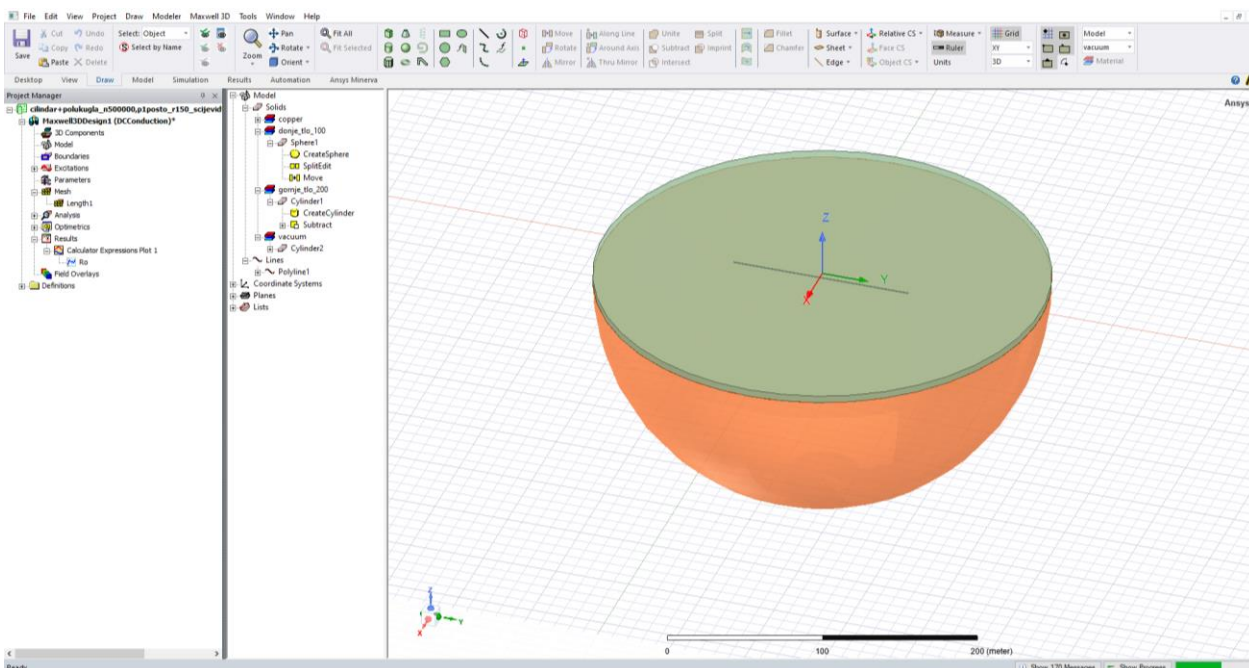
Slika 8.73. Promjena prividnog otpora tla u funkciji razmaka elektroda  $a$ , za  $r=150$  m

Na idućoj slici, 8.74. prikazan je model cilindar i polukugla, radijusa 150 m s prisustvom cilindra u gornjem sloju tla kada je okomit na elektrode. U skladu sa zadatkom diplomskog rada dodana je lokalna heterogenost u gornjem sloju tla koja se modelirala kao cilindar, taj cilindar radijusa je 120 m, te njegova debljina iznosi 0.5 m. Koordinate su iznosile 3, -60, -1.5. Koordinate mogu imati i drugačiji redosljed, bitno je samo da je cilindar okomit na elektrode.

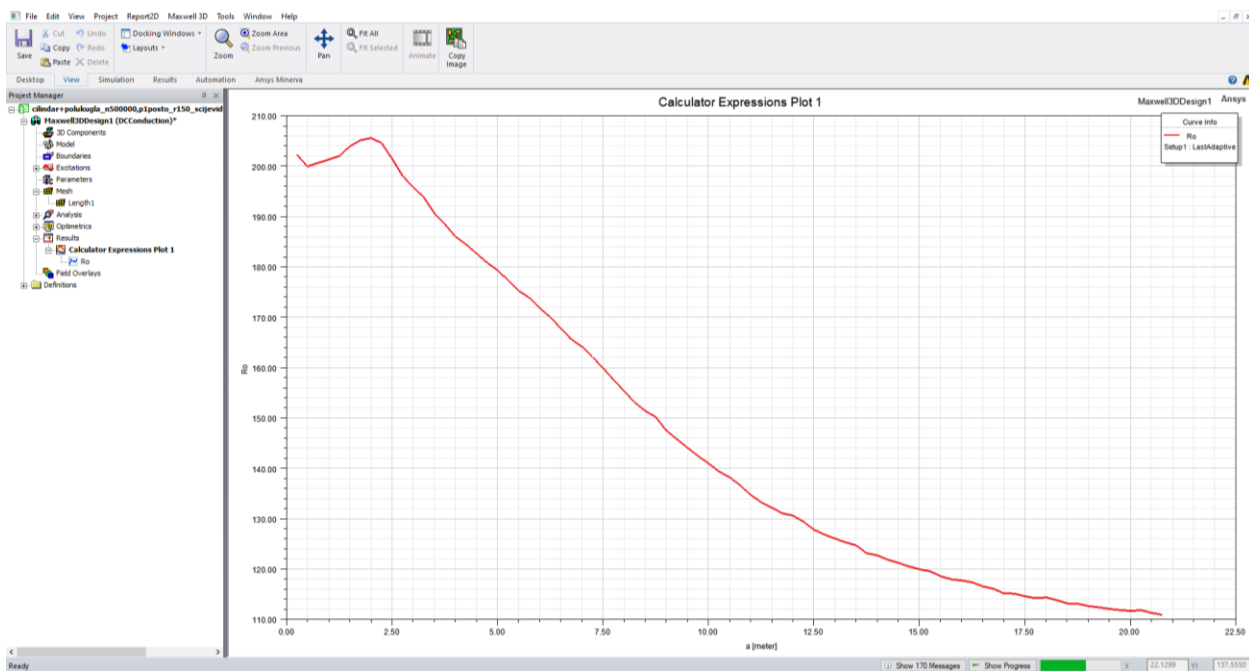
Za prvu simulaciju otpornost gornjeg sloja tla 200  $\Omega$ m, debljina 5 m, otpornost donjeg sloja tla 100  $\Omega$ m, proračunska domena (engl. *computational domain*) je izdijeljena na 500 000 elemenata, a kriterij zaustavljanja proračuna kada promjena rezultata postane manja od 1%. Rezultati prve simulacije prikazani su na slici 8.75.

Druga simulacija je za: otpornost gornjeg sloja tla 100  $\Omega$ m, debljine 5 m, otpornost donjeg sloja tla 200  $\Omega$ m, proračunska domena (engl. *computational domain*) je izdijeljena na 500 000 elemenata, a kriterij zaustavljanja proračuna kada promjena rezultata postane manja od 1%. Model je prikazan na slici 8.76. dok su rezultati druge simulacije prikazani su na slici 8.77.

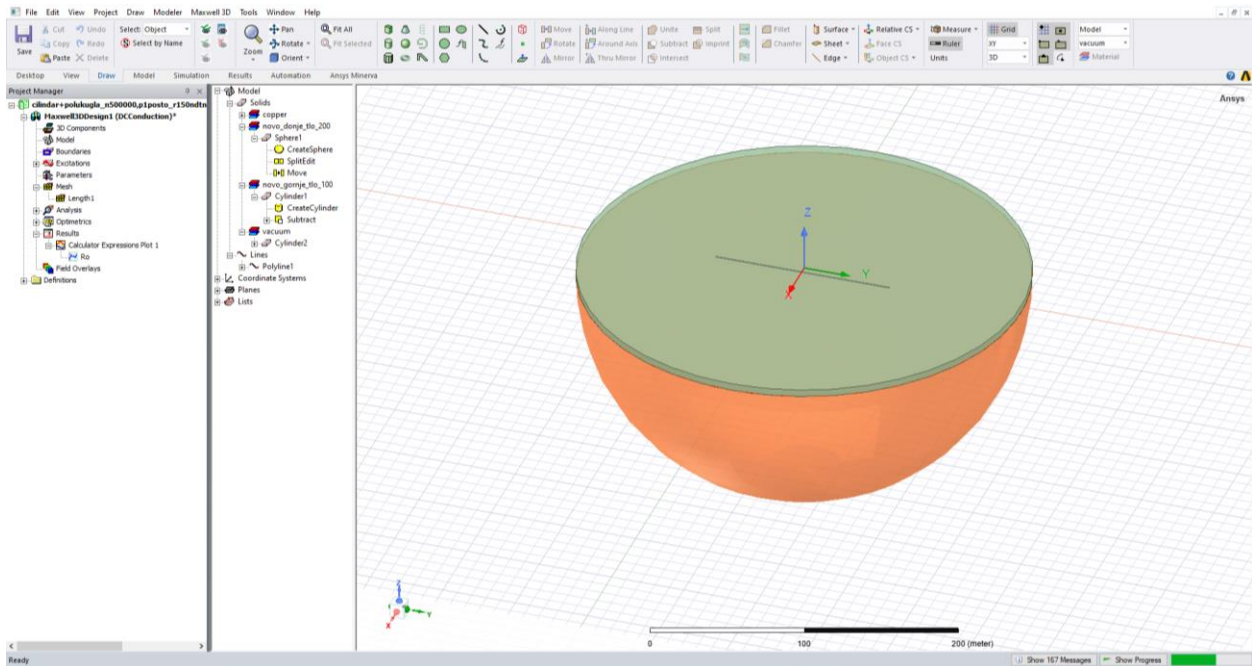
Kao rezultat ove simulacije utvrđeno je da kada se cilindar postavi u gornji sloj tla i okomit je na elektrode koje se nalaze u gornjem sloju tla, on ima značajnu ulogu na promjenu rezultata te je rezultat vidno drugačiji nego kada nema prisustva cilindra u gornjem sloju tla, vide se numerički artefakti u prvom dijelu grafa. Na slikama 8.75. i 8.77. vidljivo je kako mjerenje nije dovršeno do kraja, razlog tome je da je ANSYS vrlo zahtjevan program za računala, može doći do blokiranja i zamrzavanja računala, upravo to se ovdje dogodilo. Ovo mjerenje prema procjeni trajalo bi više od 15-ak sati. No iako rezultat nije odrađen do kraja jasno se može vidjeti kako krivulja konvergira, a ne divergira kao što je bio slučaj za simulacija kada je radijus bio 120 m i 150 m.



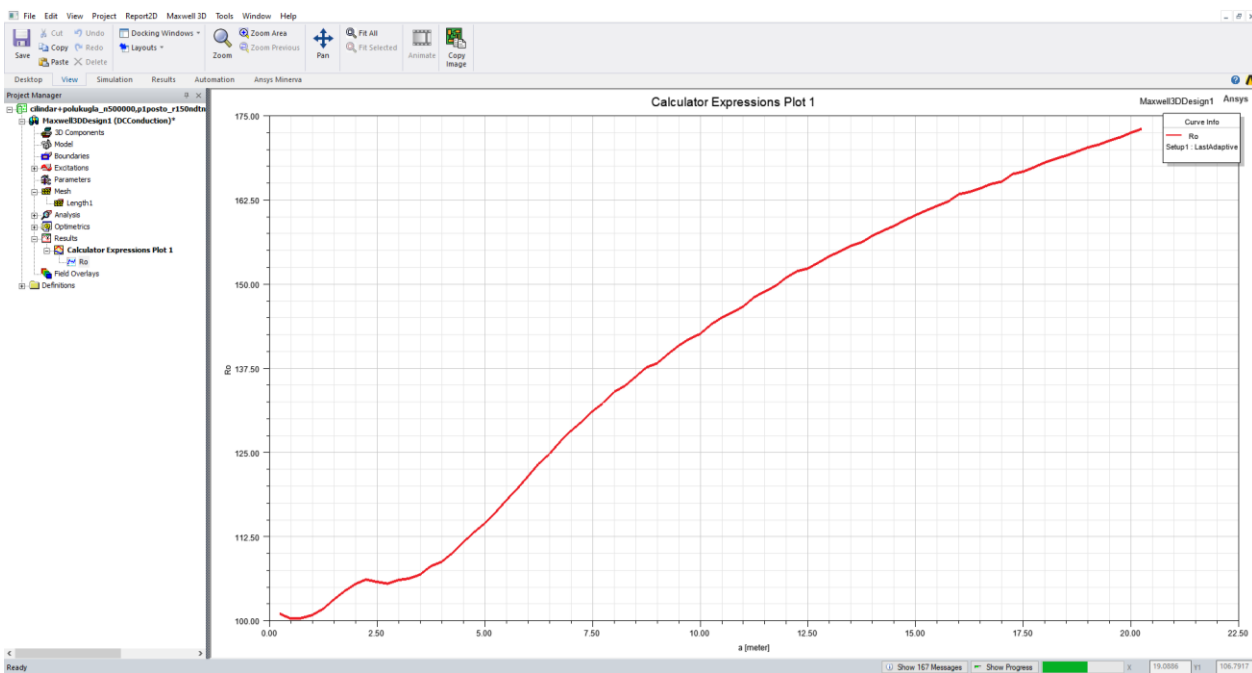
Slika 8.74. Model polukugle i cilindra za radijus 150 m, uz prisustvo okomitog cilindra u gornjem sloju tla



Slika 8.75. Promjena prividnog otpora tla u funkciji razmaka elektroda  $a$ , za  $r=150$  m



Slika 8.76. Model polukugle i cilindra za radijus 150 m, uz prisustvo okomitog cilindra u gornjem sloju tla



Slika 8.77. Promjena prividnog otpora tla u funkciji razmaka elektroda  $a$ , za  $r=150$  m

Također, zbog sporosti provođenja simulacija koje su trajale u prosjeku 5-6h provedeno je istraživanje promjene modela koje bi ubrzao proračun sa što manjim utjecajem na točnost. U tu svrhu dvoslojno je tlo modelirano s dva cilindra. Broj konačnih elemenata je pola milijuna elemenata s istim kriterijem zaustavljanja, kada promjena rezultata između uzastopnih iteracija bude manja od 1% [17]. U tablici 8.2. prikazane su dobivene vrijednosti dobivene za model „dva cilindra“, koje će biti objašnjene detaljno kasnije u radu.

**Tablica 8.2.** Usporedba modela cilindar i cilindar za različite vrijednosti

OPIS MODELA	OTPORNOST TLA ( $\Omega$ m)	RADIJUS (r)	BROJ ELEMENATA (n)	KRITERIJ ZAUSTAVLJANJA (p%)	TRAJANJE PRORAČUNA (h)	KOMENTAR
GORNJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDRA, DONJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDRA	GORNJI SLOJ TLA: 200 DONJI SLOJ TLA:100	80	500 000	1	1h i 49min	Divergira za $a=17.5$ m
GORNJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDRA, DONJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDRA	GORNJI SLOJ TLA: 100 DONJI SLOJ TLA:200	80	500 000	1	2h i 1min	Ponaša se kao pravac
GORNJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDRA _OKOMITO DODAN CILINDAR NA ELEKTRODE, DONJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDRA	GORNJI SLOJ TLA: 200 DONJI SLOJ TLA:100	80	500 000	1	3h i 40 min	Divergira za $a=17.5$ m
GORNJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDRA _OKOMITO DODAN CILINDAR NA ELEKTRODE, DONJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDRA	GORNJI SLOJ TLA: 100 DONJI SLOJ TLA:200	80	500 000	1	3h i 34min	Ponaša se kao pravac
GORNJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDRA, DONJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDRA	GORNJI SLOJ TLA: 200 DONJI SLOJ TLA:100	120	500 000	1	3h i 14min	Divergira za $a=22.5$ m
GORNJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDRA, DONJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDRA	GORNJI SLOJ TLA: 100 DONJI SLOJ TLA:200	120	500 000	1	3h i 17min	Ponaša se kao pravac



<b>GORNJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDRA _OKOMITO DODAN CILINDAR NA ELEKTRODE, DONJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDRA</b>	GORNJI SLOJ TLA: 200  DONJI SLOJ TLA:100	120	500 000	1	4h i 58min	Divergira za $a=17$ m
<b>GORNJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDRA _OKOMITO DODAN CILINDAR NA ELEKTRODE, DONJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDRA</b>	GORNJI SLOJ TLA: 100  DONJI SLOJ TLA:200	120	500 000	1	4h i 58min	Ponaša se kao pravac
<b>GORNJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDRA, DONJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDRA</b>	GORNJI SLOJ TLA: 200  DONJI SLOJ TLA:100	150	500 000	1	6h i 4 min	Divergira za $a=25$ m
<b>GORNJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDRA, DONJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDRA</b>	GORNJI SLOJ TLA: 100  DONJI SLOJ TLA:200	150	500 000	1	4h i 53min	Vidljiva točka infleksije
<b>GORNJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDRA _PARALELNO DODAN CILINDAR NA ELEKTRODE, DONJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDRA</b>	GORNJI SLOJ TLA: 200  DONJI SLOJ TLA:100	150	500 000	1	6h i 42min	Divergira za $a=27$ m
<b>GORNJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDRA _PARALELNO DODAN CILINDAR NA ELEKTRODE, DONJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDRA</b>	GORNJI SLOJ TLA: 100  DONJI SLOJ TLA:200	150	500 000	1	6h i 48min	Vidljiva točka infleksije
<b>GORNJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDRA _OKOMITO DODAN CILINDAR NA ELEKTRODE, DONJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDRA</b>	GORNJI SLOJ TLA: 200  DONJI SLOJ TLA:100	150	500 000	1	6h i 43min	Divergira za $a=27$ m
<b>GORNJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDRA _OKOMITO DODAN CILINDAR NA ELEKTRODE, DONJI</b>	GORNJI SLOJ TLA: 100  DONJI SLOJ TLA:200	150	500 000	1	7h i 1min	Vidljiva točka infleksije

SLOJ TLA OBLIKA CILINDRA						
-----------------------------	--	--	--	--	--	--

Za ovu simulaciju modela cilindar cilindar, radijus iznosi 80 m.

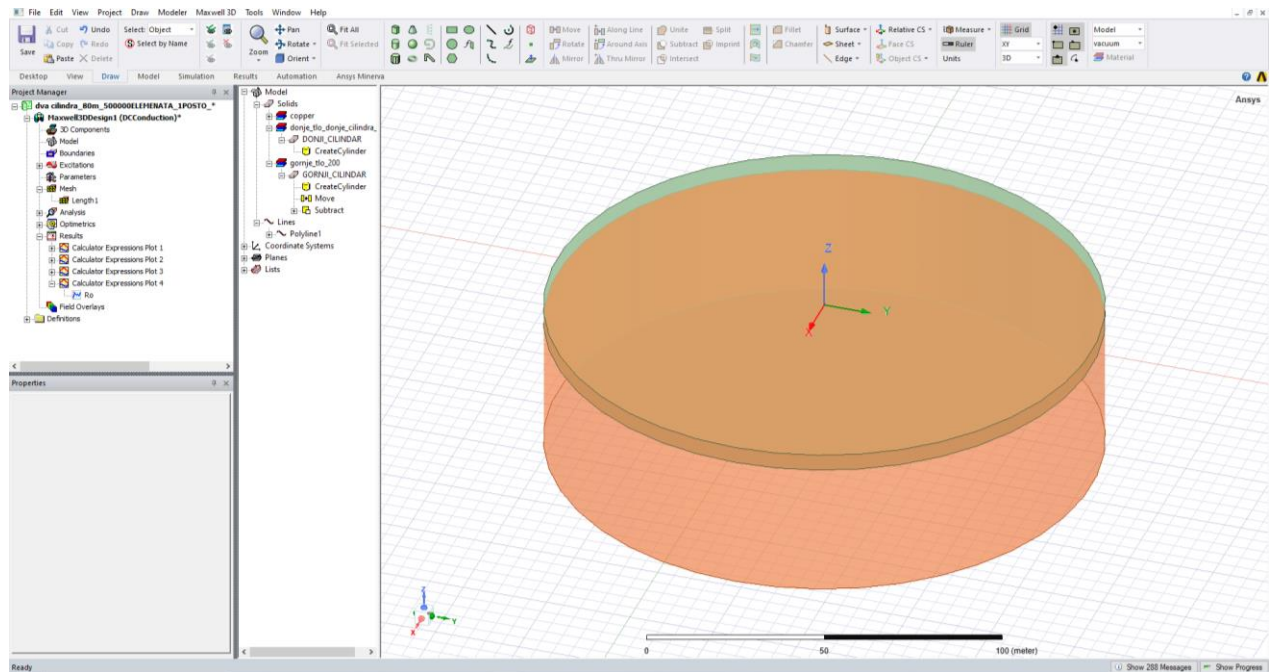
Prva simulacija za: otpornost gornjeg sloja tla 200  $\Omega$ m, debljina sloj iznosa 5 m, otpornost donjeg sloja tla 100  $\Omega$ m, proračunska domena (engl. *computational domain*) je izdijeljena na 500 000 elemenata, a kriterij zaustavljanja proračuna kada promjena rezultata postane manja od 1%. Model je prikazan na slici 8.78., rezultati prve simulacije prikazani su na slici 8.79.

Druga simulacija za: otpornost gornjeg sloja tla 100  $\Omega$ m, debljine 40 m, otpornost donjeg sloja tla 200  $\Omega$ m, proračunska domena (engl. *computational domain*) je izdijeljena na 500 000 elemenata, a kriterij zaustavljanja proračuna kada promjena rezultata postane manja od 1%. Model je prikazan na slici 8.80., a rezultati druge simulacije prikazani su na slici 8.81.

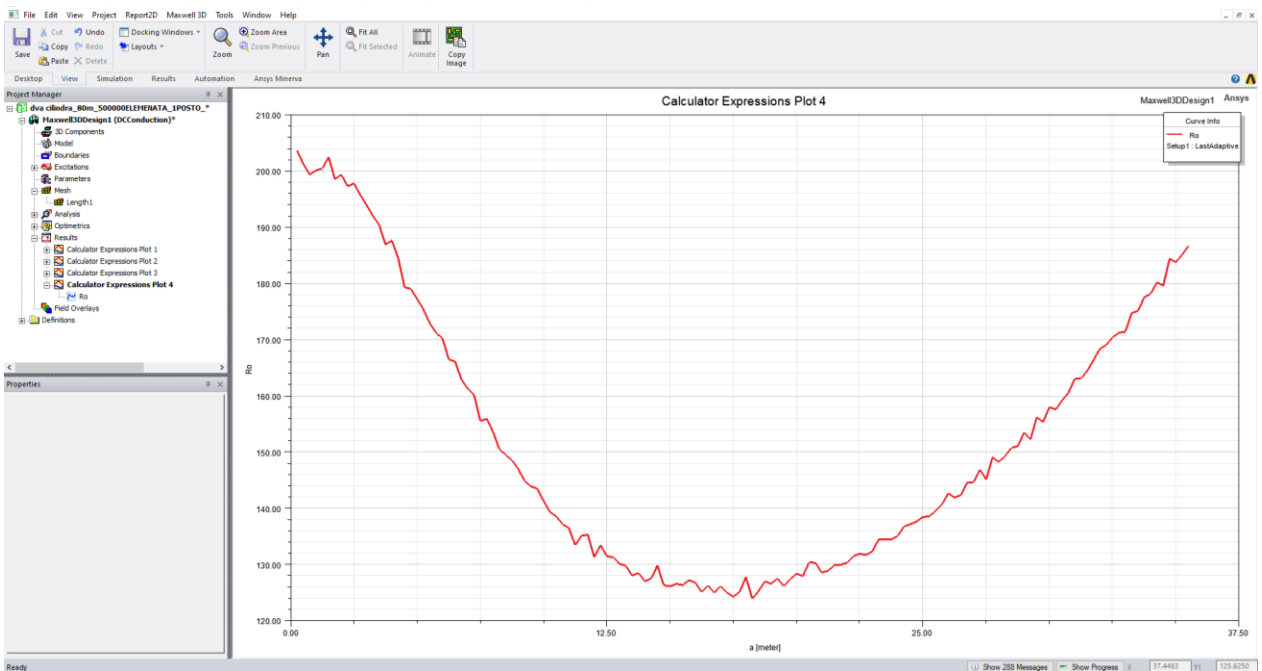
Kao rezultati ovih simulacija vidljivo je da je za isti radijus (kao u slučaju modela cilindar i polukugla,  $r=80$  m), isti broj konačnih elemenata te za isti kriterij zaustavljanja vrijeme trajanja simulacija ubrzano i do više od sat vremena, to se dogodilo zato što ANSYS kao program brže i bolje računa kada je ista geometrija, znači kada nema oštih bridova i rubova, u ovom slučaju bila su dva cilindra. Iako je rezultat brže izračunat vidljivo je kako rezultat nije zadovoljavajući, početne brojčane vrijednosti na obje slike su u skladu s teorijskim predviđanjima jer odgovaraju brojčanim vrijednostima otpornosti gornjega tla, no daljnji tok funkcije ne odgovara teorijskom predviđanju.

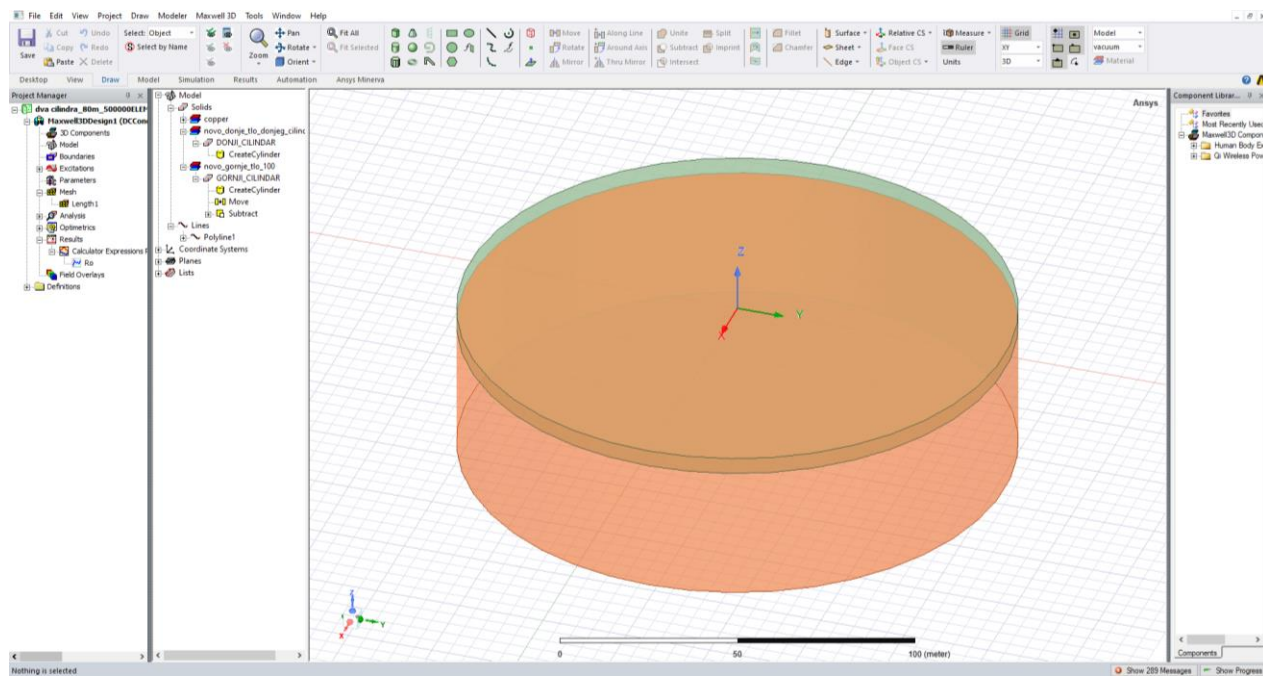
Isti takav slučaj je i kada je zamijenjena vrijednost gornjeg i donjeg tla, krivulja nema izraženu točku infleksije i ponaša se kao da je pravac.

Kao što se može zaključiti iz tablice 8.2. dobivene simulacije nisu bile vremenski efektivnije u odnosu na model cilindar i polukugla, može se vidjeti da su više-manje isto vremenski zahtijevale.

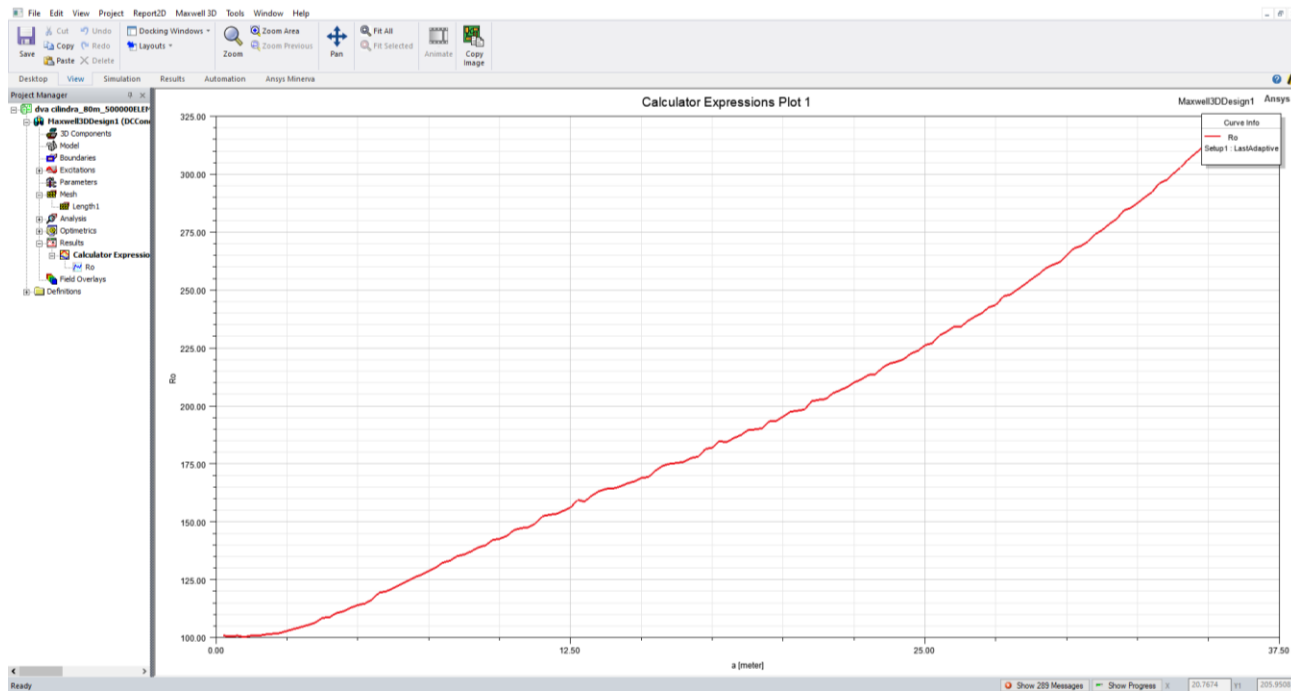


Slika 8.78. Model cilindra i cilindra za radijus 80 m

Slika 8.79. Promjena prividnog otpora tla u funkciji razmaka elektroda  $a$ , za  $r=80$  m



Slika 8.80. Model cilindra i cilindra radijusa 80 m

Slika 8.81. Promjena prividnog otpora tla u funkciji razmaka elektroda  $a$ , za  $r=80$  m

Za ovu simulaciju modela cilindar cilindar, radijus iznosi 80 m.

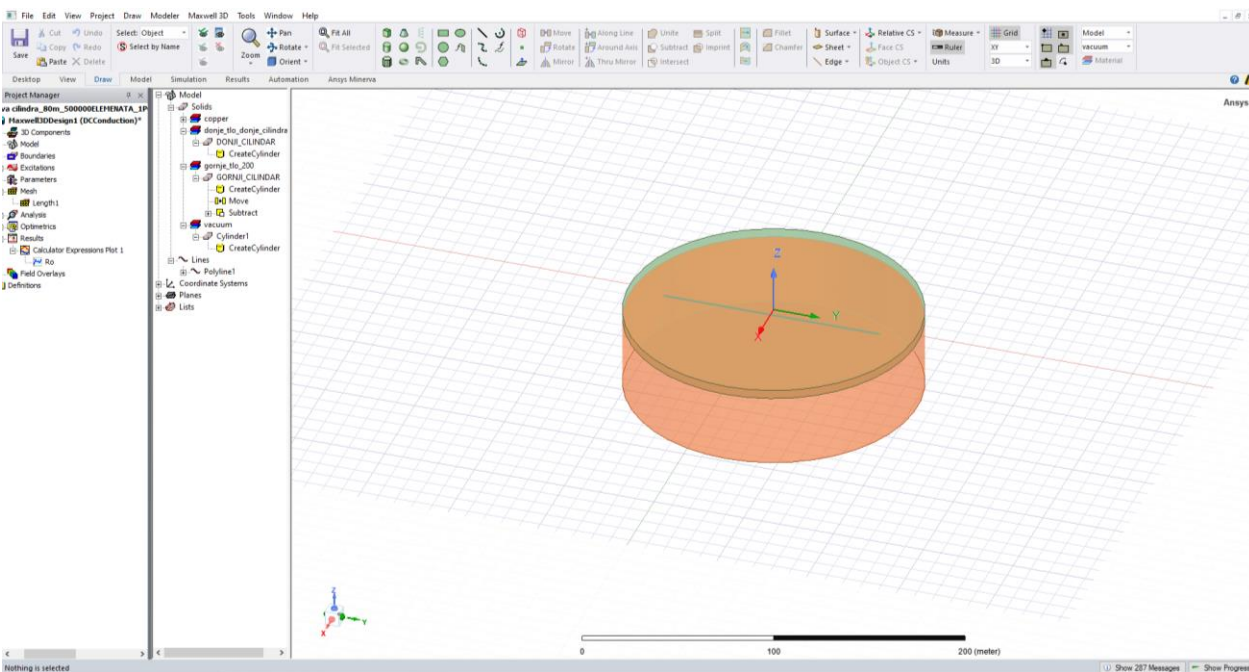
U skladu sa zadatkom diplomskog rada dodana je lokalna heterogenost u gornjem sloju tla koja se modelirala kao cilindar, taj cilindar radijusa je 120 m, te njegova debljina iznosi 0.5 m. Koordinate su iznosile 3, -60, -1.5. Koordinate mogu imati i drugačiji redoslijed, bitno je samo da je cilindar okomit na elektrode.

Rezultat je nezadovoljavajući, ali uz prikazane ostale simulacije kasnije u radu daje odličnu usporedbu da radijus ima veliki utjecaj na rezultat.

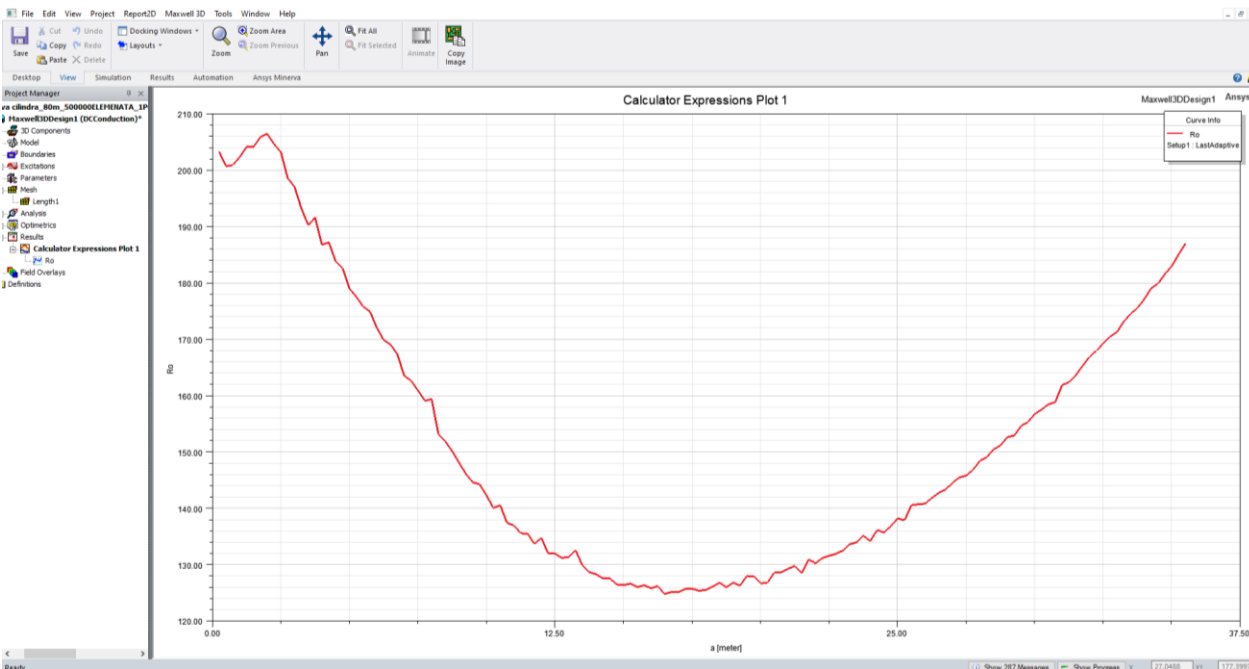
Prva simulacija za: otpornost gornjeg sloja tla 200  $\Omega\text{m}$ , debljina sloj iznosa 5 m, otpornost donjeg sloja tla 100  $\Omega\text{m}$ , proračunska domena (engl. *computational domain*) je izdijeljena na 500 000 elemenata, a kriterij zaustavljanja proračuna kada promjena rezultata postane manja od 1%. Model je prikazan na slici 8.82., dok su rezultati prve simulacije prikazani na slici 8.83.

Druga simulacija za: otpornost gornjeg sloja tla 100  $\Omega\text{m}$ , debljine 40 m, otpornost donjeg sloja tla 200  $\Omega\text{m}$ , proračunska domena (engl. *computational domain*) je izdijeljena na 500 000 elemenata, a kriterij zaustavljanja proračuna kada promjena rezultata postane manja od 1%. Model je prikazan na slici 8.84., a rezultati druge simulacije prikazani su na slici 8.85.

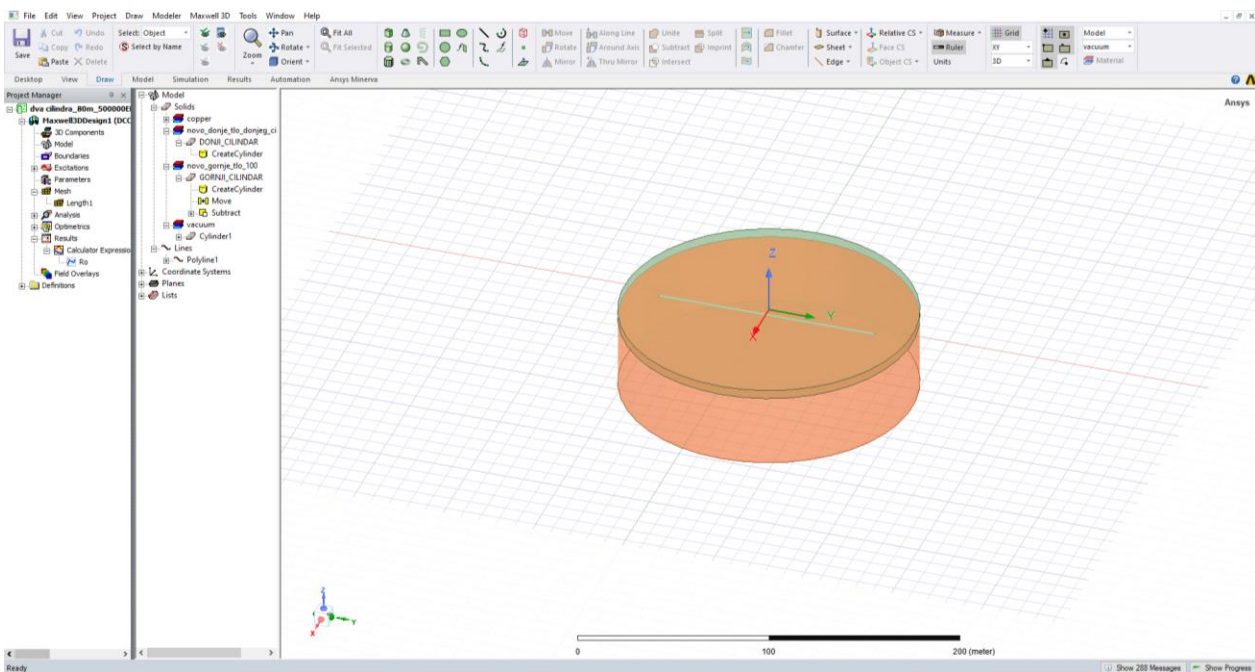
Kao i u simulaciji kada nije bio dodan cilindar u gornjem sloju tla pa tako i u ovoj kada je prisutan jasno se može vidjeti kako krivulja divergira za rezultat kada je iznos otpornosti gornjeg tla 200  $\Omega\text{m}$ , odnosno kreće se kao pravac kada je iznos otpornosti donjeg tla 100  $\Omega\text{m}$ .



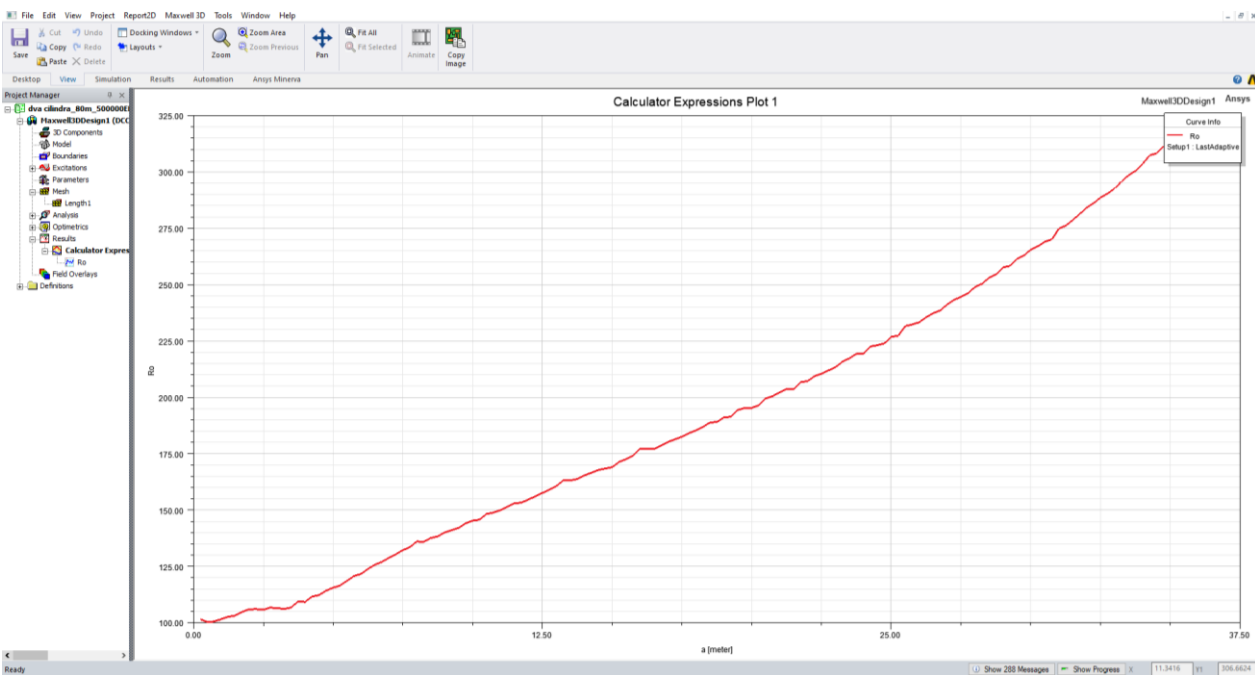
Slika 8.82. Model cilindra i cilindra za radijus 80 m, uz prisustvo okomitog cilindra u gornjem sloju tla



Slika 8.83. Promjena prividnog otpora tla u funkciji razmaka elektroda  $a$ , za  $r=80$  m



Slika 8.84. Model cilindra i cilindra za radijus 80 m, uz prisustvo okomitog cilindra u gornjem sloju tla



Slika 8.85. Promjena prividnog otpora tla u funkciji razmaka elektroda  $a$ , za  $r=80$  m

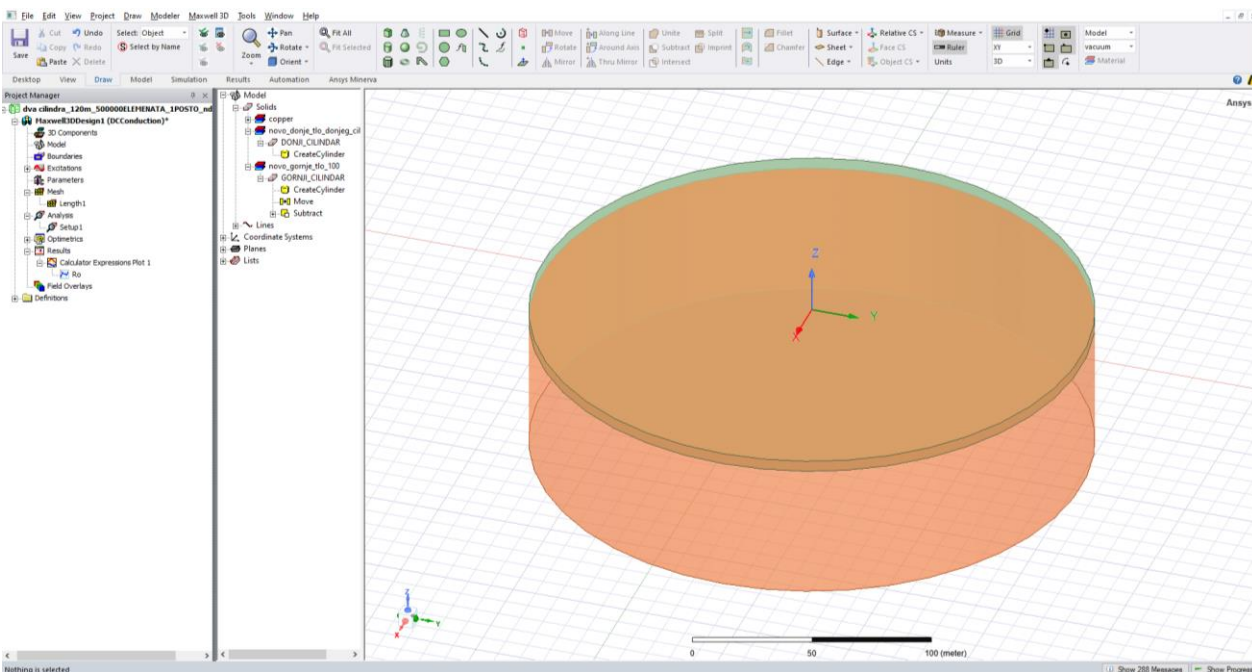
Za ovu simulaciju modela cilindar cilindar, radijus iznosi 120 m.

Prva simulacija je za: otpornost gornjeg sloja tla  $200 \Omega\text{m}$ , debljina sloj iznosa 5 m, otpornost donjeg sloja tla  $100 \Omega\text{m}$ , proračunska domena (engl. *computational domain*) je izdijeljena na 500 000 elemenata, a kriterij zaustavljanja proračuna kada promjena rezultata postane manja od 1%. Model je prikazan na slici 8.86., dok su rezultati prve simulacije prikazani na slici 8.87.

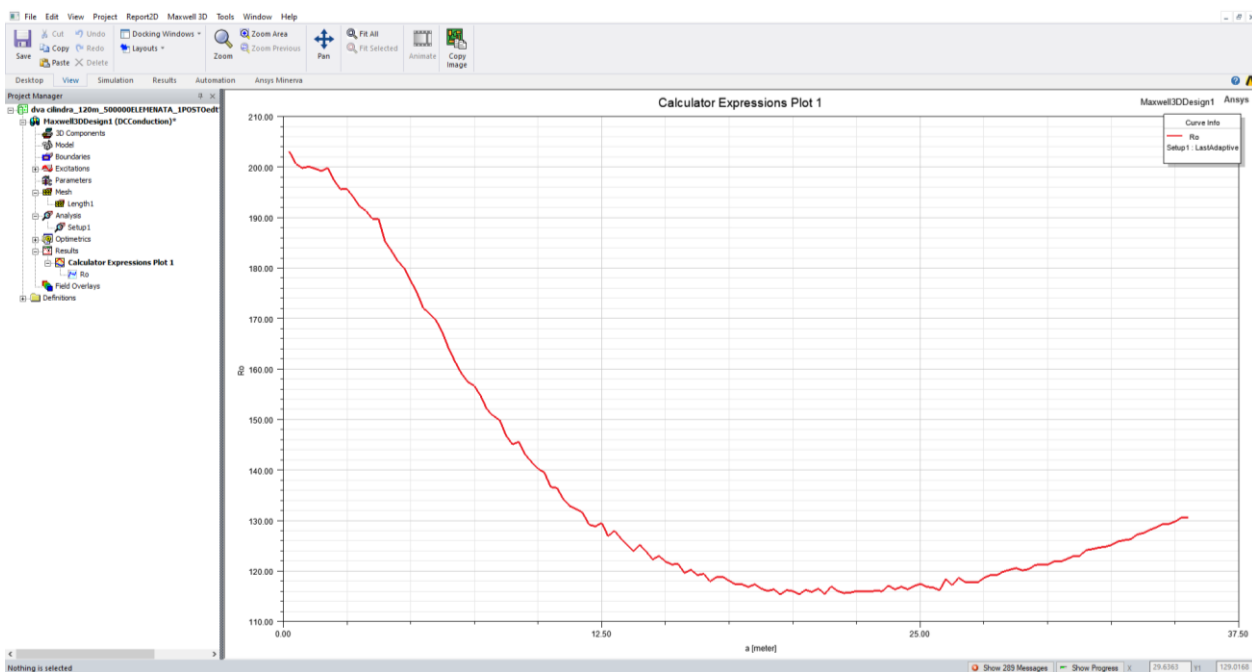
Druga simulacija za: otpornost gornjeg sloja tla  $100 \Omega\text{m}$ , debljine 60 m, otpornost donjeg sloja tla  $200 \Omega\text{m}$ , proračunska domena (engl. *computational domain*) je izdijeljena na 500 000 elemenata, a kriterij zaustavljanja proračuna kada promjena rezultata postane manja od 1%. Model je prikazan na slici 8.88., a rezultati druge simulacije prikazani su na slici 8.89.

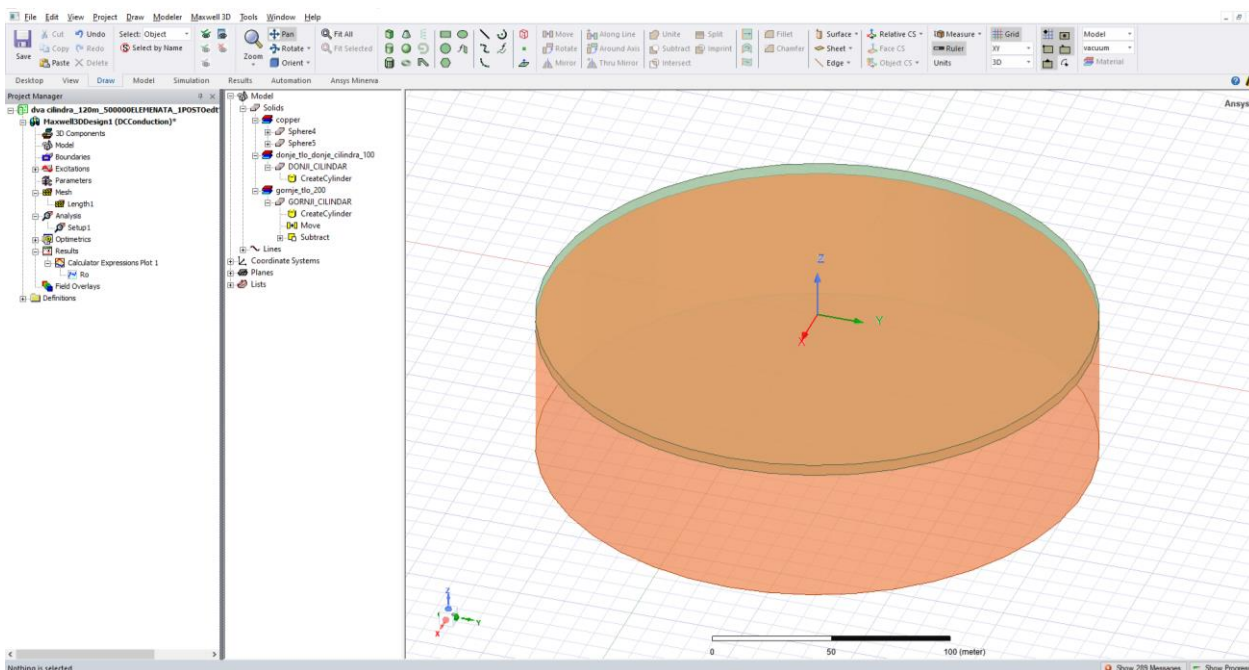
Kao rezultat ove simulacije jasno se može vidjeti kako krivulja divergira, ali tek za  $a=22.5$  m kada je iznos otpornosti gornjeg tla  $200 \Omega\text{m}$ , odnosno nije mu izražena točka infleksije kada je iznos otpornosti donjeg tla  $100 \Omega\text{m}$ . Ova simulacija je brža u odnosu na isti radijus kada model bila kombinacija cilindar i polukugla, no daje lošiji rezultat u smislu krivulja.



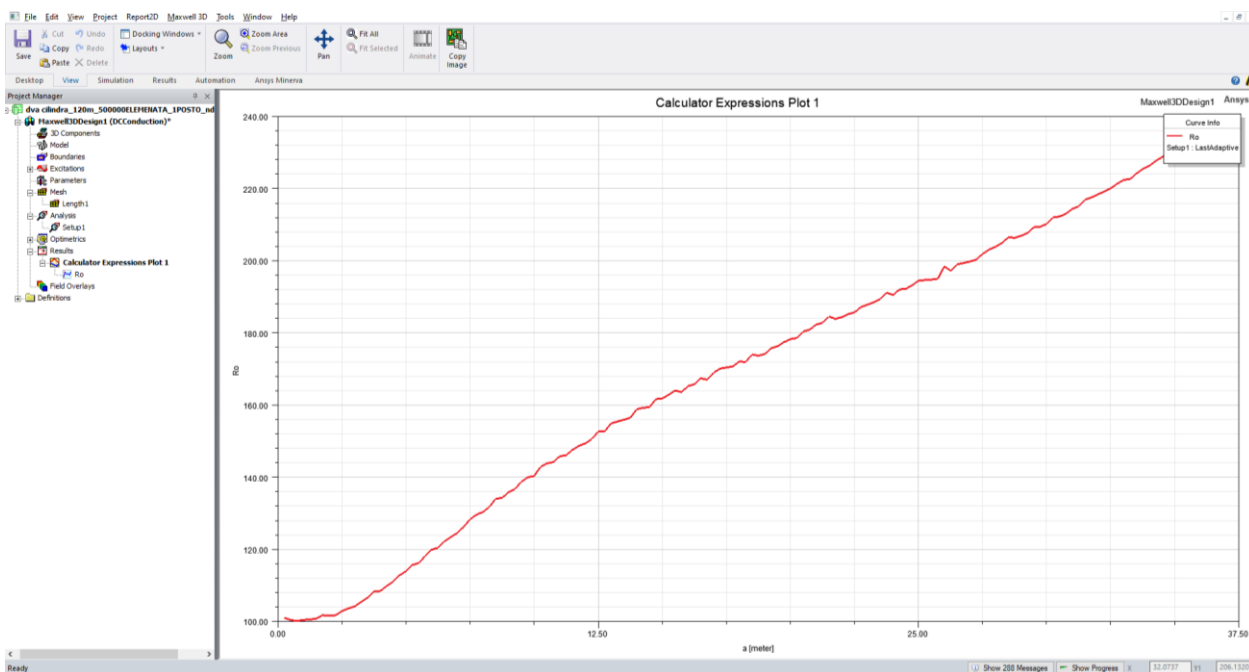


Slika 8.86. Model cilindra i cilindra radijusa 120 m

Slika 8.87. Promjena prividnog otpora tla u funkciji razmaka elektroda  $a$ , za  $r=120$  m



Slika 8.88. Model cilindra i cilindra radijusa 120 m



Slika 8.89. Promjena prividnog otpora tla u funkciji razmaka elektroda  $a$ , za  $r=120$  m

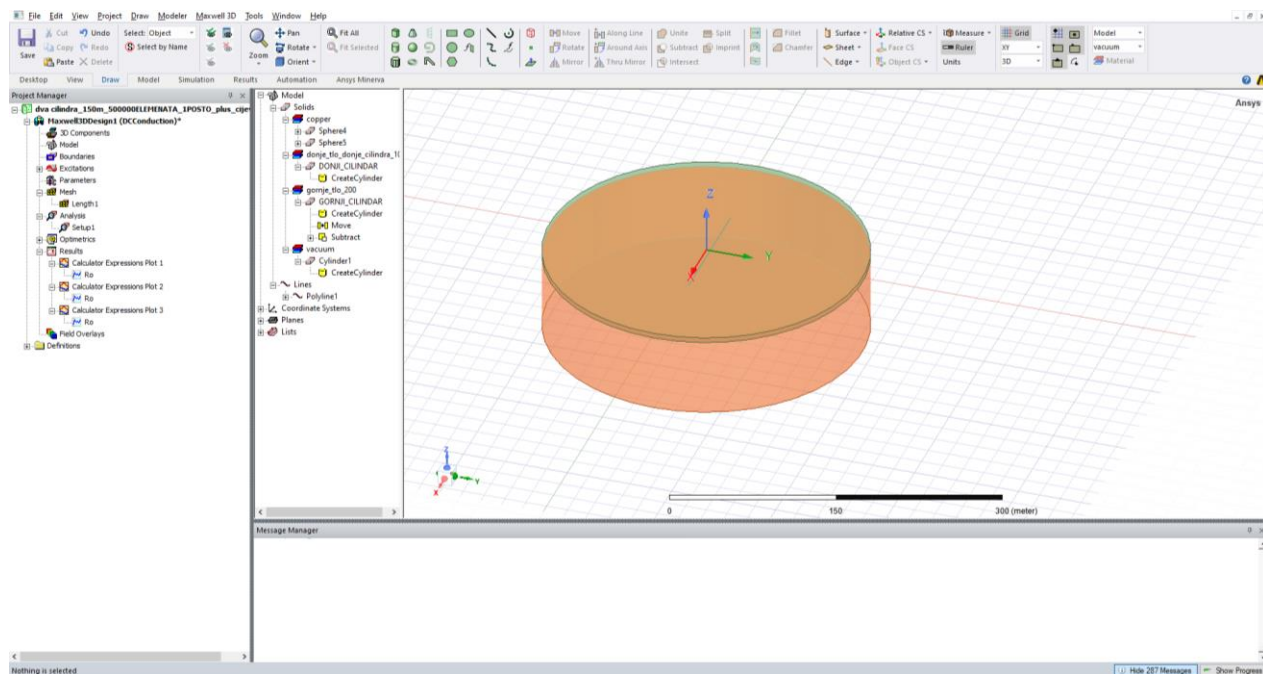
Za ovu simulaciju modela cilindar cilindar, radijus iznosi 150 m.

U skladu sa zadatkom diplomskog rada dodana je lokalna heterogenost u gornjem sloju tla koja se modelirala kao cilindar, taj cilindar radijusa je 120 m, te njegova debljina iznosi 0.5 m. Koordinate su iznosile 3, -60, -1.5. Koordinate mogu imati i drugačiji redosljed, bitno je samo da je cilindar okomit na elektrode. Radijus ovih cilindara iznosi 150 m.

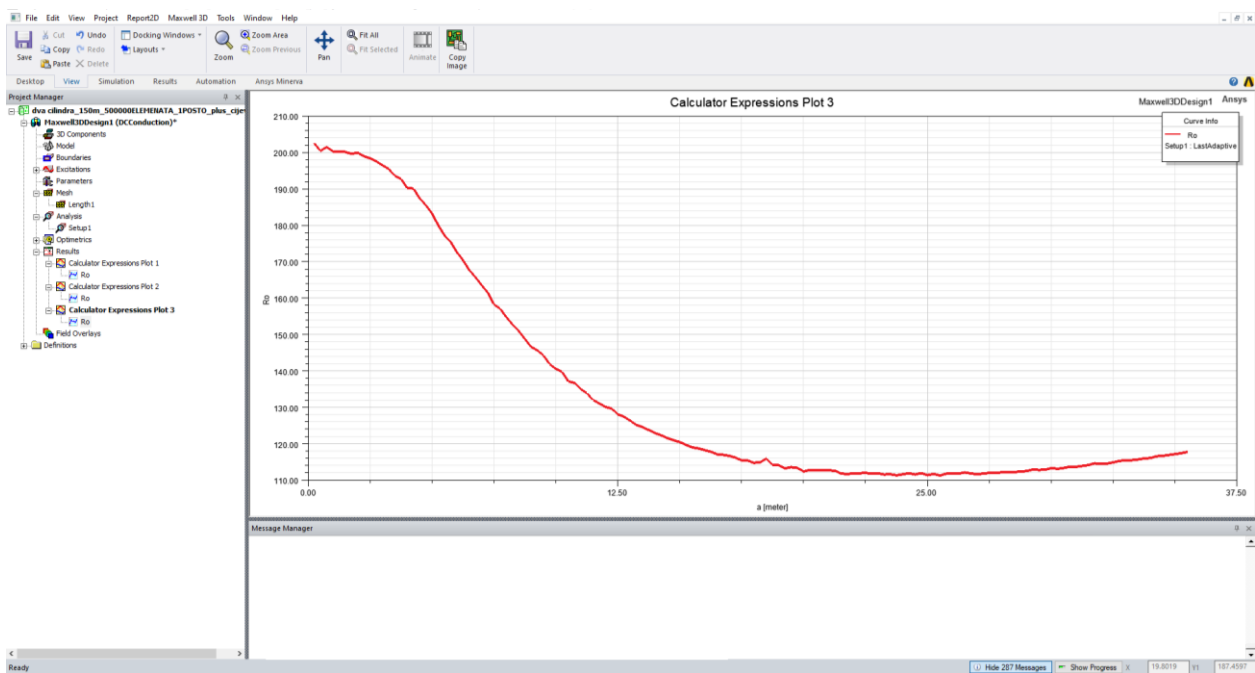
Prva simulacija je za: otpornost gornjeg sloja tla 200  $\Omega\text{m}$ , debljina sloj iznosa 5 m, otpornost donjeg sloja tla 100  $\Omega\text{m}$ , proračunska domena (engl. *computational domain*) je izdijeljena na 500 000 elemenata, a kriterij zaustavljanja proračuna kada promjena rezultata postane manja od 1%. Model je prikazan na slici 8.90., dok su rezultati prve simulacije prikazani na slici 8.91.

Druga simulacija za: otpornost gornjeg sloja tla 100  $\Omega\text{m}$ , debljine 75 m, otpornost donjeg sloja tla 200  $\Omega\text{m}$ , proračunska domena (engl. *computational domain*) je izdijeljena na 500 000 elemenata, a kriterij zaustavljanja proračuna kada promjena rezultata postane manja od 1%. Model je prikazan na slici 8.92., a rezultati druge simulacije prikazani su na slici 8.93.

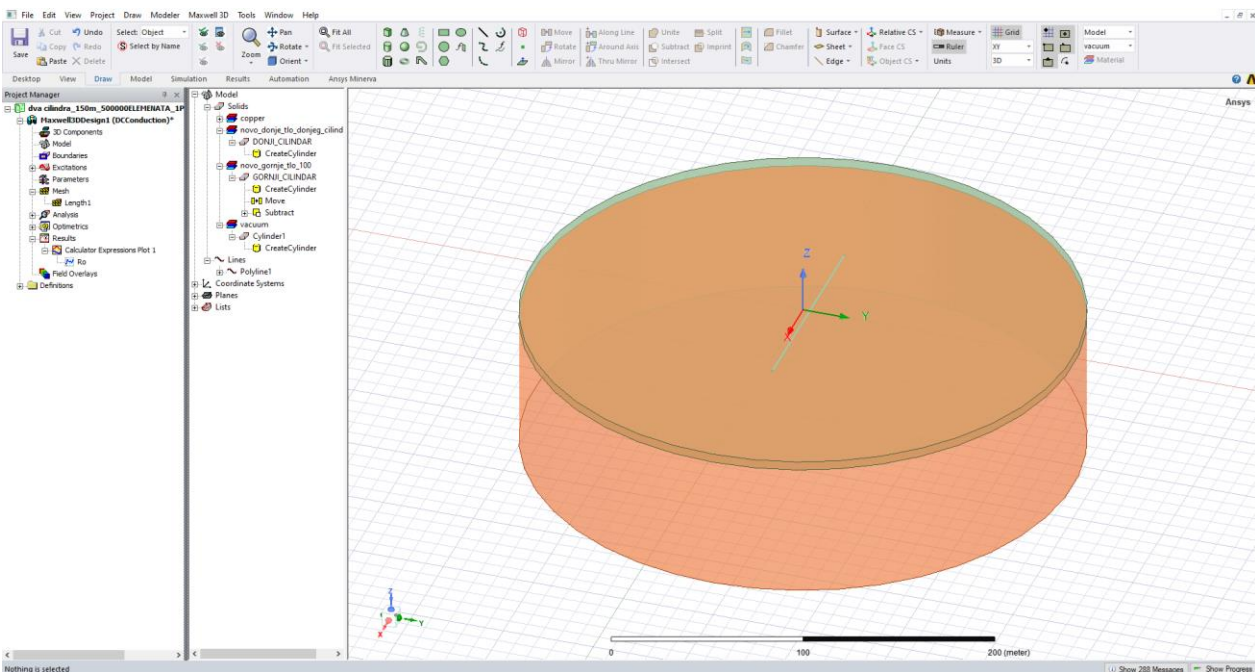
Kao i u simulaciji kada nije bio dodan cilindar u gornjem sloju tla pa tako i u ovoj kada je prisutan jasno se može vidjeti kako krivulja divergira, ali tek za  $a=27$  m kada je iznos otpornosti gornjeg tla 200  $\Omega\text{m}$ , odnosno izražena mu je točka infleksije kada je iznos otpornosti donjeg tla 100  $\Omega\text{m}$ . Isto tako vidljivo je da kada je cilindar paralelan s elektrodama nema značaj utjecaj na rezultat.



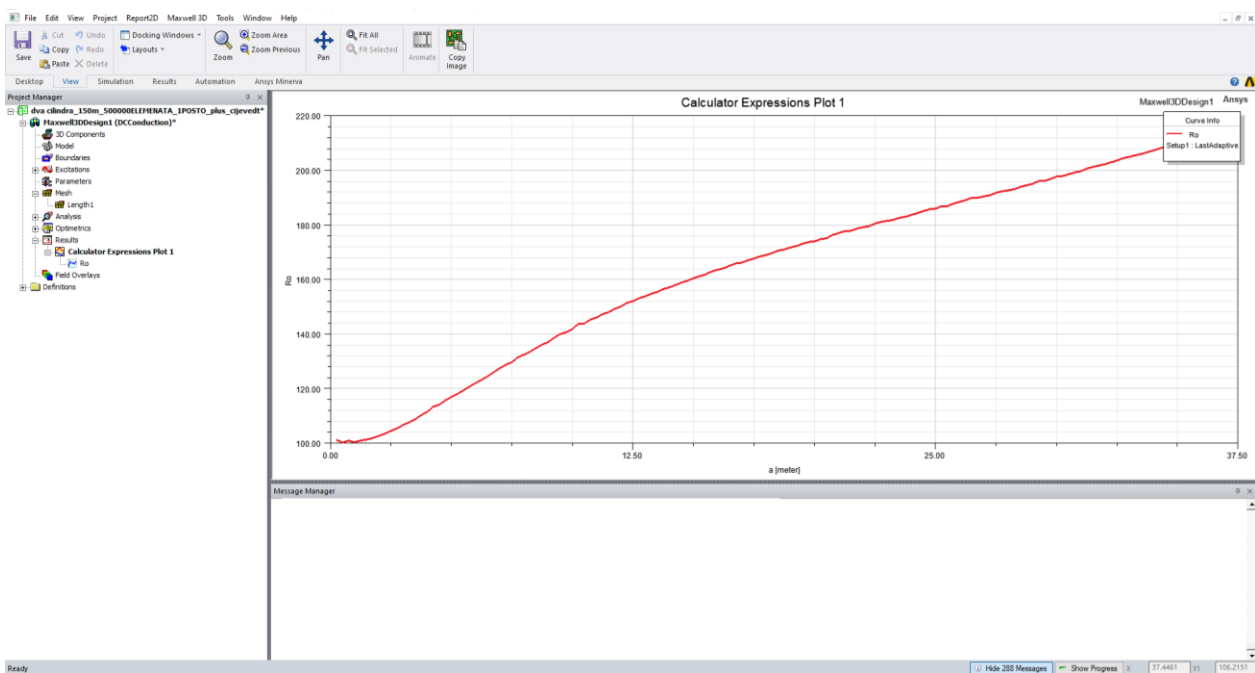
Slika 8.90. Model cilindra i cilindra za radijus 150 m, uz prisustvo paralelnog cilindra u gornjem sloju tla



Slika 8.91. Promjena prividnog otpora tla u funkciji razmaka elektroda  $a$ , za  $r=150$  m



Slika 8.92. Model cilindra i cilindra za radijus 150 m, uz prisustvo paralelnog cilindra u gornjem sloju tla



Slika 8.93. Promjena prividnog otpora tla u funkciji razmaka elektroda  $a$ , za  $r=150$  m

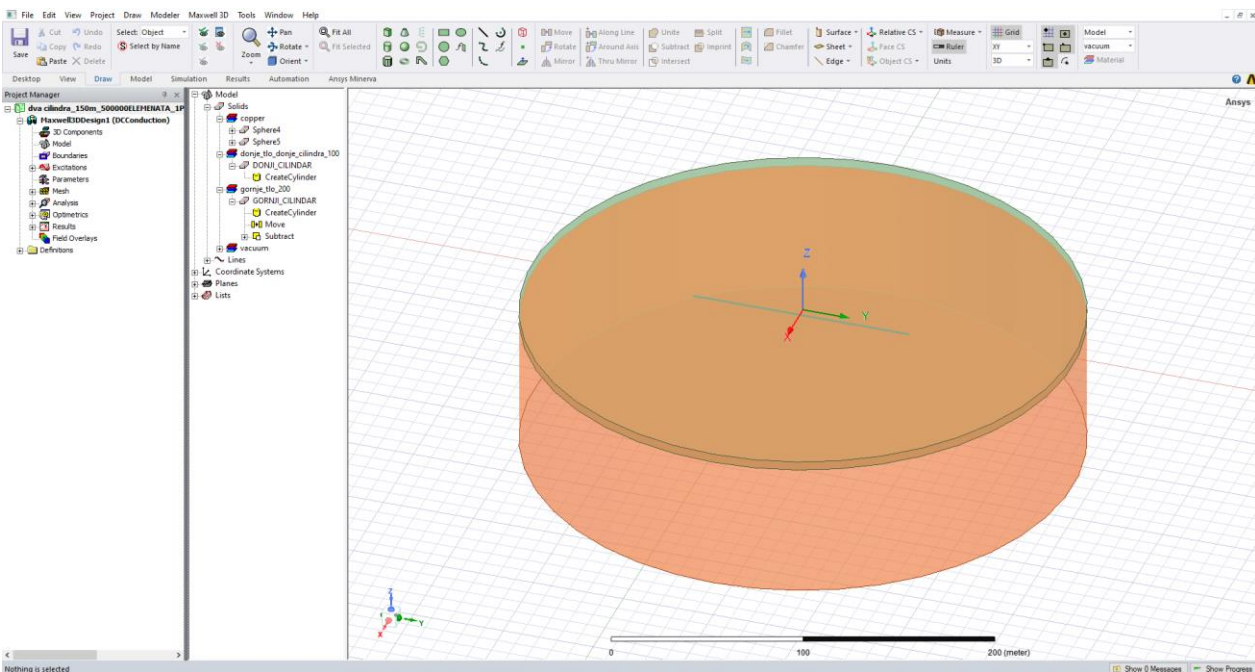
Za ovu simulaciju modela cilindar cilindar, radijus iznosi 150 m.

U skladu sa zadatkom diplomskog rada dodana je lokalna heterogenost u gornjem sloju tla koja se modelirala kao cilindar, taj cilindar radijusa je 120 m, te njegova debljina iznosi 0.5 m. Koordinate su iznosile 3, -60, -1.5. Koordinate mogu imati i drugačiji redosljed, bitno je samo da je cilindar okomit na elektrode.

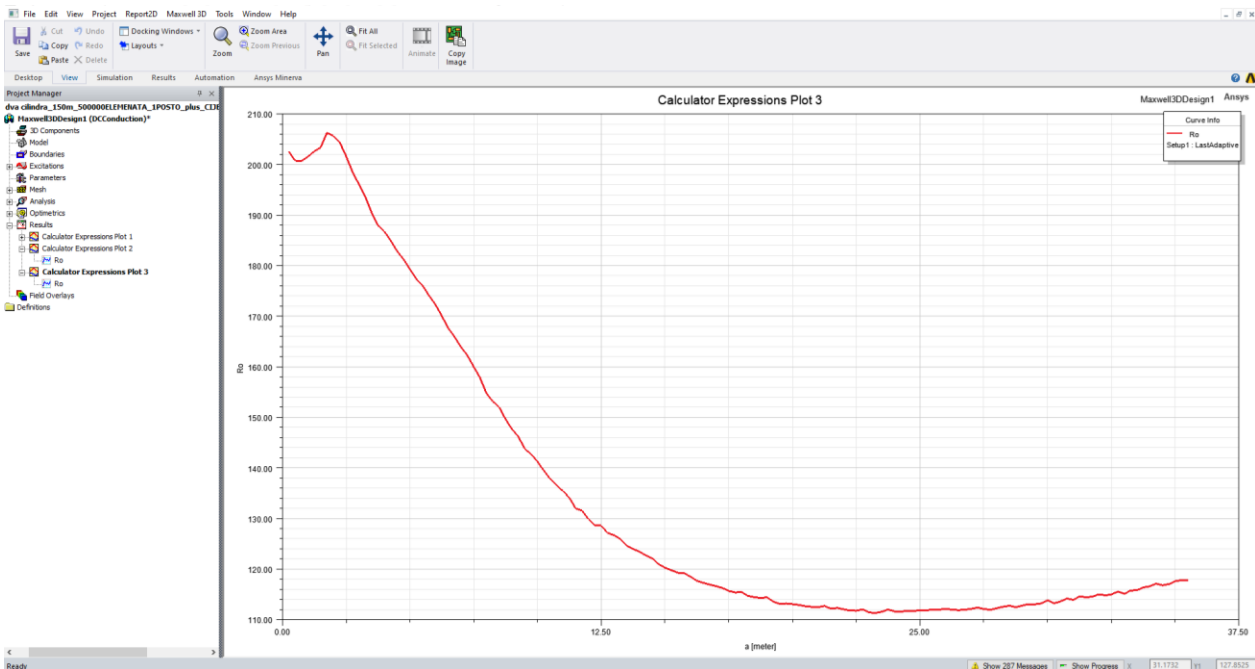
Prva simulacija za: otpornost gornjeg sloja tla 200  $\Omega\text{m}$ , debljina sloj iznosa 5 m, otpornost donjeg sloja tla 100  $\Omega\text{m}$ , proračunska domena (engl. *computational domain*) je izdijeljena na 500 000 elemenata, a kriterij zaustavljanja proračuna kada promjena rezultata postane manja od 1%. Model je prikazan na slici 8.94., dok su rezultati prve simulacije prikazani na slici 8.95.

Druga simulacija za: otpornost gornjeg sloja tla 100  $\Omega\text{m}$ , debljine 75 m, otpornost donjeg sloja tla 200  $\Omega\text{m}$ , proračunska domena (engl. *computational domain*) je izdijeljena na 500 000 elemenata, a kriterij zaustavljanja proračuna kada promjena rezultata postane manja od 1%. Model je prikazan na slici 8.96., a rezultati druge simulacije prikazani su na slici 8.97.

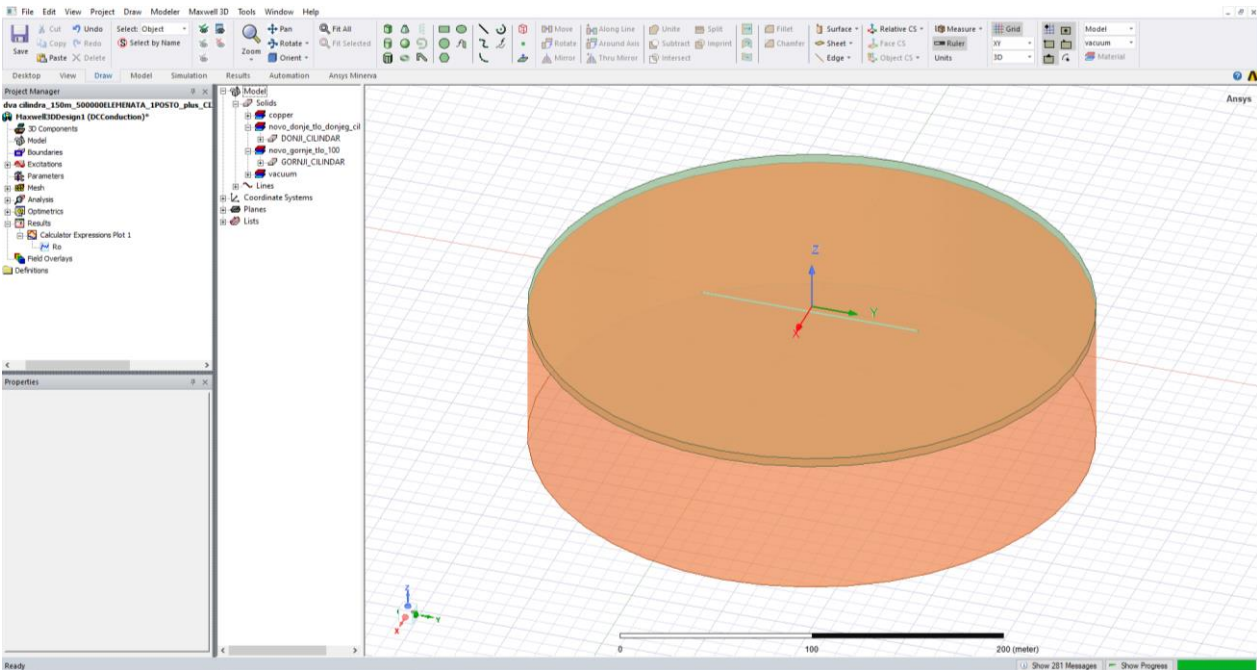
Kao i u simulaciji kada nije bio dodan cilindar u gornjem sloju tla pa tako i u ovoj kada je prisutan jasno se može vidjeti kako krivulja divergira za rezultat kada je iznos otpornosti gornjeg tla 200  $\Omega\text{m}$ , odnosno izražena mu je točka infleksije kada je iznos otpornosti donjeg tla 100  $\Omega\text{m}$ . Na grafovima je jasno izražena prisutnost lokalne heterogenosti u gornjem sloju tla. To se može uočiti kao izbočina u početku grafa.



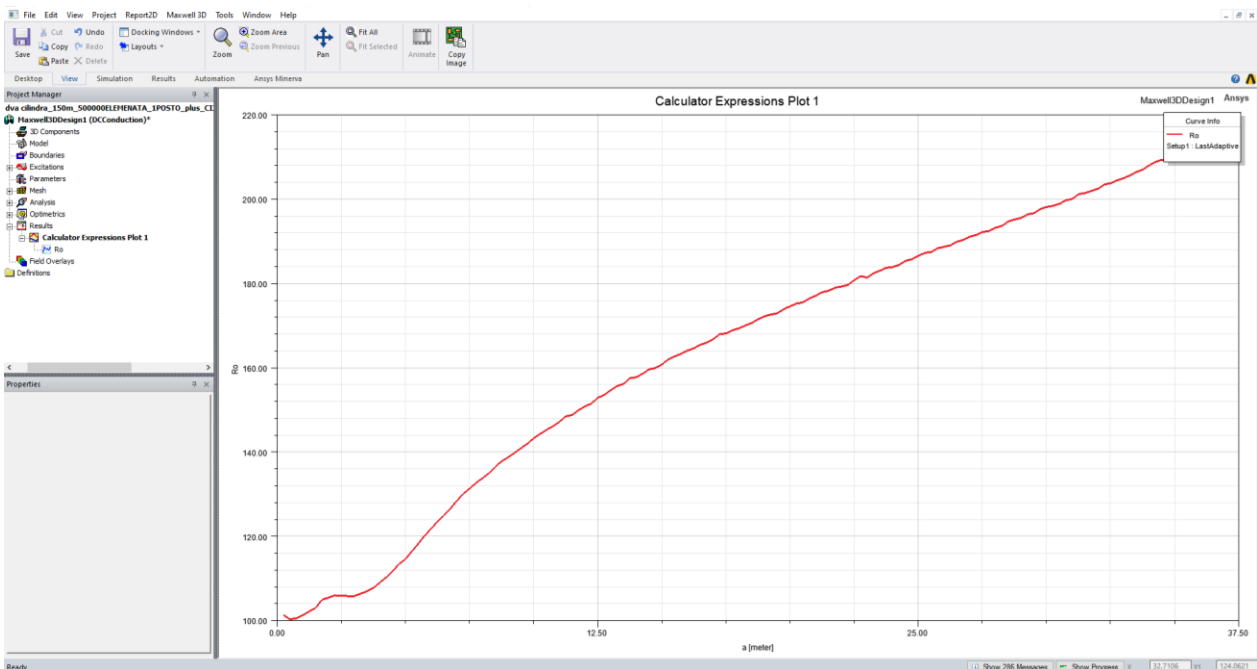
Slika 8.94. Model cilindra i cilindra za radijus 150 m, uz prisustvo okomitog cilindra u gornjem sloju tla



Slika 8.95. Promjena prividnog otpora tla u funkciji razmaka elektroda  $a$ , za  $r=150$  m



Slika 8.96. Model cilindra i cilindra za radijus 150 m, uz prisustvo okomitog cilindra u gornjem sloju tla



Slika 8.97. Promjena prividnog otpora tla u funkciji razmaka elektroda  $a$ , za  $r=150$  m



S obzirom da je trajanje ovih simulacija iznosilo 2-3h, kako bi se ubrzao proračun izrađen je novi modelu cilindar u cilindru gdje je unutarnjim cilindrima postavljeno, konačnih broj elemenata 400 000, a u vanjskim konačan broj elemenata 100 000, time je na umjetni način na razini modela ANSYS forsiran da preciznije računa u području gdje se izražajnije mijenjaju fizikalne veličine, a da se pri tome točnost proračuna ne mijenja. U tablici 8.3. prikazane su dobivene vrijednosti dobivene za model „cilindar u cilindru“, koje će biti objašnjene detaljno kasnije u radu.

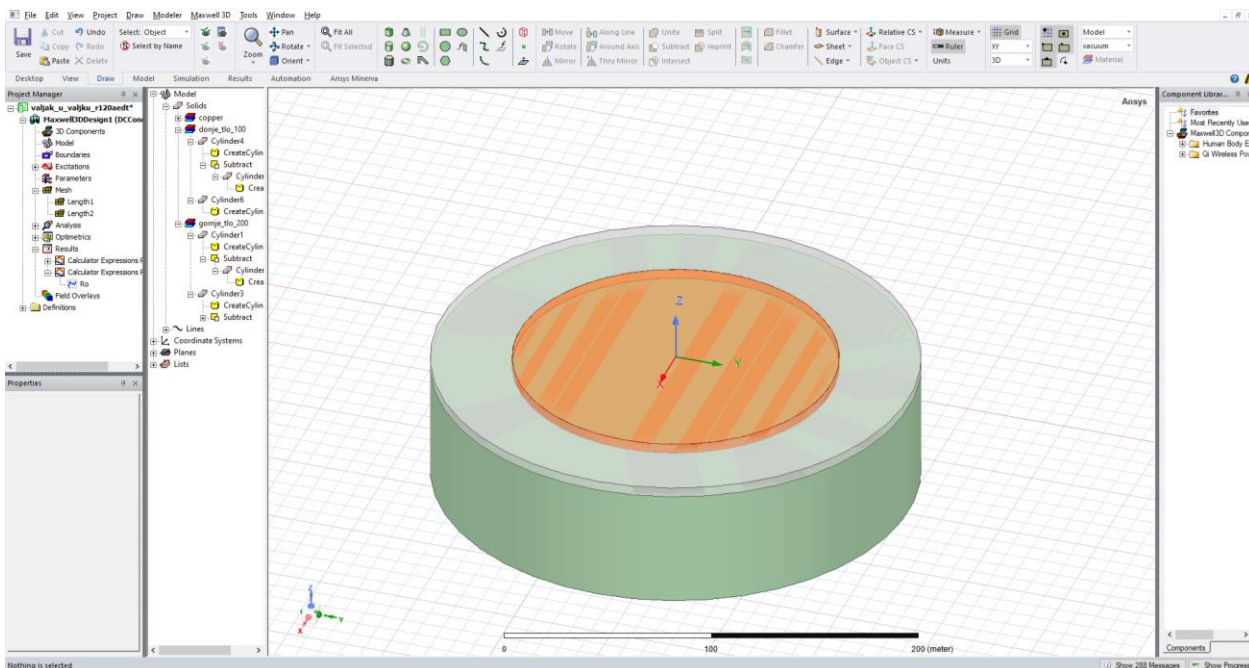
**Tablica 8.3.** Usporedba modela cilindar u cilindru za različite vrijednosti

OPIS MODELA	OTPORNOST TLA ( $\Omega m$ )	RADIJUS <sup>®</sup>	BROJ ELEMENATA (n)	KRITERIJ ZAUSTAVLJANJA (p%)	TRAJANJE PRORAČUNA (h)	KOMENTAR
GORNJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDAR U CILINDRU, DONJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDAR U CILINDRU	GORNJI SLOJ TLA: 200 DONJI SLOJ TLA:100	120	500 000	1	3h i 9min	Divergira nakon za a=22 m
GORNJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDAR U CILINDRU, DONJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDAR U CILINDRU	GORNJI SLOJ TLA: 100 DONJI SLOJ TLA:200	120	500 000	1	2h i 7min	Nakon a=12.5 m ponaša se kao pravac
GORNJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDAR U CILINDRU, DONJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDAR U CILINDRU	GORNJI SLOJ TLA: 200 DONJI SLOJ TLA:100	150	500 000	1	2h i 22min	Divergira nakon za a=27.5 m
GORNJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDAR U CILINDRU, DONJI SLOJ TLA OBLIKA CILINDAR U CILINDRU	GORNJI SLOJ TLA: 100 DONJI SLOJ TLA:200	150	500 000	1	2h i 16min	Vidljiva točka infleksije

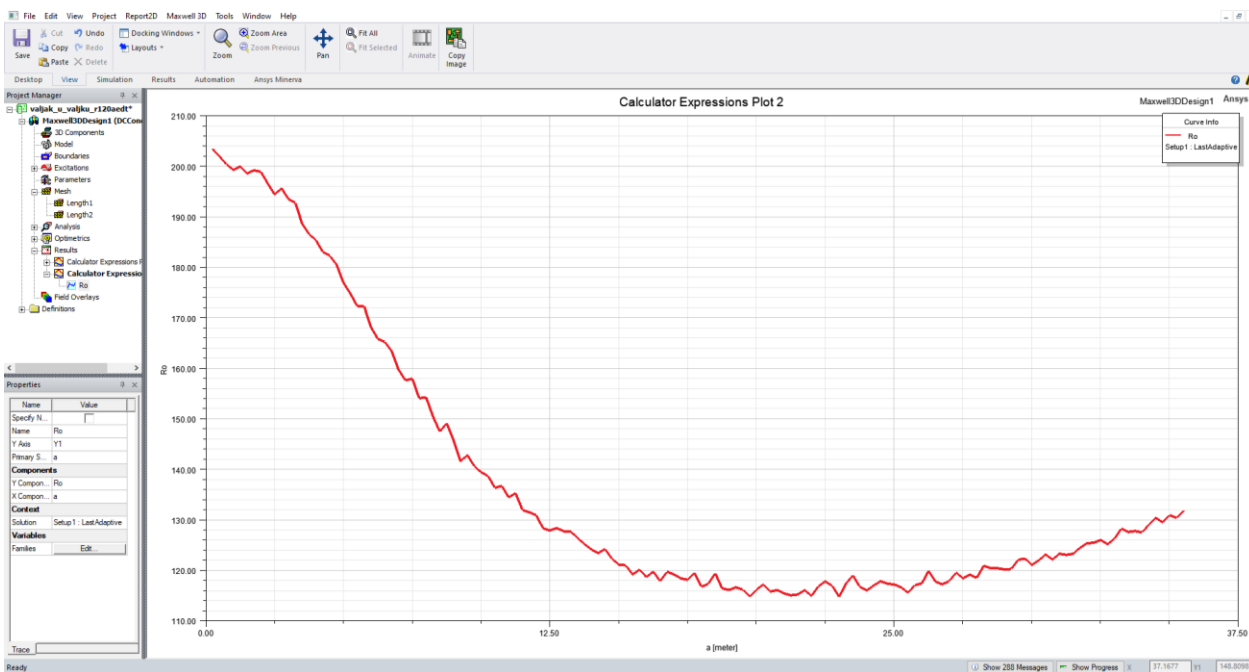
Isto kao i za prethodne modele i odrađene simulacije, prva simulacija za: otpornost gornjeg sloja tla 200  $\Omega$ m, debljina 5 m, otpornost donjeg sloja tla 100  $\Omega$ m, no proračunska domena (engl. *computational domain*) ovoga puta iznosila je 400 000 elemenata za unutarnje cilindre, a u vanjskim je konačan broj elemenata iznosio 100 000, a kriterij zaustavljanja proračuna je kada promjena rezultata postane manja od 1%. Model je prikazan na slici 8.98. Rezultati prve simulacije prikazani su na slici 8.99.

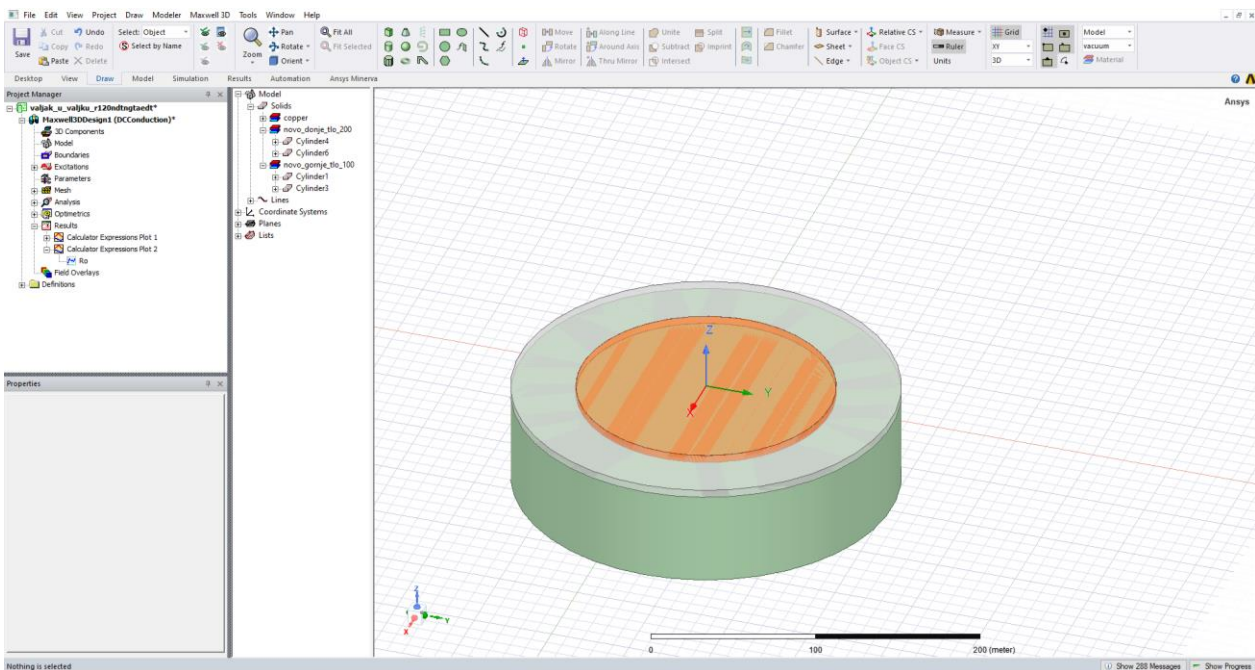
Druga simulacija za: otpornost gornjeg sloja tla 100  $\Omega$ m, debljine 60 m, otpornost donjeg sloja tla 200  $\Omega$ m, proračunska domena (engl. *computational domain*) ovoga je puta iznosila 400 000 elemenata za unutarnje cilindre, a u vanjskim je konačan broj elemenata iznosio 100 000, a kriterij zaustavljanja proračuna je kada promjena rezultata postane manja od 1%. Model je prikazan na slici 8.100., a rezultati druge simulacije prikazani su na slici 8.101.

Kao što je vidljivo iz tablice 8.3. simulacije za radijus 120 m trajale su samo 2-3 te se iz toga može zaključiti kako je ovaj model najbrži od tri prikazana modela u simulaciji.

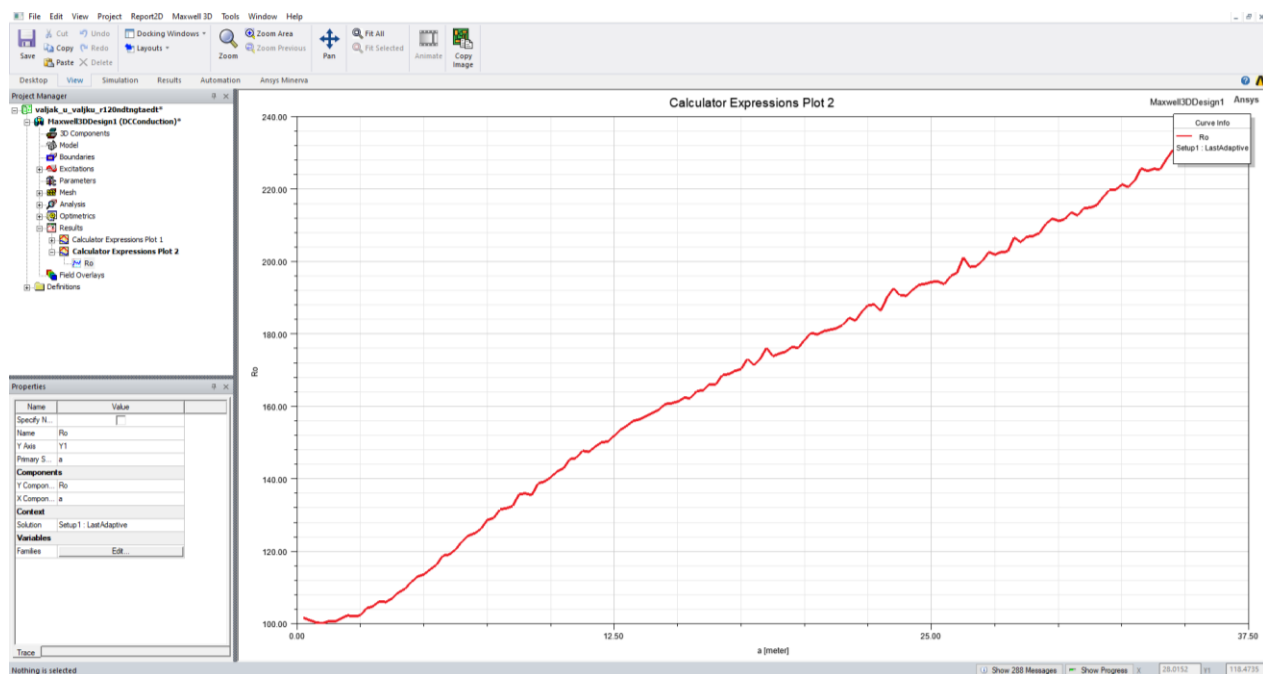


Slika 8.98. Model cilindra u cilindru radijusa 120 m

Slika 8.99. Promjena prividnog otpora tla u funkciji razmaka elektroda  $a$ , za  $r=120$  m



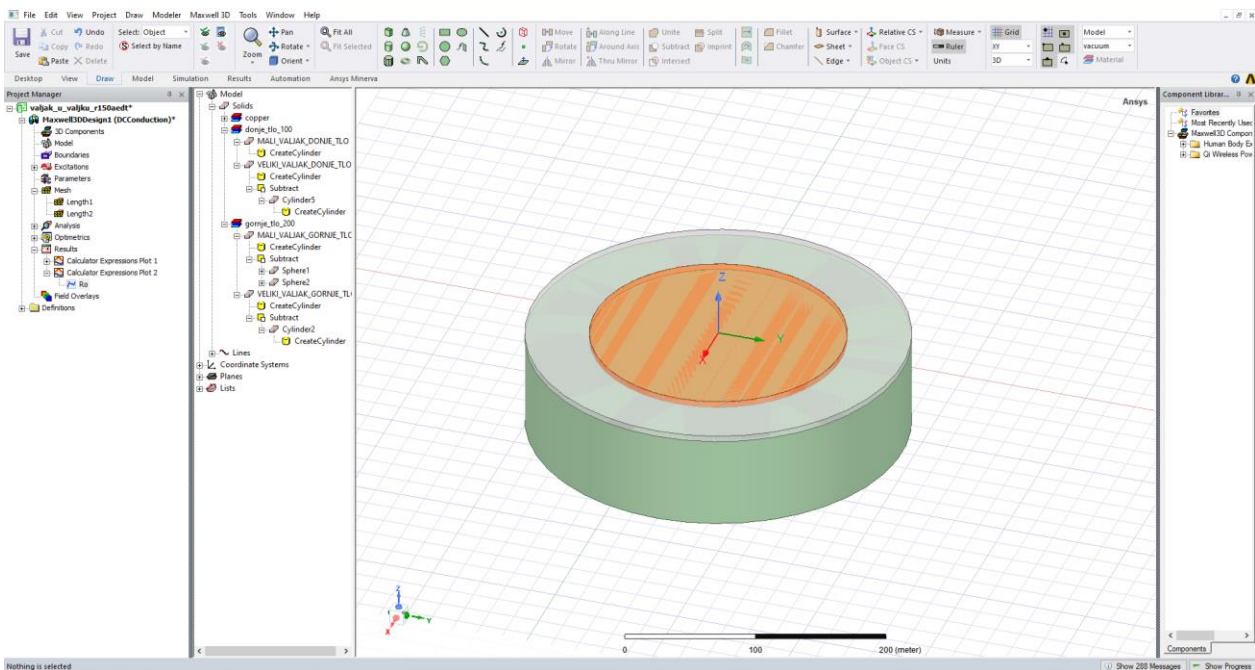
Slika 8.100. Model cilindra u cilindru radijusa 120 m

Slika 8.101. Promjena prividnog otpora tla u funkciji razmaka elektroda  $a$ , za  $r=120$  m

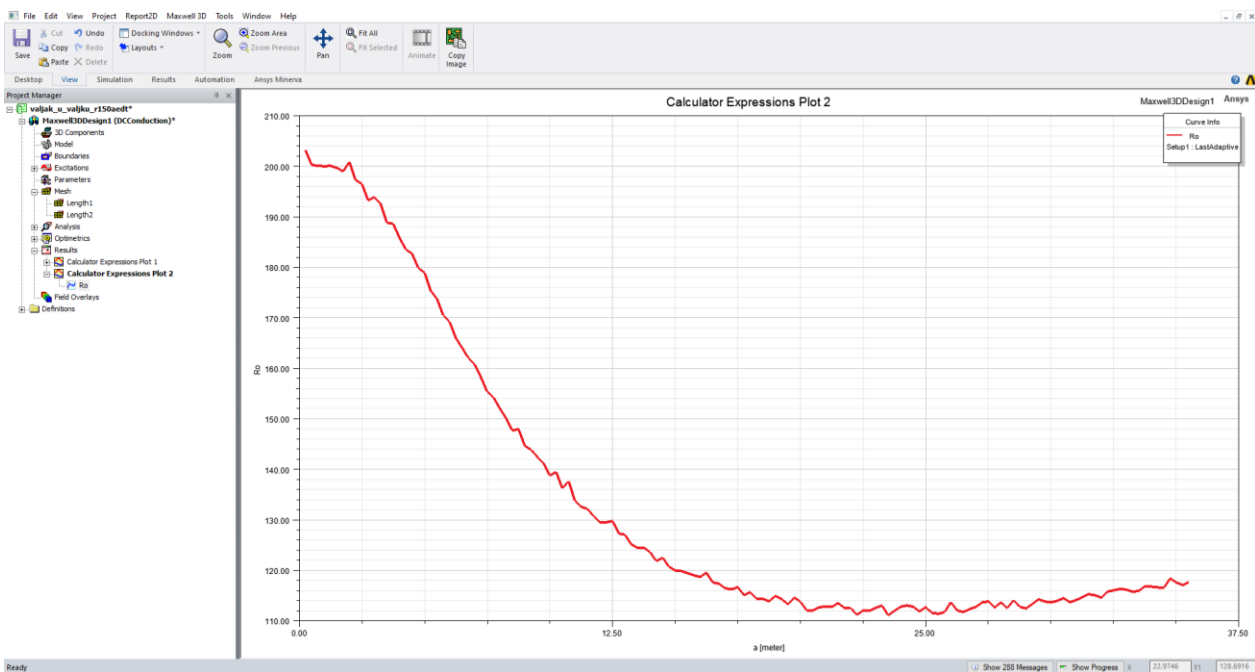
Isto kao i za prethodne modele i odrađene simulacije, prva simulacija za: otpornost gornjeg sloja tla  $200 \Omega\text{m}$ , debljina 5 m, otpornost donjeg sloja tla  $100 \Omega\text{m}$ , proračunska domena (engl. *computational domain*) ovoga puta 400 000 elemenata za unutarnje cilindre, a u vanjskim je konačan broj elemenata 100 000, a kriterij zaustavljanja proračuna je kada promjena rezultata postane manja od 1%. Model je prikazan na slici 8.102. Rezultati prve simulacije prikazani su na slici 8.103.

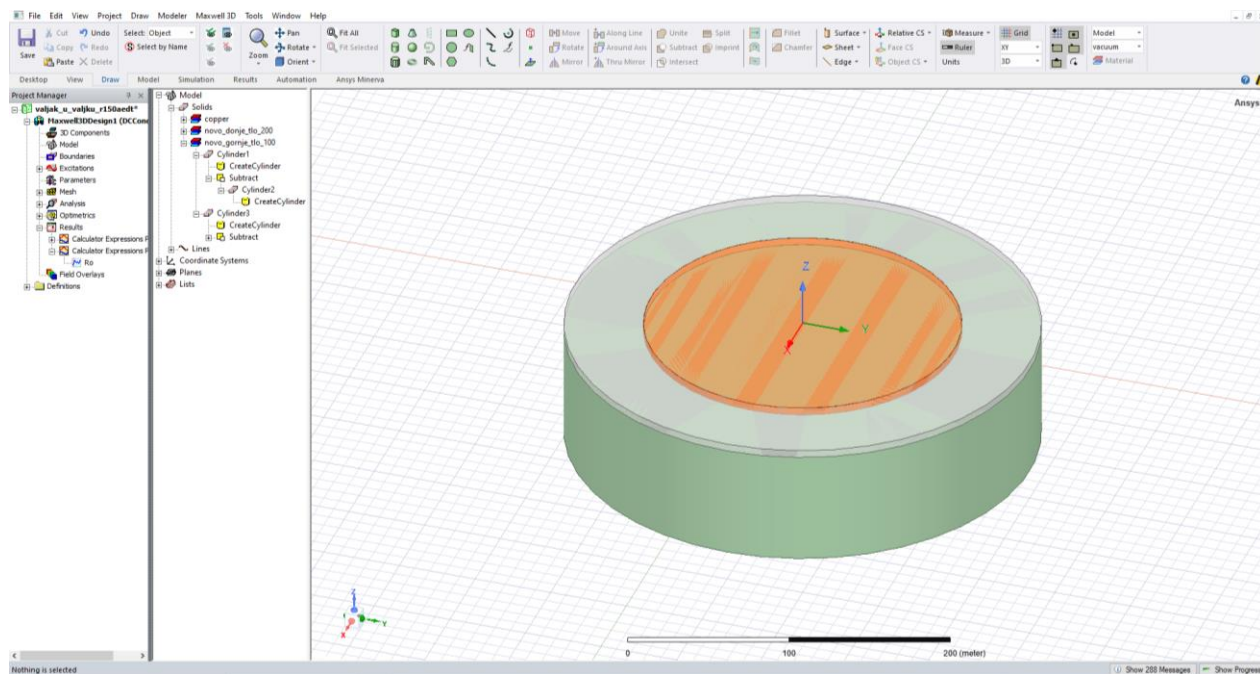
Druga simulacija za: otpornost gornjeg sloja tla  $100 \Omega\text{m}$ , debljine 75 m, otpornost donjeg sloja tla  $200 \Omega\text{m}$ , proračunska domena (engl. *computational domain*) ovoga je puta 400 000 elemenata za unutarnje cilindre, a u vanjskim je konačan broj elemenata 100 000, a kriterij zaustavljanja proračuna je kada promjena rezultata postane manja od 1%. Model je prikazan na slici 8.104. Rezultati druge simulacije prikazani su na slici 8.105.

Kao rezultat ovih simulacija dobiveno je da krivulje nalikuju onim teorijskim krivuljama koje je potrebno dobiti. Prema dobivenim slikama jasno se vidi da krivulja divergira tek za  $a=27.5$  m, a da je na drugom grafu vidljiva točka infleksije. U ovom modelu ANSYS je forsiran da prema raspodjeli konačnih elemenata kako je u samom programu navedeno 400 000 i 100 000 izvede simulaciju.

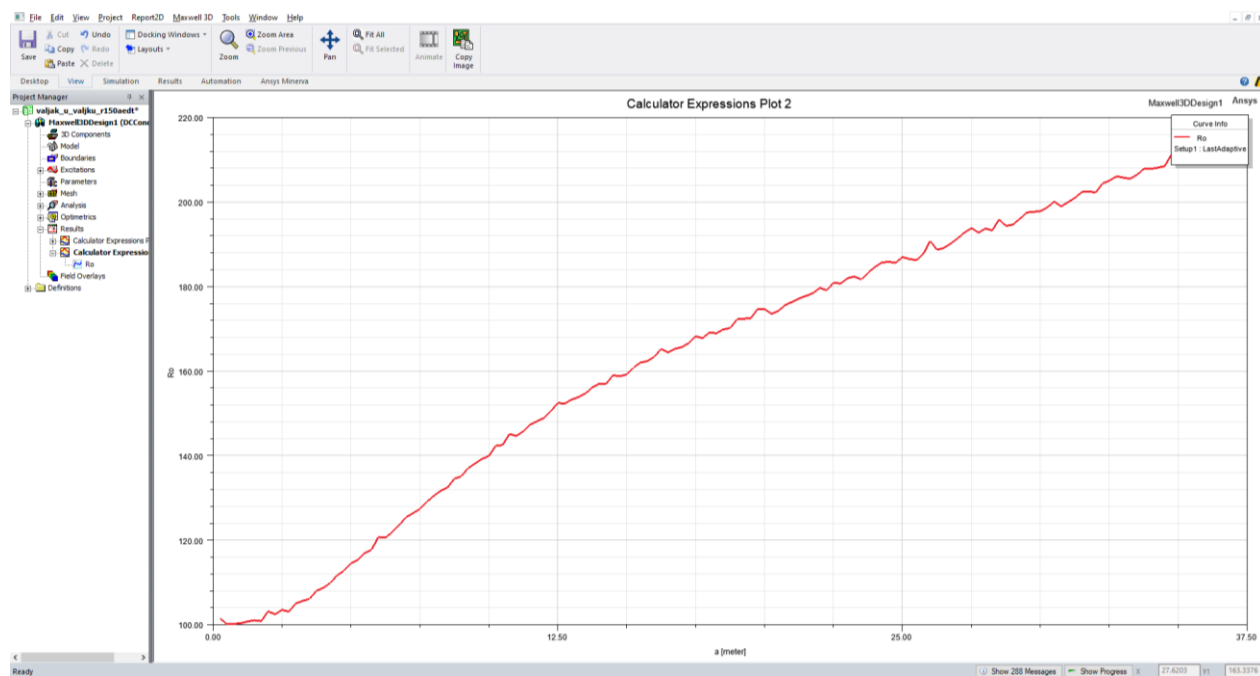


Slika 8.102. Model cilindra u cilindru radijusa 150 m

Slika 8.103. Promjena prividnog otpora tla u funkciji razmaka elektroda  $a$ , za  $r=150$  m



Slika 8.104. Model cilindra u cilindru radijusa 150 m



Slika 8.105. Promjena prividnog otpora tla u funkciji razmaka elektroda  $a$ , za  $r=150$  m

## 9. ZAKLJUČAK

U diplomskome radu detaljno je objašnjeno uloga uzemljenja, kako i na koji način tlo može utjecati na otpornost, objašnjene su metode za mjerenje otpornosti tla, negalvanske i galvanske. Kao primjer za simulaciju odabrana je Wennerova metoda. Iako su druge metode mjerenja strukture i sastava tla uznapredovale, galvanske metode za mjerenje strukture i otpornosti tla i dalje su najzastupljenije. Jednostavnost njihove opreme, dostupnost brojnih dobavljača povoljna cijena i kratko vrijeme potrebno za obuku operatera samo su neke od prednosti koja u nudi galvanska metoda.

Tako se pomoću ANSYS-a može doći do rezultata. Za potrebe ove simulacije pomoću Ansys-Maxwella odradila se simulacija. Program ANSYS kompleksan i složen program pomoću kojeg se može modelirati geometrija po izboru no za to je potrebno puno vremena da se odradi jedna simulacija.

Iako metoda konačnih elemenata nije prikladna za računanje elektromagnetskih zadaća u otvorenom prostoru (beskonačni prostor) već su u tu svrhu prikladnije metode kao što je metode integralnih jednadžbi od kojih je poznatija Boundary Element Method (BEM) ili, tzv. Metoda momenata.

Zahvaljujući dostupnosti procesorskih moći današnjih računala i memoriji takve elektromagnetske zadaće se ipak mogu izračunati korištenjem, metode konačnih elemenata. Jedna takva elektromagnetska zadaća prikazana je u ovom radu. U radu su detaljno analizirani različiti modeli dvoslojnog tla, analiziran je utjecaj broja konačnih elemenata na rezultat, također analiziran je utjecaj dimenzija, modela na rezultat s kojim je predstavljen beskonačni prostor na točnost rezultata.

Unatoč tome što metoda konačnih elemenata (koju koristi ANSYS) nije prikladna za ovakvu vrstu elektromagnetskih zadaća metoda konačnih elemenata ima prednost nad Boundary Element Method (BEM) je ta što se FEM znatno bolje nosi sa zadacima kao što je u ovom radu slučaj (nehomogenost tla).



Rezultati simulacija prikazani u radu su pokazali da se Wennerova mjerna metoda za slučaj kada je tlo dvoslojno uz lokalnu nehomogenost može modelirati primjenom metode konačnih elemenata koju koristi ANSYS. Provedeno istraživanje je pokazalo da kada se mjeri prividna specifična otpornost tla Wennerovom metodom ukoliko je os duž koje se provodi mjerenje paralelna s uzdužnom osi ukopane betonske cijevi u tlu, njezina prisutnost cijevi nema odraza na mjerne rezultate.

Ukoliko se mjerenje provodi Wennerovom metodom tako da je uzdužnu os cijevi okomita na os mjerenja tada prisutnost cijevi ima odraz na mjerne rezultate. Iako utjecaj postoji on nije veliki te se lako utjecaj može zamijeniti sa šumom u mjerenjima. Ovaj rad je pokazao da je ANSYS odličan alat za edukaciju budućih operatera koji će koristiti Wennerovu metodu kako bi spoznali koji faktori utječu na mjerenje te kako bi bolje interpretirali mjerne rezultate.

Uspoređujući pojedine rezultate od svakog modela iz navedenih tablica 8.1., 8.2. i 8.3. jasno se može zaključiti sljedeće: na točnost rezultata ulogu je imao iznos radijusa, broj konačnih elemenata, kriterij zaustavljanja te koji je položaj imala cijev u odnosu na elektrode (slučaj kada je dodana lokalna heterogenost u gornji sloj tla). Kao što se može vidjeti iz tablica najlošiji rezultat bio je kada je radijus iznosio 80 m i za model kada nema lokalne heterogenosti u gornjem sloju tla i za model kada se nalazi lokalna heterogenost u gornjem sloju tla, no te su simulacije bile najbrže i trajale su samo 2-3h. U sva tri modela najbolji rezultat dobio se kada je radijus iznosio 150 m, kriterij zaustavljanja iznosio je 1%, a broj konačnih elemenata iznosio je 500 000 (osim modela cilindar u cilindru kada je broj konačnih elemenata bio drugačije raspodijeljen 400 000 i 100 000). Dobivena krivulja za radijus 150 m odgovara teorijskoj krivulji za dvoslojno tlo, no te simulacije su najduže trajale, ali dale su i najtočniji rezultat. Iako dvije simulacije nisu odrađene do kraja uz poznati analitički oblik krivulje za dvoslojno tlo i kada ta krivulja postane funkcija cilja u metodi najmanjih kvadrata može se pretpostaviti daljnji tijek funkcije.

**POPIS UPOTRIJEBLJENE LITERATURE**

- [1] Franjo Majdandžić, *Uzemljivači i sustavi uzemljenja*, Zagreb: Graphis, 2004., ISBN: 953-96399-6-4
- [2] M. Kvesić, "Modeliranje tla za potrebe izračuna otpora rasprostiranja uzemljivača", Bachelor thesis, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek (FERIT), Osijek, Croatia (2018).
- [3] D. Šimara, "Utjecaj atmosferskih prilika na otpornost tla", Bachelor thesis, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek (FERIT), Osijek, Croatia (2022).
- [4] 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
- [5] Agrivi, prvi hrvatski agritech startup, "Ciklus dušika u prirodi", Dostupno na: <https://www.agrivi.com/hr/blog/ciklus-dusika-u-prirodi/>. [Pristupljeno 25 lipnja 2024.].
- [6] L. Radaš, "Određivanje kemijskog sastava različitih uzoraka tala", Bachelor thesis, University of Split, Faculty of Chemistry and Technology, Split, Croatia (2017).
- [7] Discovery of Sound in the Sea, "How is sound used to explore for oil and gas?", Dostupno na: <https://dosits.org/people-and-sound/examine-the-earth/how-is-sound-used-to-explore-for-oil-and-gas/>. [Pristupljeno 25. lipnja 2024.].
- [8] T. Rukavina, "GPR-Ground Penetration Radar, u prospekcijski ležišta arhitektonskog kamena", *Klesarstvo i graditeljstvo*, Pučišća, br. 3-4, 2010, pregledni članak
- [9] Geotech, tvrtka za obavljanje geotehničkih istraživanja i ispitivanja te geotehničkih elaborata, "Georadar", Dostupno na: <https://www.geotech.hr/georadar/>. [Pristupljeno 25 lipnja 2024.].

- [10] Izvadak iz predavanja Uzemljivači i sustavi uzemljenja, KARAKTERISTIKE TLA, G. Knežević, FERIT Osijek
- [11] T. Barić, D. Šljivac i M. Stojkov, "Granice valjanosti izraza za mjerenja specifičnog otpora tla Wennerovom metodom prema IEEE normi Std. 81-1983", *Energija*, 9. listopada 2007.
- [12] T. Barić, V. Boras i R. Galić, "Nadomjesni model tla zasnovan na umjetnim neuronskim mrežama", *Energija*, svez. 56, br. 1, pp. 96-113, 04. siječanj 2007.
- [13] T. Barić, V. Boras i H. Glavaš, "A simplified procedure for approximate determination of electro-geometrical parameters of two-layer soil", *Tehnički vjesnik*, br. 2, pp. 201-464, 2012.
- [14] F. Čulap, "Simulacija Wennerove metode korištenjem programskog paketa ANSYS", Graduate thesis, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek (FERIT), Osijek, Croatia, 2023.
- [15] S. Galić, N. Tokić i T. Barić, "Mjerenje dipol-dipol metodom uz lokalnu nehomogenost tla", *18. međunarodni "Elektroinženjerski simpozij" Dani Josipa Lončara*, Šibenik, 2009.
- [16] Ansys, Engineering Simulation Software, Dostupno na: <https://www.ansys.com/it-academic/students/ansys-student>. [Pristupljeno 25. lipnja 2024.].
- [17] T. Barić, H. Glavaš, Ž. Hederić i M. Karakašić, "Modelling Grounding Systems Using the Finite Element Method: The Influence of the Computational Domain Size on the Accuracy of the Numerical Calculation", *Tehnički vjesnik*, pp. 1717-1727, 2023.

## POPIS OZNAKA

OZNAKA	MJERNA JEDINICA	NAZIV
$\rho_a$	$\Omega\text{m}$	Specifična otpornost tla
$R$	$\Omega$	Otpor tla
$a$	m	Razmak između elektroda
$b$	m	Dubina na koju su postavljene elektrode
$c$	m	Razmak između potencijalne i strujne elektrode kod Schlumbergerove metode
$d$	m	Razmak između potencijalnih elektroda kod Schlumbergerove metode
$a$	m	Razmak u dipol-dipol metodi
$U$	V	Vrijednost napona dobivenog u simulaciji
$\rho$	$\Omega$	Specifični otpor dobiven u simulaciji

## POPIS KRATICA

KRATICA	NAZIV
$\Omega\text{m}$	Ohm-metar
$\Omega$	Ohm
m	Metar
GPR	<i>Ground Penetrating Radar</i> , georadar
$\pi$	„Pi“ konstanta, 3.14
$R_r$	Otpor rasprostiranja
$R_z$	Otpor uzemljenja
$I_z$	Struja uzemljenja
$R_i$	Udarni ili impulsni otpor uzemljenja
$\rho_z$	Otpornost tla
$U_d$	Dodirni napon
$U_k$	Napon koraka
$n$	Cijeli broj

## SAŽETAK

Diplomski rad započinje s poglavljem o uzemljenju, zatim se opisalo kako ulogu imaju vlažnost i temperatura na svojstvo otpornosti tla, tj. kako utječu. Objasnjene su negalvanske i galvanske metode mjerenja otpornosti tla te se kao primjer za simulaciju uzela Wennerova metoda. Wennerovom metodom opisalo se kako i na koji način utječe lokalna nehomogenost valjka u gornjem sloju zemlje. U radu su detaljno objašnjeni koraci kako se odradila simulacija te su se postavili grafovi koji dokazuju dobiveni rezultat.

**Ključne riječi:** Ansys, modeliranje, otpornost tla, galvanske metode, Wennerova metoda

## ABSTRACT

The thesis begins with a chapter on grounding, then it was described how humidity and temperature play a role in the property of soil resistance, i.e. how they affect it. Non-galvanic and galvanic methods of soil resistance measurement were explained, and Wenner's method was used as an example for simulation. Wenner's method described how and in what way the local inhomogeneity of the roller in the upper layer of the soil affects it. In the paper, the steps of how the simulation was performed are explained in detail, and graphs are set up to prove the obtained result.

**Keywords:** Ansys, modeling, soil resistance, Galvanic methods, Wenner's method

## ŽIVOTOPIS

Martina Pavić rođena je 03.05.2000. u Osijeku. Nakon završene osnovne škole u Gorjanima upisuje opću gimnaziju u Osijeku koju 2019. godine završava te upisuje Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija te 2022. godine završava te stječe titulu sveučilišna prvostupnica inženjerka elektrotehnike i informacijske tehnologije. Za diplomski studij 2022. godine opredijelila se za smjer DEA-elektroenergetski sustavi. U slobodno vrijeme igra padel i squash, bavi se folklorom, aktivno svira u Slavonskom tamburaškom društvu „Pajo Kolarić“ te volontira u Udruzi „4 Lista“ – udruga za terapijske i rekreacijske aktivnosti.

U Osijeku, 22. rujna 2024.

---