

Utjecaj atmosferskih prilika na otpornost tla

Šimara, David

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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:200:813133>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-28**

Repository / Repozitorij:

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



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

Stručni studij

**UTJECAJ ATMOSFERSKIH PRILIKA NA
OTPORNOST TLA**

Završni rad

David Šimara

Osijek, 2021.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Zadatak završnog rada.....	1
2. KARAKTERISTIKE TLA.....	2
2.1. Vrste tla.....	2
2.2. Utjecaj vlage, temperature i soli na specifični otpor tla	4
2.3. Tehnike mjerenja specifičnog otpora tla.....	4
2.4. Tipične krivulje specifičnog otpora tla.....	6
2.5. Tehnike mjerenja specifičnog otpora tla.....	7
2.5.1. Wenner-ova metoda mjerenja specifičnog otpora tla	7
2.5.2. Schlumberger-ova metoda mjerenja specifičnog otpora tla.....	9
2.5.3. Općenita metoda mjerenja specifičnog otpora tla.....	10
2.5.4. Metode 3-sonde mjerenja specifičnog otpora tla	11
2.5.5. Dipol-Dipol metoda mjerenja specifičnog otpora tla.....	12
3. MODELI TLA ZA PRORAČUN UZEMLJENJA	13
3.1. Model jednoslojnog (uniformnog) tla.....	13
3.2. Model dvoslojno horizontalnog tla	14
3.3. Model višeslojnog horizontalnog tla	16
3.4. Ostali modeli tla	17
4. ANALIZA REZULTATA MJERENJA.....	18
4.1. Mjerenja.....	18
4.2. Analize otpornosti tla.....	21
4.3. Analize utjecaja padalina na otpornost tla	26
4.4. Analize utjecaja temperature na otpornost tla.....	27
5. ZAKLJUČAK.....	29
6. SAŽETAK.....	30
7. ABSTRACT	31

LITERATURA	32
ŽIVOTOPIS.....	33

1. UVOD

Čitava ljudska povijest godinama si nastoji osigurati što bolji, jednostavniji i sigurniji život, pri tome nam uvelike pomaže svakodnevni napredak tehnologije, što za posljedicu ima i povećanje potrebe za električnom energijom. Sve veća potražnja električne energije zahtjeva sve složeniji elektroenergetski sustav koji zbog velikog broja elemenata na pojedinim naponskim razinama rezultira većim opasnostima. Kako bi se te opasnosti smanjile, uloženi su veliki naponi u napredak sigurnost elektroenergetskog sustava, u prvome redu kako bi se osiguralo zdravlje ljudi, a potom i izbjegle havarije ili materijalne štete koje te opasnosti mogu načiniti u elektroenergetskom sustavu. Jedna od prevencija, kako bi se spriječila opasnost od pojave napona na mjestima gdje je on nepoželjan, jest uzemljenje pojedinih dijelova postrojenja na način da se izjednači potencijal zemlje s potencijalom dijela postrojenja koji je sa zemljom galvanski spojen. To može biti opasno ako se uzemljenje ne izvede pravilno, stoga se mora obratiti pozornost na sve elemente uzemljenja, pretežno na vrijednost otpora uzemljenja kod kojeg glavni utjecaj ima otpornost tla. Kako bi se što bolje izradio proračun uzemljivača, potrebno je što bolje proučiti tlo. Iz tog razloga provodi se mjerenje otpornosti tla, određuje njegova slojevitost te se vrši modeliranje tla u računalnom programu.

1.1. Zadatak završnog rada

U završnom radu potrebno je teorijski obraditi temu otpornosti tla te metode mjerenja otpornosti tla. Nadalje, potrebno je izvršiti više mjerenja otpornosti tla za različite atmosferske uvjete. Rezultate mjerenja potrebno je iskoristiti za izradu računalnog modela za određivanje parametra višeslojnog tla u ovisnosti o različitim atmosferskim prilikama.

2. KARAKTERISTIKE TLA

Govoreći o uzemljenju nekog objekta, tada se zemlja gleda kao vodič te da će se struja preko nekog uzemljivača koji je ukopan u zemlju, nesmetano provesti kroz nju. Kako bi se utvrdio električni otpor zemlje, potrebno je saznanje njenog specifičnog otpora. Taj specifični otpor, električni je otpor kojeg zemlja ima između dvije elektrode na površini od 1m^2 , koje su međusobno udaljene 1m i on se mjeri u ohmmetrima. Prilikom projektiranja uzemljenja nekog postrojenja proračuni su usporedno s onima koji se pojavljuju u stvarnosti često različiti, a uzrok tome je nehomogenost zemlje te ključni faktor u tome imaju i vlaga i temperatura okoline.

2.1. Vrste tla

Uzemljivački sustav u cjelini s geološkim i zemljovodnim provodnikom ima otpor sastavljen od:

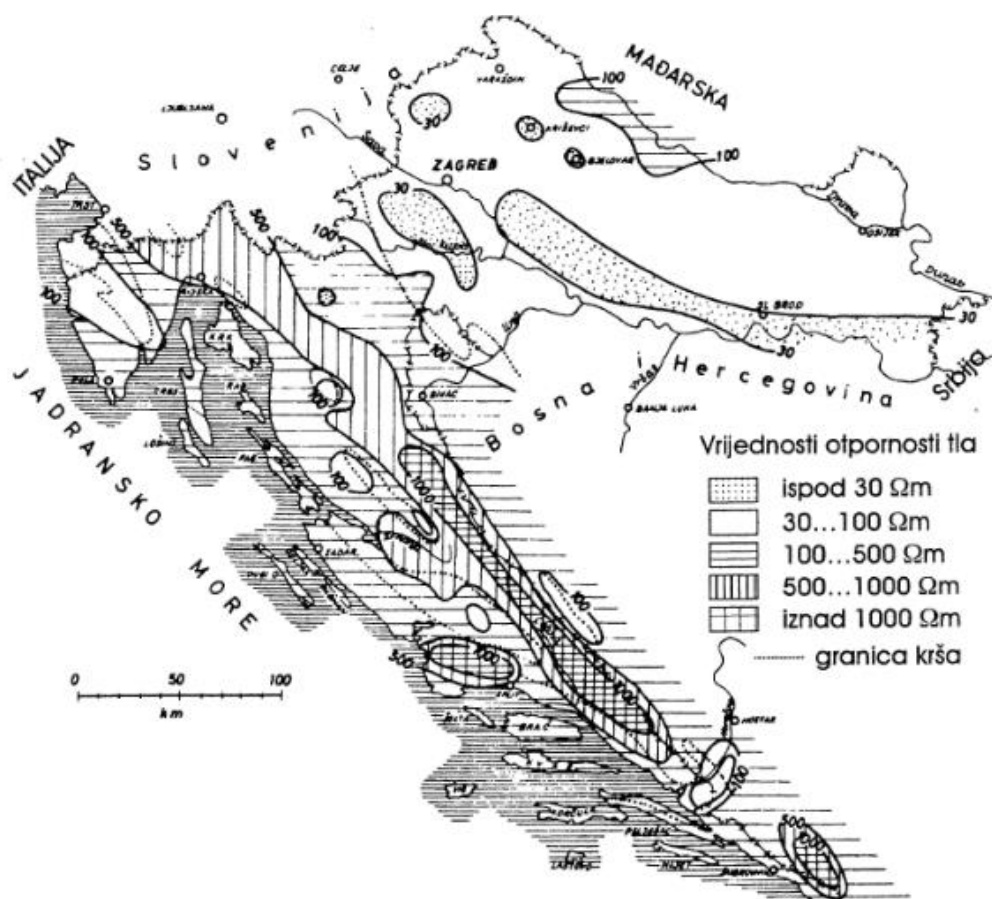
- a) Otpora zemljovoda
- b) Otpora samog uzemljivača
- c) Prijelaznog otpora uzemljivača

Prijelazni otpor uzemljivača je otpor na kojeg struja nailazi pri prijelazu sa uzemljivača na geološki provodnik.

- d) Otpor širenja struje u tlu

Otpor širenja struje u tlu je ohmski otpor na koji struja nailazi prolaskom kroz geološki provodnik.

Kako bi se pravilno izvelo uzemlje nekog postrojenja potrebno je poznavati vrstu tla, što znači da je potrebno imati spoznaju podataka otpornosti promatranog tla u kojemu će biti smješten uzemljivač. Geoelektrično sondiranje je postupak kojim će se ustanoviti otpornost tla, a tim postupkom mjerenja ne dobivaju se samo podaci otpornosti tla, nego se također dobivaju podaci o debljini i dubini pojedinih slojeva ispod promatrane površine zemlje.



Slika 2.1. Vrednovanje električne otpornosti tla na području Hrvatske [1]

Tablica 2.1. Specifične otpornosti vode, tla i drugih materijala [1]

Vrsta tla, vode i drugih materijala	Specifični otpor [Ωm]
Morska voda	0,1 – 1
Voda jezera i rijeka	1 – 10
Močvarno tlo	5 – 40
Glina	20 – 100
Vlažni pijesak	90 – 150
Zemlja crnica	50 – 200
Suhi pijesak	200 – 300
Šljunak	400 – 2000
Beton (tlo i armirani)	50 – 500
Kamenito tlo	1000 – 4000
Vapno	500 – 20000
Granit	10000 – 50000
Led	10000 - 100000

2.2. Utjecaj vlage, temperature i soli na specifični otpor tla

Na specifični otpor tla velik je važnosti utjecaj temperature i vlage iz razloga što on može vrlo brzo opasti kako se vlaga okoline povećava, isto tako on može brzo porasti ukoliko se količina vlage okoline smanji, no, ipak gledajući vrijednosti nakon 20%, stopa promijene specifične otpornosti je puno manja, a tla se sa sadržajem vlage većim od 40% teško susreću. Gledajući utjecaj temperature, posebno je značajan dio oko intervala od 0 °C jer je tu krivulja znatno strmija. Gledajući točku od 0 °C vidljiv je okomiti skok, a uzrok tomu je zaleđivanje tla jer led ima izrazito visok specifični otpor. Gledajući pozitivne dijelove temperaturene skale promjene specifičnog otpora značajno su manje.

2.3. Tehnike mjerenja specifičnog otpora tla

Od presudne je važnosti poznavanje specifičnog otpora tla iz razloga što on predstavlja glavni ulazni parametar kod proračuna uzemljenja elektroenergetskih postrojenja. Kako bi se dobili što točniji podaci o specifičnom otporu promatranog tla, mora se obaviti niz mjerenja jer procjene na osnovu klasifikacije tla daju samo grupu procjenu promatranoga tla. Jedna od bitnijih spoznaja pri određivanju modela tla, jest ta da se otpornost tla mijenja s dubinom tla (jednoslojno, dvoslojno, višeslojno), što je od velike važnosti za proračun uzemljenja i određivanje električnih svojstava tla. Prilikom mjerenja, na rezultate uvelike mogu utjecati metalne konstrukcije koje su već ukopane u zemlju (metalne cijevi i ostale metalne konstrukcije) te same meteorološke prilike gdje se obavlja mjerenje. Metoda mjerenja specifičnog otpora tla izvodi se tako da se između dvije vanjske sonde pušta struja, a one se nazivaju strujne sonde. Dvije naponske sonde smještene su u jednakom pravcu među strujnim sondama te se iznos napona mjeri na dvije naponske sonde. Primjenom Ohmovog zakona na temelju puštanog izmjerene napona i struje računa se vrijednost specifičnog otpora tla zadanog u Ohmmetrima. Kada dođe do mijenjanja razmaka između sondi, tada je potrebno obuhvatiti veći volumen tla kojemu se određuje otpornost. Otpornost u homogenom tlu pri mjerenju je konstantna te se mjerenjem direktno utvrđuje. U slučaju da tlo nije homogeno, odnosno da je sastavljeno od više slojeva čije su otpornosti različite, dobije se prosječna otpornost obuhvaćenih slojeva vlastitim mjerenjem te se zbog tog uzroka naziva prividnim specifičnim otporom, to jest prividnom otpornošću. Daljinom obradom izmjerenih prividnih specifičnih otpornosti analitički ili grafički, najčešće primjenom računalnih programa

kao što su CYMGRD, CDGES i slični, tlo je modelirano točnim vrijednostima otpornosti i dubina pojedinih slojeva.

Kako bi se što kvalitetnije izvela mjerenja neophodno je na sljedeće stvari obratiti pozornost:

a) Značajke mjerenja

Mjerenje se velikim dijelom obavlja uporabom tehnike paralelnih poprečnih linija. Ova tehnika se izvodi na način da se kod mjerenja specifičnog otpora tla promatrano tlo ucrtava s paralelnim linijama. Duž svake te određene linije radi se određeni broj mjerenja za drugačije udaljenosti sonde te se ovom metodom dobiva saznanje da se otpornost tla mijenja dubinom. Ovakvim stilom izvođenja mjerenja, odnosno promjenom razmaka između sonde, oponaša se efekt bušenja pa ova metoda istraživanja poprima naziv geoelektrično sondiranje. Potrebno je uzeti veći broj paralelnih poprečnih linija za neke veće uzemljivačke sustave. Po završetku mjerenja u jednom smjeru, potrebno je izvršiti mjerenje i u drugom smjeru. Pri mjerenju u drugom smjeru, drugi pravac je okomit na početni pravac, a rezultate je potrebno usporediti. Usporedbom dobivenih rezultata, ako su oni približno jednaki, onda se kaže da postoji horizontalna slojevitost tla, no u slučaju da rezultati poprilično odstupaju za jednake udaljenosti unutar sonde za dva smjera koja su okomita, tada se zaključuje da postoji vertikalna slojevitost tla. Ukoliko se udaljenost između sonde održava konstantnim, a cijela postava mjerenja pomiče se uzduž nekog pravca za vrijeme dok dubinski zahvat i dalje ostaje jednak, tim mjerenjem se ispituju uzdužne, to jest, lateralne promjene otpornosti tla. Navedena metoda naziva se geoelektrično profiliranje.

b) Udaljenost sonde

Raspon udaljenosti sonde može varirati od malih (manjih od 1m), pomoću kojih se može ustanoviti otpornost gornjih slojeva tla, koja je iznimno bitna za proračun napona koraka te napona dodira, pa sve do onih većih razmaka koji se koriste za utvrđivanje dubljih slojeva tla, koji su važni za utvrđivanje otpora rasprostiranja uzemljivača. Pri mjerenju sa jako velikim udaljenostima uglavnom postoji problem kao što je induktivni spoj, nedovoljna rezolucija instrumenta ili fizička ograničenja. Navedena mjerenja su od iznimnog značaja kada je u pitanju nizak sloj tla velike otpornosti, no ako nema dovoljno prostora za povećanje udaljenosti, postoji mogućnost unošenja velike pogreške pri mjerenju otpornosti drugoga sloja.

c) Otpornost kontakata

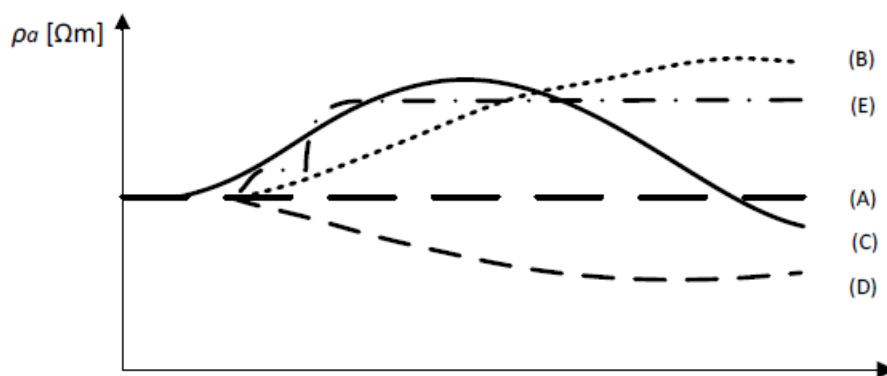
Ova otpornost može predstavljati problem prilikom velikih razmaka između sonde kod tla visokih otpornosti. U ovakvim slučajevima, strujne sonde potrebno je što dublje nabiti u tlo ili tlo oko sonde natopiti slanom vodom za što bolje postizanje kontakta sonde i zemlje, samim time bi se zračni raspor između sonde i zemlje smanjio, a kako on ne bi utjecao na mjerenje moguće je dodavanje sonde u paralelnom spoju.

d) Dodatne preporuke

Mjerna oprema i instrumenti moraju biti odgovarajuće podešeni i kalibrirani. Osobama koje izvode mjerenje treba biti omogućen grafički prikaz razmaka među sondama te otpornosti tla. Osobe koje izvode mjerenja mogu otkriti anomalije te mogu prepoznati komplicirano područja koja zahtijevaju detaljnija ispitivanja.

2.4. Tipične krivulje specifičnog otpora tla

Crtanjem krivulje koja prikazuje ovisnost prividnog specifičnog otpora tla u ovisnosti o udaljenosti među sondama, odnosno indirektno dubine u tlu, mjerenje specifičnog otpora tla se završava te se ti podaci dalje koriste za modeliranje tla. Postoji nekoliko krivulja specifičnog otpora tla koje se mogu očekivati i prikazane su na slici 2.2.



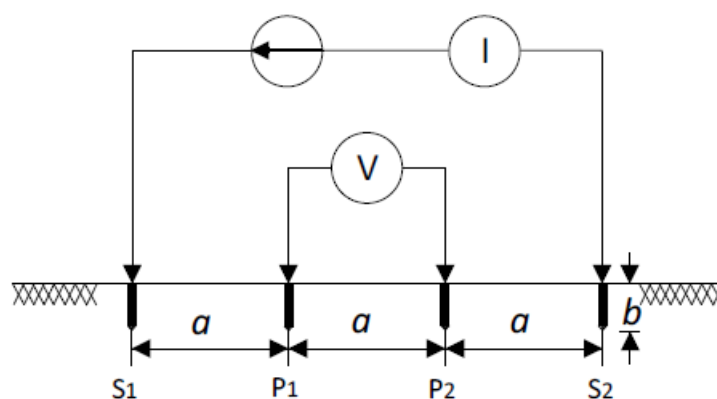
Slika 2.2. Razmak među sondama [1]

Promatrajući krivulju 'A' vidljivo je kako se prividna otpornost tla ne mijenja s promjenom razmaka između mjernih sonde, ona ostaje konstantna, iz toga se zaključuje da se radi o homogenom tlu. Promatrajući krivulju 'B' vidimo da nam ona predstavlja tlo s početnim slojem

niže otpornosti i slojem ispod njega koje je veće otpornosti. Promatrajući krivulju 'C' vidljivo je ona predstavlja tlo koje je između dva sloja niske otpornosti ima sloj veće otpornosti. Promatrajući krivulju 'D' vidljivo je da ona predstavlja tlo čiji je prvobitni sloj iznimno veće otpornosti od dubljeg sloja. Promatrajući krivulju 'E' vidljivo je kako početni sloj niske otpornosti iznad sloja visoke otpornosti sa vertikalnim diskontinuitetom.

2.5. Tehnike mjerenja specifičnog otpora tla

2.5.1. Wenner-ova metoda mjerenja specifičnog otpora tla



Slika 2.3. Wennerova metoda [2]

Najčešće korištena tehnika specifičnog otpora tla jest Wenner-ova metoda (prikazana na slici 2.3.) mjerenja specifičnog otpora tla. Kod ove metode mjerenja koriste se četiri sonde (elektrode) koje su ugrađene duž jednog pravca na istim međusobnim udaljenostima. Slikom 2.3. prikazano je kako se sonde zabijaju u zemlju na dubinu koja je označena slovom 'b', a slovo 'a' označava međusobni razmak sonde koji je jednak. Oznaka 'S1' i 'S2' označava vanjski par sonde koje se upotrebljavaju kao struje, a oznakama 'P1' i 'P2' označavaju se unutarnji par sonde koje se upotrebljavaju kao naponske sonde. Preko vanjskih sonde, odnosno strujnih sonde, kada pustimo izmjeničnu struju, javlja se razlika potencijala. Pomoću voltmetra mjeri se dobivena razlika potencijala. Voltmetar se priključi na naponske sonde, odnosno unutarnje sonde, koji zbog točnijeg mjerenja, ima jako velik unutarnji otpor. Uz znanu ispitnu struju I te uz poznati napon izmjeren voltmetrom U pomoću Ohmovog zakona moguće je izračunati otpor tla R . Navedeni otpor je

potreban i ključan kako bi se izračunale vrijednosti specifičnog otpora tla. Korištenjem Wennerove metode, formula za izračun prividnog specifičnog otpora tla je sljedeća:

$$\rho_a = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}}$$

Za slučaj kad je udaljenost 'a' između sonde veći od dubine 'b' na koju se sonde zabijaju ($a > 20b$), tada je moguća upotreba skraćenog izraza za izračun prividnog specifičnog otpora:

$$\rho_a = 2\pi a R$$

a – međusobna udaljenost između sonde

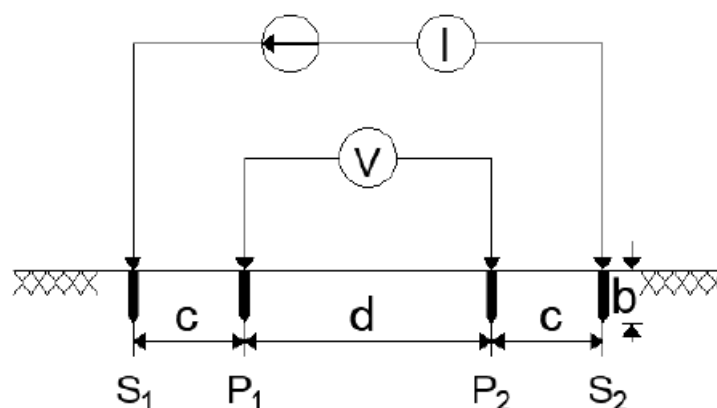
R – vrijednost mjerenog otpora dobivena između omjera izmjenjenog napona i struja

Ukoliko je razmak između sonde veći, također je veći i volumen tla koji je okružen mjerenjem, što rezultira i većom dubinom tla koja je uključena u mjerenje. Dobivena vrijednost za specifični prividni otpor je zapravo prosječna, odnosno srednja vrijednost specifičnog otpora za volumen tla, čiji je raspon od površine do dubine koja je iste udaljenosti među sondama.

Na potencijalnim sondama u omjeru dobivenog napona je prednost Wennerove tehnike, gledajući jedinicu ispitne struje na strujnim sondama, pa se nju ujedno i smatra najviše korištenom metodom mjerenja specifičnog otpora tla.

Glavni nedostatak Wennerove metode je taj što treba dosta vremena kako bi se provelo mjerenje iz tog razloga što pri svakom novom mjerenju, sve četiri sonde se moraju pomjeriti, a ako se radi o nekim većim udaljenostima između sonde, tada su nam potrebni duži kabeli, te to zahtijeva mnogo više vremena. Dodatni nedostatak kod mjerenja Wennerovom metodom je taj da kada sonde stavljamo na veće međusobne udaljenosti, potencijal na potencijalnim sondama ima nisku vrijednost, što traži veću osjetljivost mjernog instrumenta, a time je i preciznost mjernog instrumenta upitna.

2.5.2. Schlumberger-ova metoda mjerenja specifičnog otpora tla



Slika 2.4. Shema Schlumbergerove metode mjerenja specifičnog otpora tla [2]

Slikom 2.4. vidljiva je shema Schlumbergerove-ove tehnike mjerenja specifičnog otpora tla. Četiri sonde su korištene za mjerenje, a dvije su vanjske (strujne) sonde, dok su dvije unutarnje (potencijalne sonde). Upotrebom navedene metode mjerenja specifičnog otpora tla mogu se zaobići nedostaci Wennerove metode kojoj je glavna mana razmještaj strujnih i naponskih sondi. Pri usporedbi Wennerove i Schlumbergerove metode, one vizualno izgledaju isto, ali najveća razlika ove dvije tehnike je što kod Schlumbergerove metode sonde nisu na međusobno jednakoj udaljenosti, nego su unutarnje sonde na udaljenosti 'd' i više su približene vanjskim sondama koje su od njih razmaknute za iznos 'c'. Razlog tome je što se pomicanjem potencijalnih sondi bliže strujnim sondama, potencijal povećava, dok se osjetljivost smanjuje, što rezultira točnijim mjerenjem.

Ovako se rješava problem koji ima Wennerova metoda mjerenja specifičnog otpora, gdje su sonde na relativno velikim udaljenostima, pa je samim time i potencijal potencijalnih sondi nižih vrijednosti, što zahtjeva veću osjetljivost mjernog instrumenta pa samim time točnost mjernih rezultata postaje upitna.

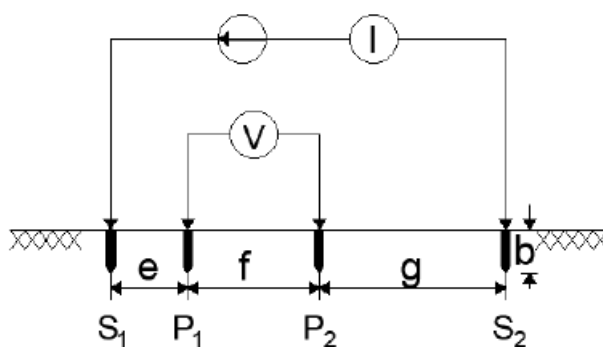
Kod ove metode mjerenja za svako mjerenje nije potrebno pomicati sve četiri sonde, već je načelo da se strujne sonde uglavnom pomiču 4 – 5 puta za svako pomicanje potencijalnih sondi, što rezultira bržim mjerenjem. Schlumbergerovu konfiguraciju jer bolja od Wennerove te se iz tog razloga koristi pri mjerenju specifičnog otpora tla dubljih slojeva.

U slučaju kada je dubina zabijanja sonde 'b' manja u odnosu na razmak 'c' i 'd', tada prividni specifični otpor tla Schlumbergerovom metodom računamo po izrazu:

$$\rho_a = \Pi \cdot \frac{c \cdot (c + d)}{d} \cdot R$$

U odnosu na Wernnerovu, Schlumbergerova metoda ima taj nedostatak da je dosta kompleksnija obrada rezultata mjerenja, isto tako moramo imati i duže kablove za strujne sonde.

2.5.3. Općenita metoda mjerenja specifičnog otpora tla



Slika 2.5. Shema općenite metode mjerenja specifičnog otpora tla [2]

Slikom 2.5. vidljiva je shema općenite metode mjerenja specifičnog otpora tla koja se primjenjuje za vrijeme teških uvjeta te kod nepristupačnosti tla na samom mjestu gdje se izvodi mjerenje, te isto tako nemogućnosti postavljanja simetričnosti među sondama koje zahtijevaju Wennerova metoda i Schlumbergerova metoda.

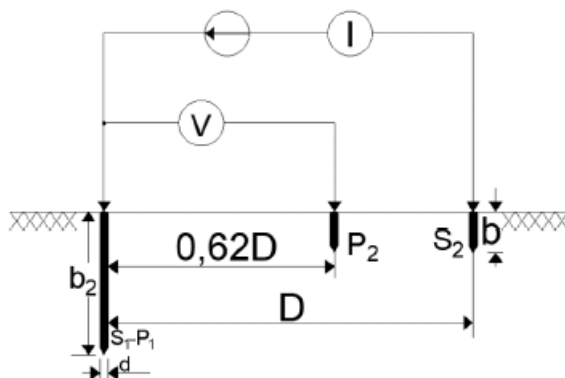
Prilikom izvedbe ove metode razmak među sondama se razlikuje, a to možemo nadomjestiti faktorom k koji je ovisan o rasporedu sonde

$$K = \left[\frac{1}{e} + \frac{1}{g} - \frac{1}{e + f} - \frac{1}{g + f} \right]$$

Pomoću opće metode mjerenja specifični otpor tla se računa prema izrazu:

$$\rho_a = 2 \cdot \Pi \cdot \frac{1}{K} \cdot R$$

2.5.4. Metode 3-sonde mjerenja specifičnog otpora tla



Slika 2.6. Shema metode 3- sonde mjerenja specifičnog otpora tla [2]

Slikom 2.6. prikazana je metoda 3-sonde, koja u odnosu na prethodno opisane metode koristi samo tri sonde od dosadašnjih četiri prilikom ispitivanja specifičnog otpora tla. Prilikom mjerenja ispitnu sondu 'S1-P1', koja ima promjer 'd', potrebno je zabiti na neku dubinu 'b2' koja je u odnosu na naponsku sondu 'P2' i strujnu sondu 'S2' dublje zabijena u zemlju. Metoda 3-sonde je specifična po tome što joj ispitna sonda ima dvostruku ulogu u mjerenju, iz razloga što se ona upotrebljava kao naponska i strujna sonda. Iz sheme je vidljivo kako je udaljenost ispitne sonde i strujne sonde označena sa oznakom 'd', dok je udaljenost ispitne sonde i naponske sonde označena oznakom '0.62D'.

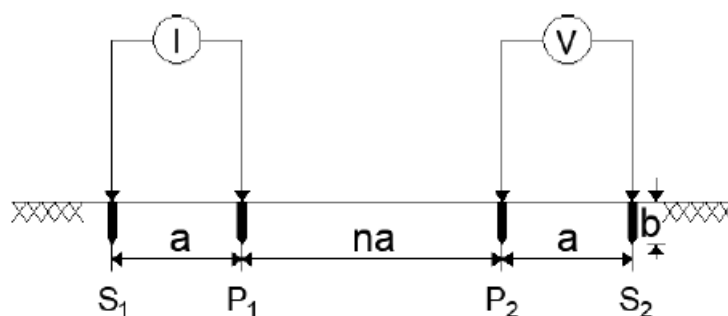
Kod metode 3-sonde prividni specifični otpor tla računamo prema izrazu:

$$\rho_a = \frac{2 \cdot \Pi \cdot b_2}{\ln\left(\frac{8 \cdot b_2}{d}\right) - 1} \cdot R$$

Prednost metode 3-sonde je što nije potreban razmještaj kao u prethodno navedenim slučajevima. Isto tako, prilikom zabijanja sonde u tlo zna se sa sigurnošću kakvog je sastava tlo i zna se hoće li biti moguće postavljanje planiranog uzemljenja. Također, to je i nedostatak iz razloga što pri većim

dubinama ispitne sonde u tlu postoji mogućnost da za vrijeme zabijanja sonde u vrlo tvrde slojeve tla dođe do lošijeg kontakta sa tlom što bi moglo rezultirati lošijim rezultatima otpornosti tla. Isto tako nedostatak je i pretpostavka da je tlo homogene konfiguracije, što u većini slučajeva nije.

2.5.5. Dipol-Dipol metoda mjerenja specifičnog otpora tla



Slika 2.7. Shema Dipol-Dipol metode mjerenja specifičnog otpora tla [2]

Slikom 2.7. vidljiva je Dipol-Dipol metoda mjerenja specifičnog otpora tla. Ovom metodom upotrebljavaju se dvije naponske i strujne sonde. Sonde koje su priložene jedna blizu drugoj nazivaju se dipol. Sonde postavljene na većim međusobnim udaljenostima nazivaju se bipol sonde. Prilikom izvedbe ove metode od velike je važnosti da je razmak 'a' među sondama 'S1' i 'P1' jednaka udaljenosti 'a' između sonde 'P2' i 'S2', dok je udaljenost između naponskih i strujnih sonde određena sa umnoškom cijeloga broja 'n' i udaljenošću 'a'.

Prividnu specifičnu otpornost tla uz korištenje ove metode računamo prema izrazu:

$$\rho_a = \pi \cdot a \cdot n \cdot (n + 1) \cdot (n + 2) \cdot R$$

a – udaljenost dviju naponskih i dviju strujnih sonde

n – cijeli broj

π – konstanta

R – vrijednost izmjerenog otpora

Lakše vršenje mjerenja zbog iznimno kraćih kabela je prednost ove metode, dok je nedostatak taj što su potrebni veliki generatori ispitne struje, posebice ako se provode mjerenja za veće dubine tla.

3. MODELI TLA ZA PRORAČUN UZEMLJENJA

3.1. Model jednoslojnog (uniformnog) tla



Slika 3.1. Model jednoslojnog (uniformnog) tla [2]

Ako homogeno tlo ima konstantnu otpornost, tada ga možemo aproksimirati kao jednoslojni model tla. Ovakav model tla se koristi prilikom mjerenja kod kojih se utvrđuje da se povećanjem ili smanjenjem dubine mjerenja otpornost tla ne mijenja ili u slučaju nekog manjeg uzemljivačkog sustava kod kojega su dozvoljena neka zanemarenja ili aproksimacije.

Otpornost jednoslojnog modela tla moguće je dobiti aritmetičkom sredinom svih mjerenih prividnih otpornosti tla, prikazanim izrazom:

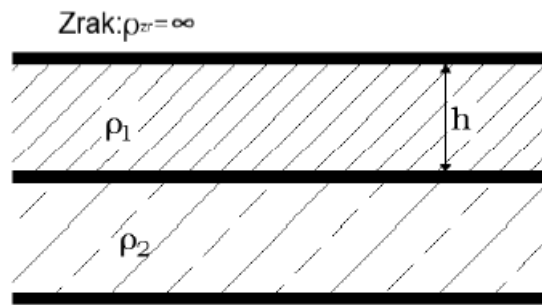
$$\rho = \frac{\rho_{a(1)} + \rho_{a(2)} + \rho_{a(3)} + \dots + \rho_{a(n)}}{n}$$

Također se uz prethodni izraz otpornost jednoslojnog modela može izvršiti prema sljedećem izrazu:

$$\rho = \frac{\rho_{max} + \rho_{min}}{2}$$

Jednoslojni odnosno ujednačeni model tla koristi se isključivo u uvjetima kada prividna otpornost tla uravnoteženo varira. Ono što u praksi rijetko postoji je to da jednoslojni model tla može pružiti približno točnu aproksimaciju za tlo homogenog sastava. Ukoliko postoje određenije varijacije mjerene prividne otpornosti tla, onda nije moguće dobiti dobru aproksimaciju.

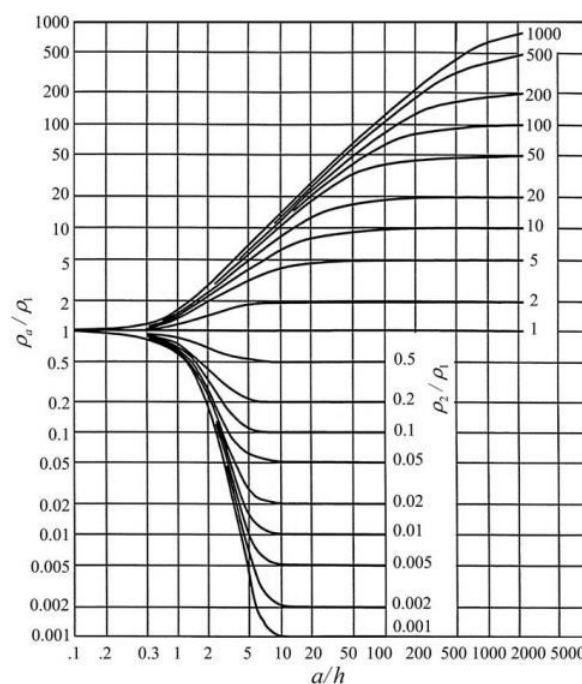
3.2. Model dvoslojno horizontalnog tla



Slika 3.2. Model dvoslojno horizontalnog tla [2]

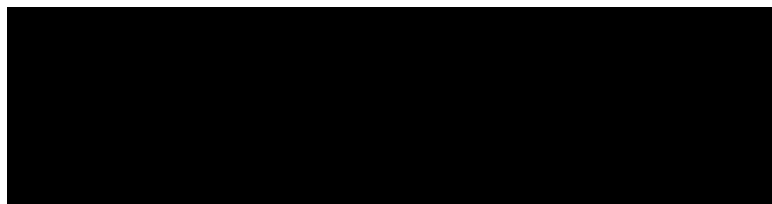
U slučaju da prilikom mjerenja specifičnog otpora tla imaju neka značajnija odstupanja u vlastitom iznosu prilikom veće dubine, odnosno pri većem međusobnom razmaku sonde, tada kažemo da je to tlo heterogeno te da nam je potrebno koristiti višeslojni model tla.

Prilikom analize većeg broja mjerenja otpora tla na raznolikim dubinama dobivaju se parametar ρ_1 i parametar ρ_2 . Jedan su od najvažnijih nedostataka grafičke metode jer određivanje modela tla počinje kada se pretpostave dva navedena parametra. Također postoji i treći parametar (h), a odnosi se na dubinu prvog sloja dobijemo uz pomoć Sunde-ove grafičke metode, koja je zasnovana na Wenner-ovom mjerenju.



Slika 3.3. Grafička metoda određivanja dvoslojnog tla [1]

Drugi način kako odrediti parametre dvoslojnog horizontalnog tla je uz pomoć analitičke primjene određenih matematičkih funkcija i formula. Specifični otpor tla kod Wennerove postavke mjerenja u dvoslojnom horizontalnom tlu se dobiva prema izrazu:



$\rho_{a(1)}$ - prividni specifični otpor dvoslojnog horizontalnog tla za Wennerov postav mjerenja

K – koeficijent refleksije

ρ_1 – specifični otpor prvog sloja tla

ρ_2 – specifični otpor drugog sloja tla

h – debljina prvog sloja tla

a – udaljenost između sonda kod Wennerova mjerenja

Kako bi se odredili parametri dvoslojnog horizontalnog modela tla moraju se pronaći minimum funkcije u kojoj suma N obuhvaća sva mjerenja:

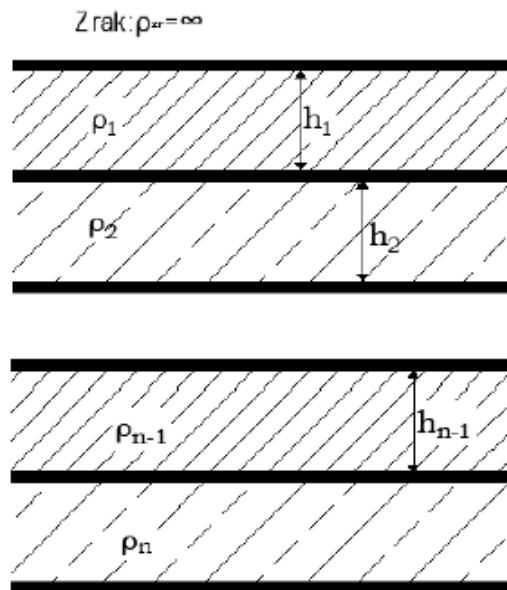
$$f(\rho_1, \rho_2, h) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{(\rho_{mi} - \rho(i))^2}{\rho_{mi}^2} \right]$$

ρ_{mi} – mjerena vrijednost specifičnog otpora tla za udaljenost između sonda 'a'

$\rho_{(i)}$ – proračunata vrijednost specifičnog otpora tla za udaljenost između sonda 'a'

Prvo se moraju zadati početni uvjeti za sva tri navedena parametra horizontalnog dvoslojnog tla. Kod parametra ρ_1 uzima se da je prosječna vrijednost početnih 10 % od mjerenih vrijednosti specifičnog otpora tla. Kod parametra ρ_2 uzima se da je prosječna vrijednost ostalih 90 % od mjerenih vrijednosti specifičnog otpora tla, uz dubinu 'h' od 1 metra. Kod izmjerenih, odnosno proračunatih vrijednosti otpora tla, definiraju se parametri horizontalnog dvoslojnog tla sa minimiziranjem srednje kvadratne pogreške. Ako se modelira tlo kao dvoslojno horizontalno u većini slučajeva ono zadovoljava projektiranje sigurnosnog sustava uzemljenja.

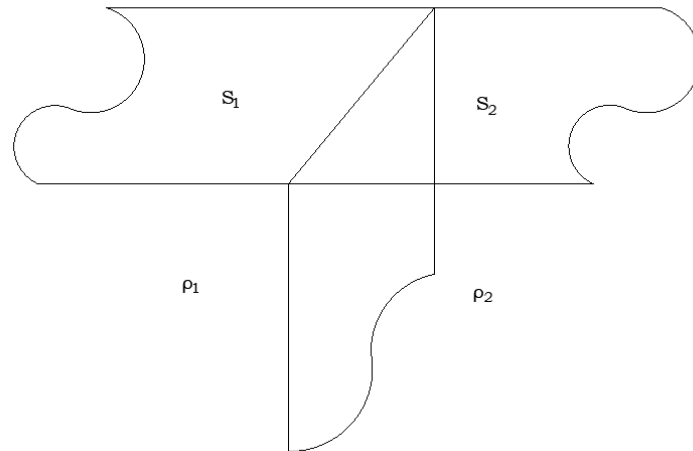
3.3. Model višeslojnog horizontalnog tla



Slika 3.4. Model višeslojnog horizontalnog tla [2]

Nejednolika struktura tla, odnosno ona tla sa više slojeva drugačijeg specifičnog otpora je u stvarnosti vrlo moguća. One su karakterizirane sa određenim specifičnim otporima i debljinom slojeva sve do zadnjeg koji posjeduje neograničenu debljinu. Određivanje parametra kod višeslojnog modela tla je puno složenija u usporedbi s jednoslojnim ili dvoslojnim modelom tla, kod njih se traži upotreba računalnih programa i viših matematičkih funkcija.

3.4. Ostali modeli tla



Slika 3.5. Model ostalih modela tla [2]

Pod ostale modele tla često se smatraju vertikalni (dvoslojne ili višeslojne) modeli tla i modeli tla kod kojih se eksponencijalno mijenja specifični otpor tla promjenom dubine tla. Od više slojeva različitih specifičnih otpornosti sastoje se vertikalni modeli. Orijentirani su tako da vertikalno u odnosu na površinu koji se mogu zapaziti gledajući krivulju specifičnog otpora u ovisnosti o udaljenosti među sondama. Po završetku određivanja specifičnog otpora pojedinog sloja moguće je određivanje nadomjesnog ekvivalentnog specifičnog otpora susjednih slojeva prema izrazu:

$$\rho_e = \frac{S \cdot \rho_1 \cdot \rho_2}{S_1 \cdot \rho_2 + S_2 \cdot \rho_1}$$

S_1, S_2 – površina prvog i drugog vertikalnog sloja

$S = S_1 + S_2$

ρ_1, ρ_2 – prividni specifični otpor prvog i drugog vertikalnog sloja

Postoje modeli kompliciranijih geometrija tla: polukuglasti, kosi, cilindrični slojevi te isto tako i nepravilni volumeni različitih otpora tla.

4. ANALIZA REZULTATA MJERENJA

4.1. Mjerenja

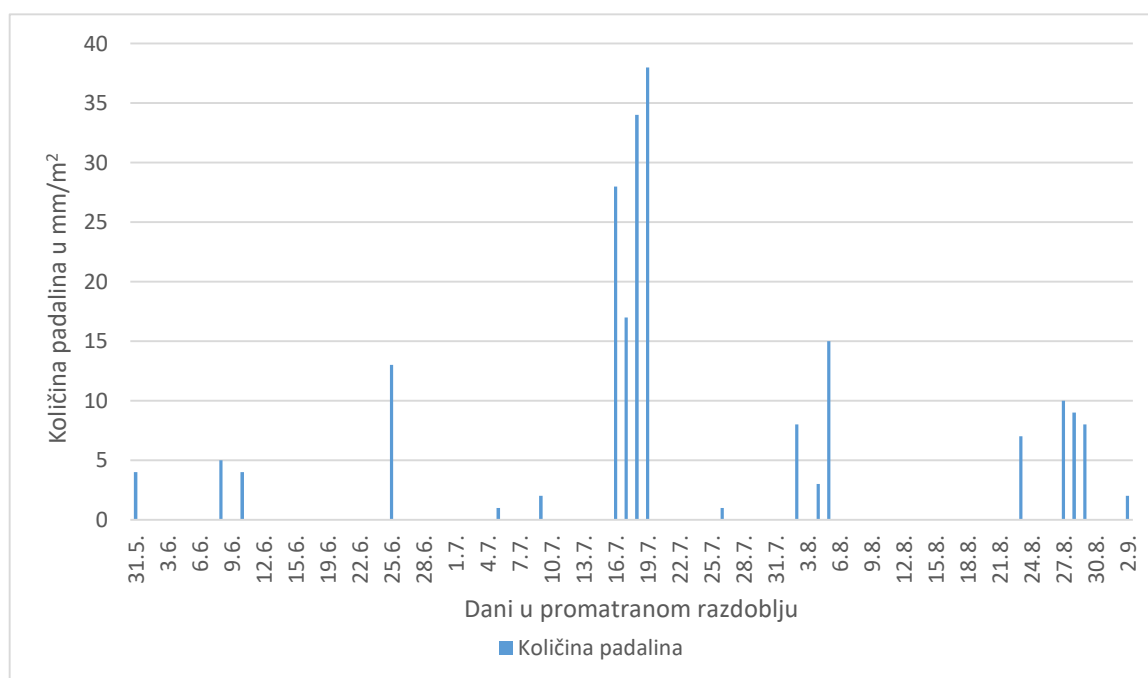
Sva mjerenja su provedena u vremenskom razmaku od 3. lipnja 2021. godine do 6. rujna 2021. godina na vikendici na odmoru Stara Drava u Donjem Miholjcu. Tokom mjerenja prikupljani su podaci o padalinama i temperaturi zraka kroz navedeni vremenski period. Tlo je u određenim tjednima bilo izrazito vlažno zbog učestalosti kiše, ali isto tako je bio period suše kada je mjerenje bilo izrazito teško izvesti iz razloga što se mjerne sonde nisu mogle zabiti na dubinu koja je bila pogodna za mjerenje. Mjerenje je izvršeno s mjernim uređajem Metrel MI 3123, a korištena je Wennerova metoda mjerenja. Na mjernom području ukopani su kolici koji su služili za oznake na razmacima od 2,5 m, 5 m, 10 m i 15 m, te su se svakih tjedan dana, ovisno o uvjetima za rad, provela mjerenja koristeći Wennerovu metodu mjerenja, a prije svakog mjerenja je zabilježena je prosječna temperatura i prosjek padalina svakog dana u tome tjednu.



Slika 4.1. Postavljene oznake za mjerenje

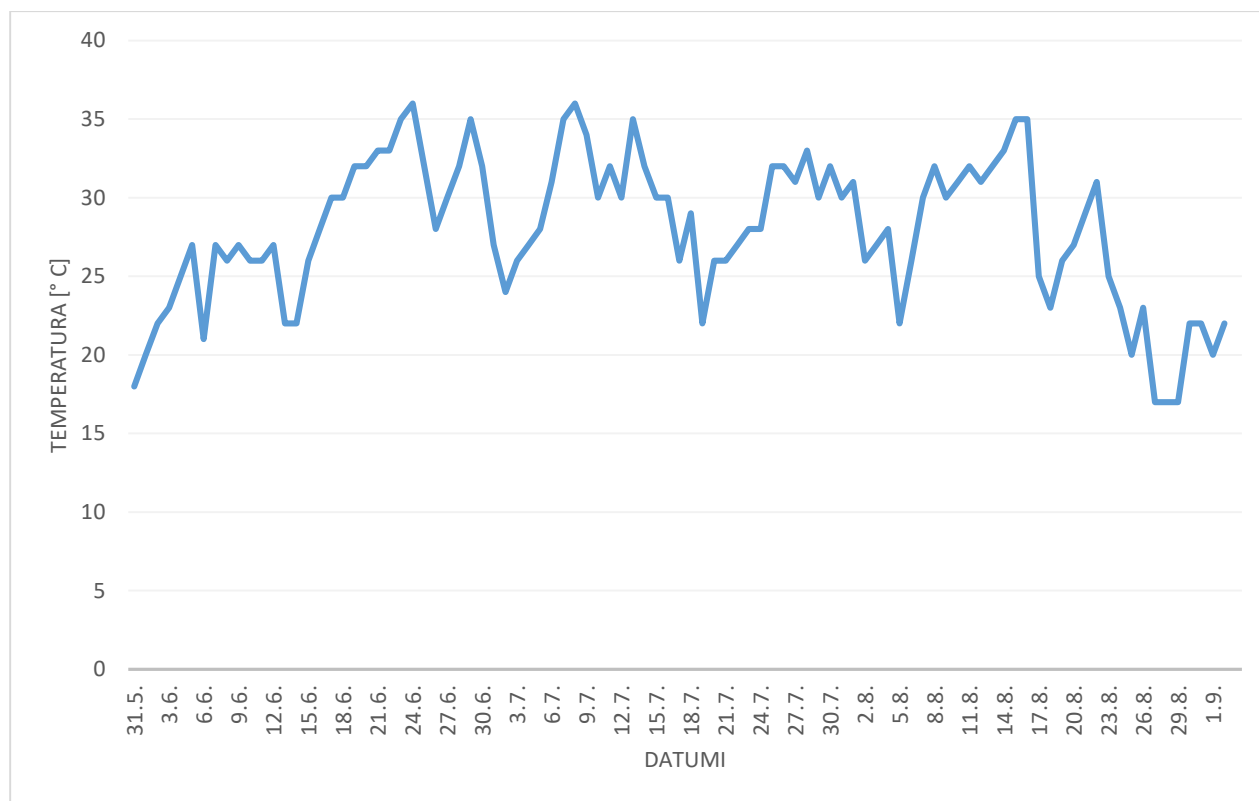


Slika 4.2. Prikupljanje mjernih podataka



Slika 4.3. Količina padalina u promatranom vremenskom razdoblju

Graf na slici 4.3 prikazuje količinu padalina u mm/m² u vremenskom razdoblju od 31. svibnja 2021. godine do 2. rujna 2021. godine. Na slici 4.4. prikazan je prosjek temperatura svakodnevno zabilježenih u vremenskom razdoblju od 1. lipnja 2021. godine do 6. rujna 2021. godine.



Slika 4.4. Prikazuje prosjek temperatura za promatrano vremensko razdoblje

Iz prethodna dva grafa zaključuje se kako su tokom mjerenja temperature zraka bile poprilično visoke, dok znatnija količina padalina bilježi se u vremenskom periodu od 16. do 19. srpnja. Tokom perioda mjerenja otpornosti tla prevladavala je suša, dok je u određenim kratkim periodima bilo vlage i padalina što se može vidjeti iz rezultata mjerenja u Tablica 4.1.

Tablica 4.1 Iznosi izmjerenih vrijednosti otpornosti tla

Mjerenje	2.5m [Ω m]	5m [Ω m]	10m [Ω m]	15m [Ω m]
1.	48,8	51,1	54,6	50,2
2.	45,3	49,9	54,9	49,2
3.	49,2	52,2	54,6	49,5
4.	49,5	52,6	54,4	49,7
5.	46,6	54,1	52,4	51,5
6.	51,9	52	48,3	40,8
7.	40,8	46,2	50,5	45,6
8.	40,9	52	52,2	47,8
9.	46,4	54	54	47,5
10.	55,2	58,4	55,7	47,1
11.	63,6	60,7	56,7	46,5

4.2. Analize otpornosti tla

Po završetku mjerenja dobiveni rezultati uvršteni su u računalni program CYMGrd kako bi se odredile vrijednosti modela tla. Kako bi se dobila otpornosti pojedinog sloja tla, u program je potrebno unijeti vrijednost za svako pojedino mjerenje koje su se obavile na udaljenosti 2,5, 5, 10 i 15 metara. Nakon unosa tih podataka dobiva se srednja otpornost tla kod modela jednoslojnog tla. Potom se u postavkama programa postavi model dvoslojnog tla te program daje debljinu gornjeg sloja tla i otpornosti gornjeg i donjeg sloja tla, te kvadratnu pogrešku mjerenja RMS.

Zaključuje se kako na većim udaljenostima između sonde, a i na većoj dubini nije došlo do značajnijih promjena za razliku od manjih udaljenosti. Također vidljivo je kako se otpornost smanjila prilikom mjerenja 7. koje je izvedeno nakon obilnih kiša u trajanju od 16.7.2021. do 19.7.2021 te se zaključuje kako vlaga i temperatura imaju velik utjecaj na specifičnu otpornost tla.

Tablica 4.2 Rezultati analize za model jednoslojnog tla

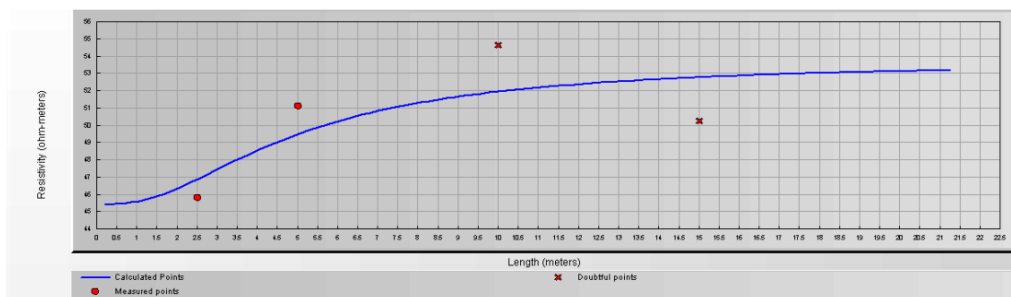
Mjerenje	Otpornost tla [Ωm]
1.	50,425
2.	49,725
3.	51,375
4.	51,55
5.	51,15
6.	51,3
7.	45,775
8.	48,225
9.	50,475
10.	54,1
11.	56,875

Tablica 4.3. Rezultati analize za model dvoslojnog tla

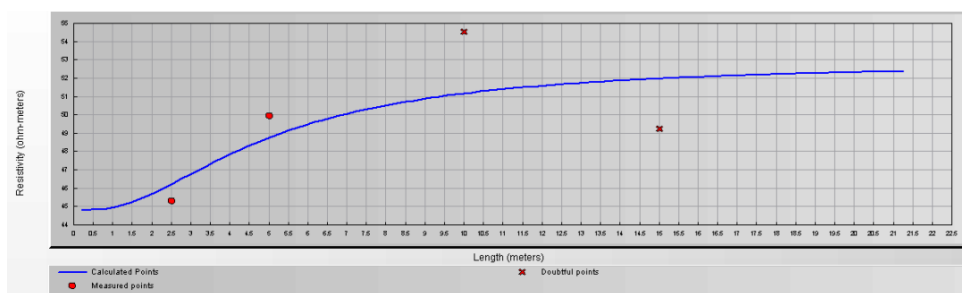
Mjerenje	RMS [%]	Debljina [m]	Gornji sloj [Ωm]	Donji sloj [Ωm]
1.	4,05	2,5	45,41	53,65
2.	4,43	2,5	44,8	52,83
3.	3,93	2,5	49,63	52,26
4.	3,78	2,5	50,05	52,3
5.	4,15	2,5	47,02	53,7
6.	0	2,5	51,3	51,3
7.	4,77	2,5	40,27	49,35
8.	7,16	2,5	41,22	52,49
9.	6,68	2,5	47,84	51,48
10.	0	2,5	54,1	54,1
11.	0	2,5	56,875	56,875

Iz tablice 4.3. vidljiva su 3 rezultata kod kojih je RMS jednak 0, razlog tomu je što su specifične otpornosti tla veoma blizu po vrijednostima, program ne može izračunati vrijednost donjeg sloja tla te zaključuje kako je to tlo jednoslojno. Nadalje, vidljivo je kako je debljina gornjeg sloja tla u svim slučajevima jednaka debljini od 2,5 m, dok je otpornost gornjeg sloja

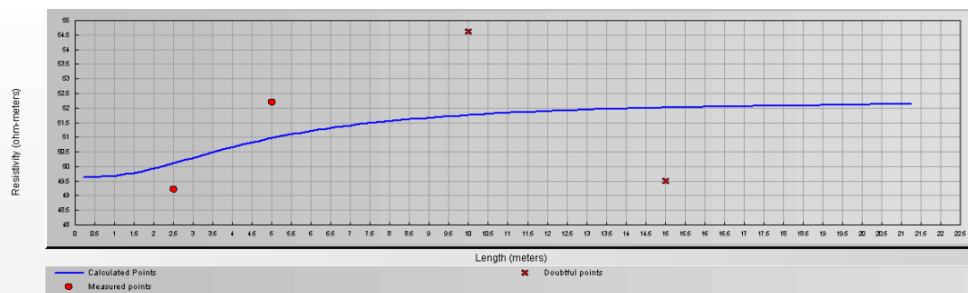
uvijek manja do otpornosti donjeg sloja, osim u slučajevima kada je program očitao jednoslojno tlo. Na slikama 4.5. do 4.15. prikazana su grafički rezultati dvoslojnog tla u modelu CYMGrd. Na slici 4.16. dan je primjer rezultata za model jednoslojnog tla samo za prvo mjerenje iz razloga što se graf otpornosti ne mijenja te je uvijek konstantan, a mijenja se samo visina po Y osi u ovisnosti o srednjoj vrijednosti otpornosti.



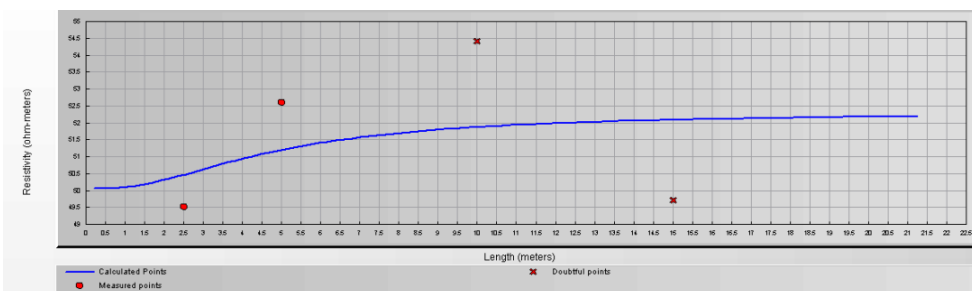
Slika 4.5. Grafička analiza: Dvoslojno tlo (prvo mjerenje)



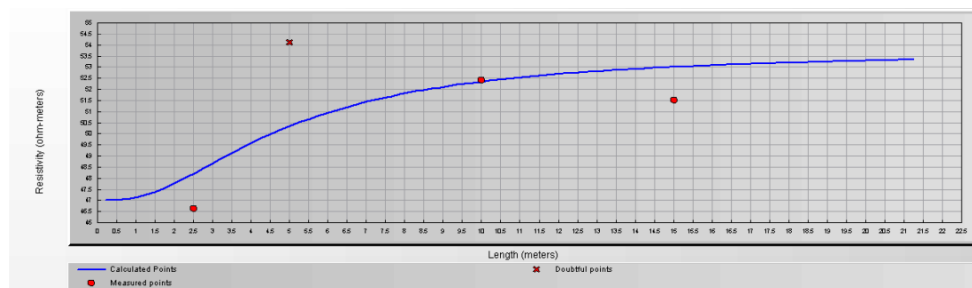
Slika 4.6. Grafička analiza: Dvoslojno tlo (drugo mjerenje)



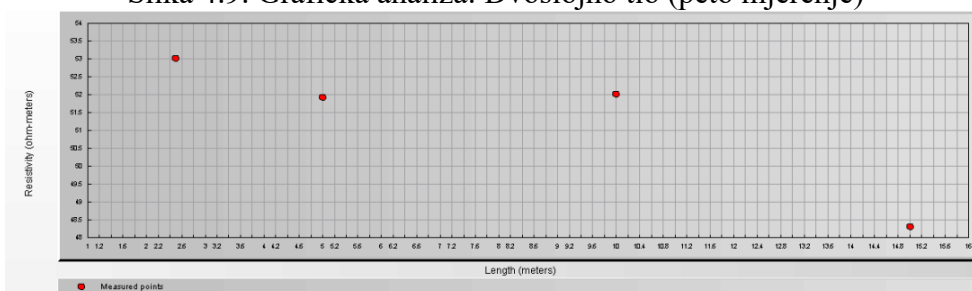
Slika 4.7. Grafička analiza: Dvoslojno tlo (treće mjerenje)



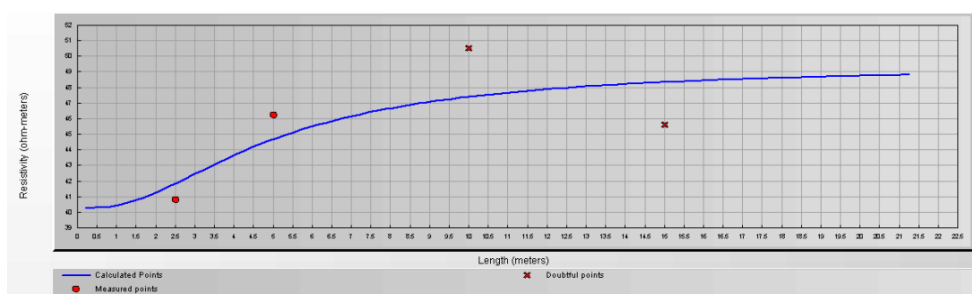
Slika 4.8. Grafička analiza: Dvoslojno tlo (četvrto mjerenje)



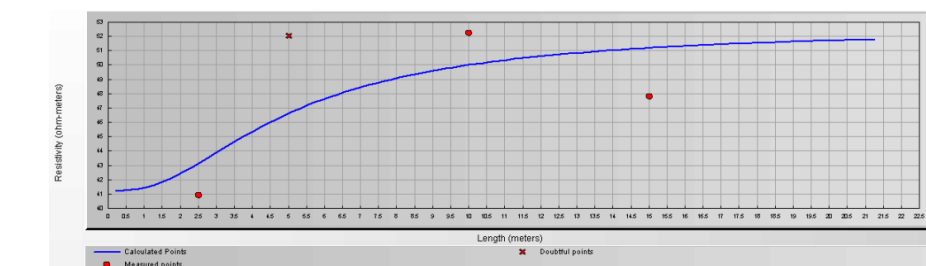
Slika 4.9. Grafička analiza: Dvoslojno tlo (peto mjerenje)



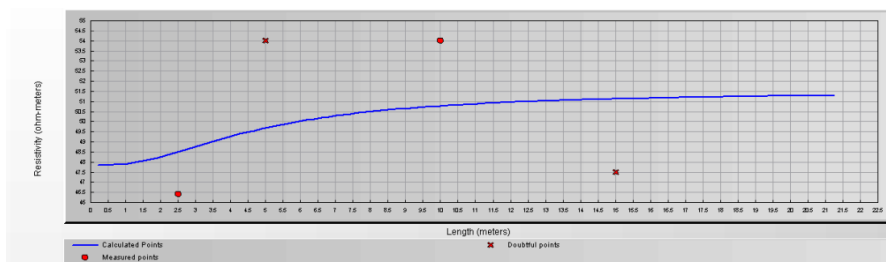
Slika 4.10. Grafička analiza: Dvoslojno tlo (šesto mjereje)



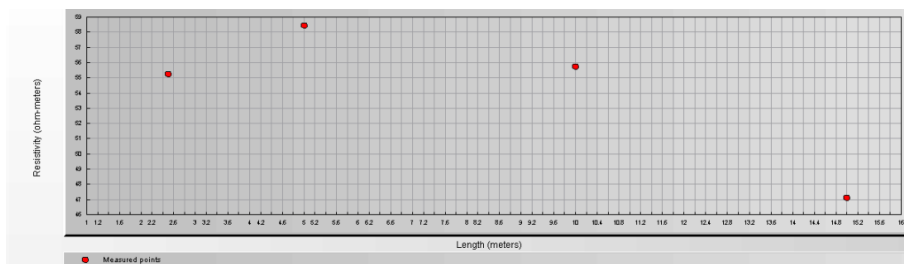
Slika 4.11. Grafička analiza: Dvoslojno tlo (sedmo mjerenje)



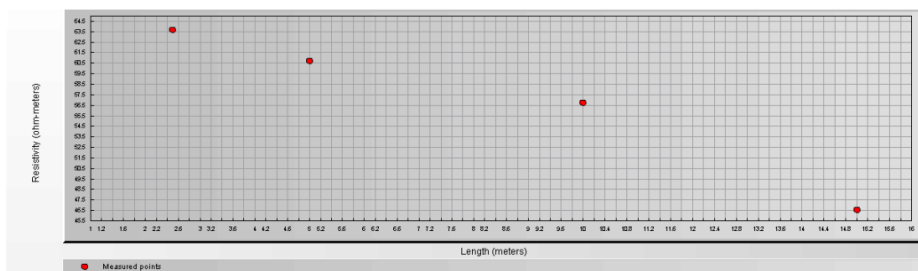
Slika 4.12. Grafička analiza: Dvoslojno tlo (osmo mjerenje)



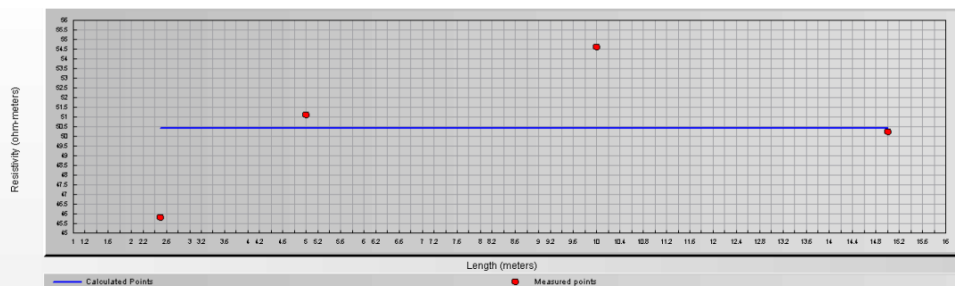
Slika 4.13. Grafička analiza: Dvoslojno tlo (deveto mjerenje)



Slika 4.14. Grafička analiza: Dvoslojno tlo (deseto mjerenje)



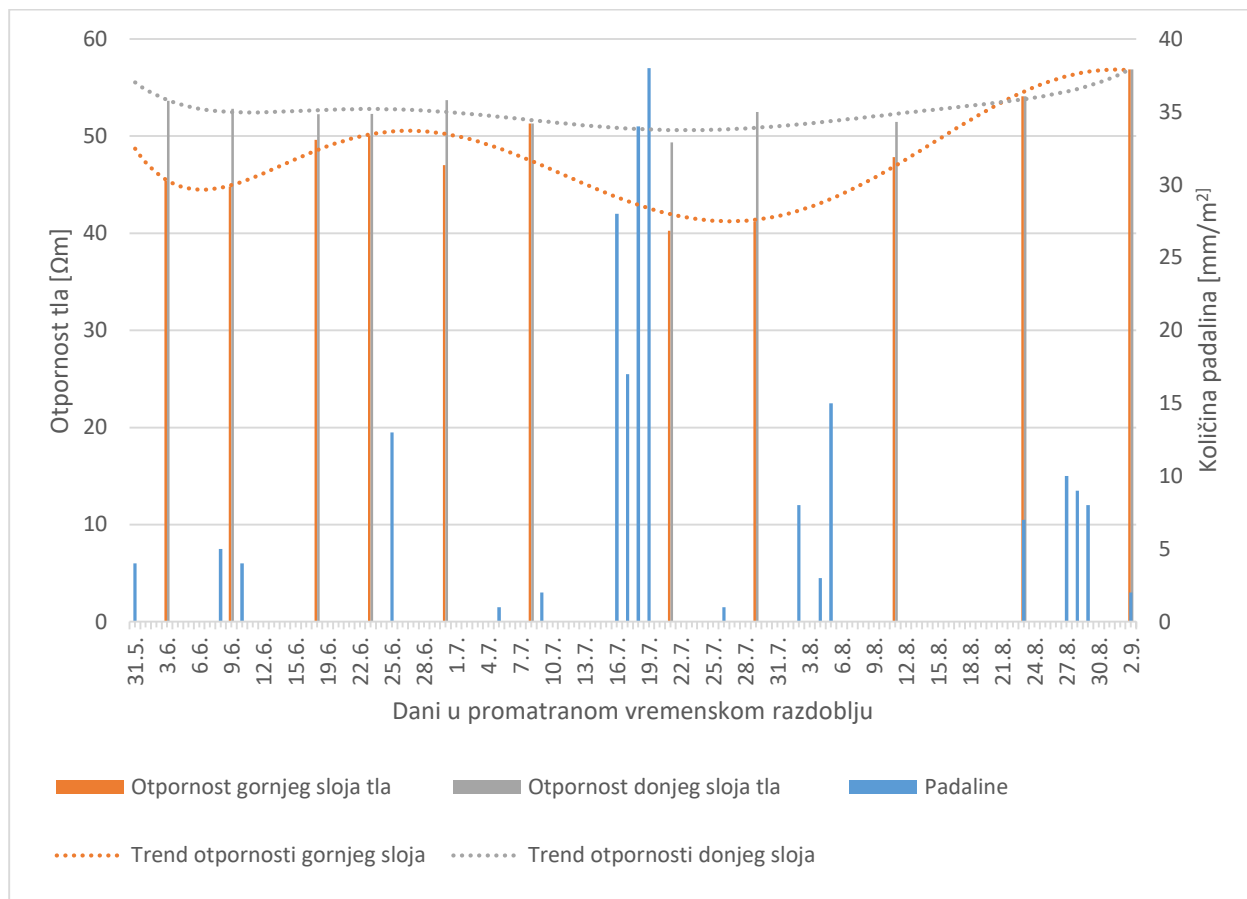
Slika 4.15. Grafička analiza: Dvoslojno tlo (jedanaesto mjerenje)



Slika 4.16. Grafička analiza: Jednoslojno tlo

4.3. Analize utjecaja padalina na otpornost tla

Na slici 4.17. prikazan je odnos količine padalina i otpornosti tla u promatranom vremenskom razdoblju.

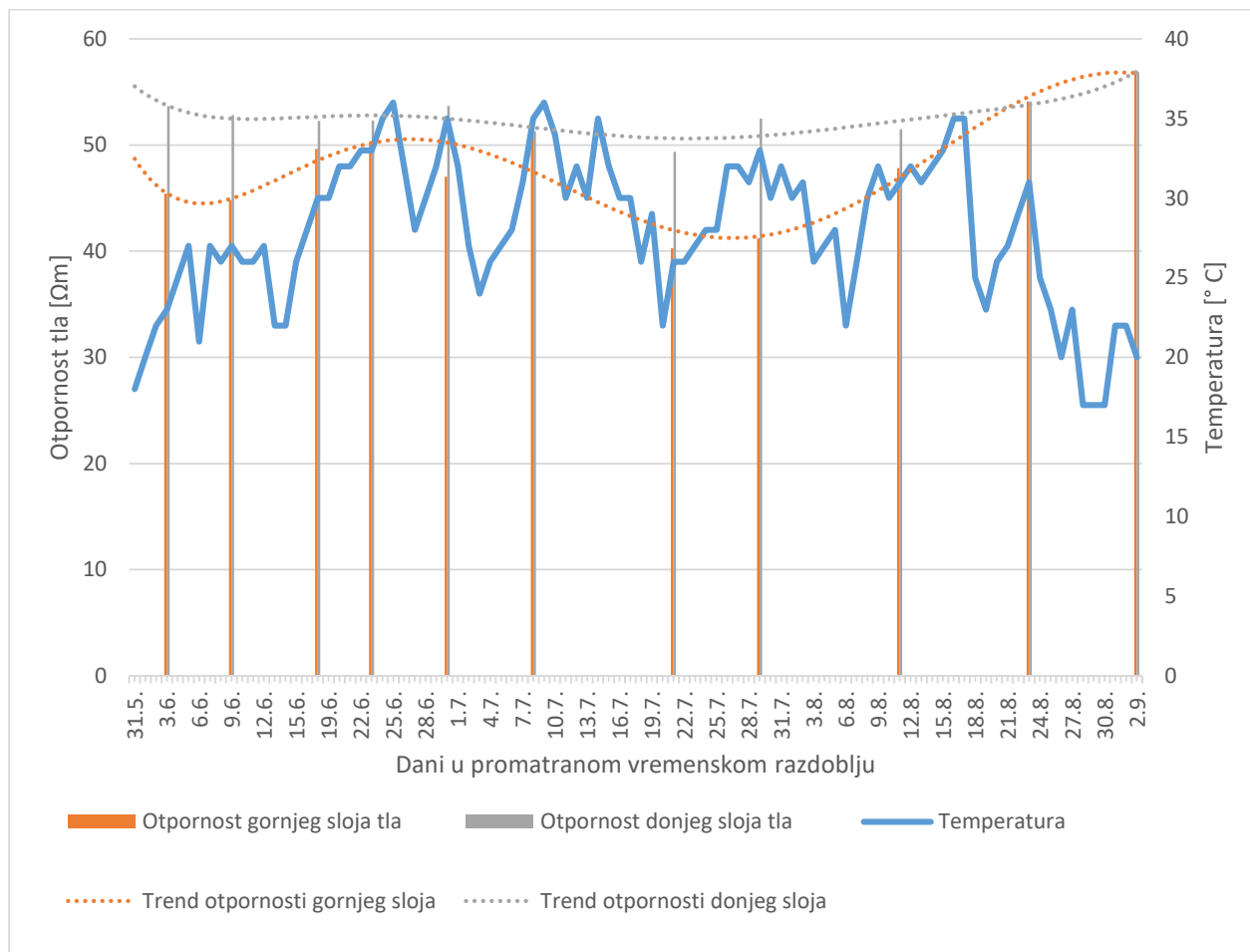


Slika 4.17. Odnos količine padalina i otpornosti tla u promatranom vremenskom razdoblju

Kao što je već ranije definirano u poglavljima 2 i 3 jest da se otpornost tla mijenja s dubinom tla, odnosno od velike je važnosti je li mjereno tlo jednoslojno, dvoslojno ili višeslojno. Rezultati mjerenja su od velike važnosti zbog proračuna uzemljenja i određivanja električnih svojstava tla. U navedenim mjerenjima nije bilo situacija poput metalnih konstrukcija ukopanih u zemlju. Iz grafa na slici 4.17 vidljivo je da porastom padalina otpornost gornjeg sloja je značajno mijenja, dok se otpornost donjeg sloja ne mijenja značajno. Otpornost donjeg sloja će za sve vrijednosti mjerenja veća je u odnosu na otpornost gornjeg sloja tla. U osmome mjesecu vidljivo je da padalina nema kao u prethodnim mjesecima te da je u sušnim razdobljima otpornost gornjeg sloja tla najveća.

4.4. Analize utjecaja temperature na otpornost tla

Na slici 4.18. prikazan je odnos temperature i otpornosti tla u promatranom vremenskom razdoblju.



Slika 4.18. Odnos temperature i otpornosti tla u promatranom vremenskom razdoblju

Na slici 4.18. vidljivo je da u promatranom razdoblju temperatura ne utječe značajno na specifični otpor tla, odnosno nije utvrđena korelacija između promijene temperature i otpornosti tla. U prikazanom razdoblju temperature su bile razmjerno visoke u odnosu na druga godišnja doba godine. U zimskim mjesecima kada je tlo zamrznuto, za očekivati je da bi vrijednosti otpornosti tla gornjeg sloja bile veće. Također, u jesenskim i proljetnim mjesecima očekuje se da bi otpornost gornjeg sloja bila manja nego u ljetnim mjesecima zbog više padalina. Temperatura utječe na brzinu isušivanja te smanjenja vlažnosti tla te time i otpornosti tla. U svakom slučaju, za očekivati je da temperatura i padaline utječu samo na otpornost gornjeg sloja tla. U sušnim razdobljima kao što je osmi mjesec iz slike 4.18. vidljivo je da je otpornost tla najveća. Usporedno sa odnosom

količina padalina i otpornosti tla u istom vremenskom razdoblju vidljivo je da padaline imaju veći utjecaj na otpornost tla nego u slučaju s temperaturom.

5. ZAKLJUČAK

Jedan od glavnih faktora koji bi se trebali uzeti pri projektiranju sustava uzemljenja je karakteristika tla. Različite su vrijednosti specifične otpornosti u ovisnosti o klimatskim uvjetima, vrsti tla, dubine te vlažnosti. Na ukupni otpor uzemljenja uzemljivačkog dijela uvelike utječe specifični otpor tla. Kako bi se pravilno postavio uzemljivački sustav važno je određivanje specifične otpornosti tla, što je moguće izvoditi Wennerove metodom, ali i ostalima koje su navedene u radu.

U sklopu ovoga rada izvršena su mjerenja otpornosti tla u vremenskom razmaku od 3. lipnja 2021. godine do 6. rujna 2021. godina na lokaciji u Donjem Miholjcu. Tokom mjerenja prikupljeni su podaci o padalinama i temperaturi zraka kroz navedeni vremenski period. Dobiveni rezultati iskorišteni su za modeliranje jednoslojnog i dvoslojnog tla u računalnom programu CYMGrd.

Rezultati dvoslojnog modela tla pokazuju da je za promatrani slučaj debljina gornjeg sloja 2,5m te su vrijednosti otpornosti gornjeg sloja manje nego vrijednosti otpornosti donjeg sloja. Nadalje, analiza rezultata potvrđuje pretpostavku da se otpornost gornjeg sloja tla u značajnoj mjeri mijenja s količinom padalina. Također, zaključeno je kako se otpornost donjeg sloja ne mijenja značajno s količinom padalina. Uz to, trend promijene otpornosti u promatranom razdoblju nije se značajno mijenjao s promjenama temperature. Za detaljnije proučavanje utjecaja temperature predlaže se da period promatranja obuhvati više godišnjih doba.

6. SAŽETAK

Na početku završnog rada objašnjeni su teorijski pojmovi vezani za atmosfersko tlo te utjecaji koji utječu na njega. Opisane su vrste i modeli tla za proračun uzemljenja te su navedene i definirane različite metode za mjerenje specifičnog otpora tla, metoda koja je korištena za ovaj završni je Wenner-ova metoda mjerenja specifičnog tla. U praktičnom dijelu korištene su četiri sonde gdje su vanjske sonde služile kao struje, a unutarnje sonde kao napon. Korišten je uređaj Metrel MI 3123 pomoću kojeg su dobiveni rezultati unešeni u program CYMGrd te su dobiveni rezultati za gornji i donji sloj tla. Na kraju je urađena usporedba odnosa količina padaline i otpornosti tla te odnos temperature i otpornosti tla kako bi se prikazala promjena otpornosti tla u odnosu na količinu padalina i porasta temperature.

Ključne riječi: specifični otpor, tlo, Wenner-ova metoda

7. ABSTRACT

The final thesis begins by introducing and explaining the theoretical concepts related to atmospheric soil, and the things that affect it. The types and models of soil used to calculate grounding are described. Additionally, various methods, for measuring specific soil resistance, are described and defined. The method used in this paper is Wenner-Test, for measuring soil resistivity. In the practical part, four probes were used, in which the external probes were used for current, and the internal ones for voltage. Metrel MI 3123, was used to acquire data which was then submitted into the CYMGrd program, after which results were obtained for the top and bottom part of the soil. Consequently, a comparison was made between the amount of rainfall and soil resistance, and also between temperature and soil resistance. This was done to show the change in soil resistance with respect to rainfall and temperature rise.

Key words: specific soil resistance, soil, Wenner-Test

LITERATURA

- [1.] Majdandžić, F., Uzemljivači i sustavi uzemljenja, Graphis, Zagreb, 2004.
- [2.] Knežević, G., Uzemljivači i sustavi uzemljenja, materijali s predavanja, FERIT Osijek, 2021.
- [3.] Požar, H., Visokonaponska rasklopna postrojenja, Tehnička knjiga, Zagreb, 1967.
- [4.] Tomiša, T., Kvaliteta opskrbe električnom energijom, materijali za predavanje, FER Zagreb
- [5.] CYMGRD 6.3 for Windows, User's guide and reference manual, listopad 2006.

ŽIVOTOPIS

David Šimara rođen je 25. ožujka 1998. godine u Osijeku. Pri završetku osnovne škole Augusta Harambašića u Donjem Miholjcu upisuje srednju Elektrotehničku školu u Valpovu. Nakon završenog obrazovanja u srednjoj školi dobiva zvanje „Elektrotehničar“. Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija upisuje 2017. godine gdje pohađa stručni studij, smjer Elektroenergetika.