Mapiranje geoelektrične vodljivosti

Breskvar, Hrvoje

Undergraduate thesis / Završni rad

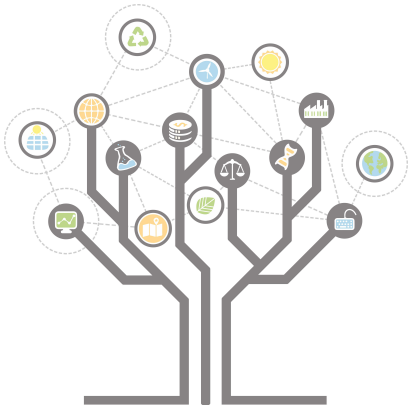
2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:515875

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**



Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Mapiranje geoelektrične vodljivosti

Breskvar, Hrvoje

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:515875

Rights / Prava: In copyright

Download date / Datum preuzimanja: **2020-10-27**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

HRVOJE BRESKVAR

MAPIRANJE GEOELEKTRIČNE VODLJIVOSTI

ZAVRŠNI RAD

VARAŽDIN, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

ZAVRŠNI RAD

MAPIRANJE GEOELEKTRIČNE VODLJIVOSTI

KANDIDAT:

HRVOJE BRESKVAR

MENTOR:

doc. dr. sc. MARIO GAZDEK

VARAŽDIN, 2018.

Sveučilište u Zagrebu
Geotehnički fakultet

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: HRVOJE BRESKVAR

Matični broj: 2174 - 2012./2013.

NASLOV ZAVRŠNOG RADA:

MAPIRANJE GEOELEKTRIČNE VODLJIVOSTI

Rad treba sadržati: 1. Uvod
2. Mapiranje geoelektrične vodljivosti
3. Oprema za mapiranje otpornosti (vodljivost)
4. Primjeri primjene mapiranja otpornosti (vodljivost)
5. Zaključak
Literatura

Pristupnik je dužan predati mentoru jedan uvezen primjerak završnog rada sa sažetkom. Vrijeme izrade završnog rada je od 45 do 90 dana.

Zadatak zadan: 16.04.2018. Rok predaje: 14.09.2018.

Mentor:
MGazdek
Doc.dr.sc. Mario Gazdek

REPUBLIKA HRVATSKA - VARAŽDIN - GEOTEHNIČKI FAKULTET - SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

Predsjednik Odbora za nastavu:
Izv.prof.dr.sc. Igor Petrović

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod naslovom

MAPIRANJE GEOELEKTRIČNE VODLJIVOSTI

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom doc.dr.sc. Maria Gazdeka.

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, _____.

HRVOJE BRESKVAR
(ime i prezime)

_____
(vlastoručni potpis)

SAŽETAK

NASLOV RADA: Mapiranje geoelektrične vodljivosti

AUTOR: Hrvoje Breskvar

MENTOR: doc. dr. sc Mario Gazdek

U završnom radu opisana je metoda Mapiranja geoelektrične vodljivosti (otpornosti) pomoću geofizičkog sustava za terensko mjerenje OhmMapper TR5 (Geometrics Inc. OYO Corporation USA). Uvodno je objašnjen koncept metode kapacitivnog mjerenja otpornosti (vodljivosti), a potom je podrobnije opisan sam uređaj-sustav, njegovi dijelovi i način rada, prednosti i nedostaci. U razradi teme izdvojene su usporedbe sa standardnim geoelektričnim metodama te karakteristične primjene mapiranja vodljivosti: mapiranje kroz vodljive slojeve nasipa, mapiranje korozivnosti geomedija, mapiranje vodljivosti radi određivanja vlage u tlu i profiliranje propusnih naslaga u blizini odlagališta otpada.

KLJUČNE RIJEČI: mapiranje otpornosti (vodljivosti), kapacitivno mjerenje otpora, OhmMapper, primjena mapiranja otpornosti u inženjerstvu okoliša.

Sadržaj

1. Uvod 6
2. Mapiranje geoelektrične vodljivosti 8
   2.1. Fizikalne osnove metode 8
   2.2. Opis metode kapacitivnog mjerenja otpornosti 9
   2.3. Kapacitivno sprezanje 11
3. Oprema za mapiranje otpornosti (vodljivosti) 12
   3.1. Elektrode Ohmmappera 13
   3.2. Odašiljač 15
   3.3. Prijamnik 16
   3.4. Dubina istraživanja 16
   3.5. OhmMapper TR5 (Geometrics Inc.) 17
4. Primjeri primjene mapiranja otpornosti (vodljivosti) 19
   4.1. Usporedba s konvencionalnim galvanskim metodama na koherentnom tlu 20
   4.2. Primjena mapiranja vodljivosti na asfaltnoj podlozi 21
   4.3. Primjena mapiranja vodljivosti duž nasipa s asfaltiranom krunom 23
   4.4. Mapiranje korozivnosti geomedija 25
   4.5. Mapiranje vodljivosti radi određivanja vlage u tlu 25
   4.6. Profiliranje šljunkovitih naslaga u području odlagališta otpada 27
5. Zaključak 29

Popis literature 30

Popis slika 32

Popis tablica 34

1. Uvod

Mapiranje vodljivosti nekog geomedija danas najčešće podrazumijeva interpretaciju rezultata terenskih istraživanja metodom kapacitivnog mjerenja otpornosti (vodljivosti) (engl. capacitively-coupled resistivity, CCR).

Za razliku od standardnih geoelektričnih metoda mjerenja (galvanske) otpornosti, ta metoda ne zahtijeva čvrsti kontakt elektroda i geomedija (zabijanje elektroda), a koristi se izmjenična struja određene frekvencije. Brzina izvođenja terenskih mjerenja je zbog toga znatno veća, a rezultati su usporedivi s podacima konvencionalnih geoelektričnih metoda u kojima se koristi istosmjerna struja. Osim u stijenskim masama, metoda se pokazala pouzdanom i za mjerenja na vodljivim koherentnim tlima (primjerice gline, glinoviti i prašinasti slojevi). Stijenske mase uglavnom imaju znatno veću otpornost od koherentnih tala (osim ako nisu raspucale i saturirane vodom ili zapunjene glinovitom supstancom), a kada otpornosti prelaze nekoliko kΩm, to znači da su uglavnom kompaktne i nerastrošene pa problem sa zabijanjem elektroda i kontaktom sa stijenom dolazi u prvi plan kao najveći u izvođenju mjerenja (velike pogreške i odstupanja tijekom mjerenja). Korisnost ove metode dolazi do izražaja i kada se trebaju snimiti dugi profili do dubine 10-ak metara, kao što je primjerice snimanje stanja nasipa akumulacije. Ipak, znatna ograničenja primjene su vodljivi geomediji i primjena u urbanim sredinama s izgrađenom infrastrukturnom mrežom pod površinom.

Iskustvo je pokazalo da je za analize sloma tla, odnosno kolapsa nosivosti i stabilnosti, te u studijama stanja okoliša u inženjerstvu okoliša, vrlo bitno razumijevanje geološkog stanja i uvjeta pod površinom do dubine 10-ak metara. U takvim su situacijama potrebne geofizičke metode za brzo i učinkovito te ekonomski opravdano snimanje, radi što kraćeg vremena za donošenje odluka o mjerama sanacije.

Postoje već razvijene metode za takve namjene, kao što je primjerice kontinuirano seizmičko profiliranje (engl. land streamers) (Inazaki, 2002), no slijedeći opće pravilo o komplementarnosti geofizičkih metoda, razvijena je analogna geoelektrična metoda, odnosno kapacitivno mjerenje otpornosti (Timoffev et al, 1994; Shima et al, 1995;

Sabo, 2008). Zbog pouzdanosti i uspješnosti primjene te metode, do danas se ukorijenio među korisnicima naziv „mapiranje otpornosti“ prema vrsti uređaja/sustava za mjerenje (primjerice Ohmmapping – resistivity mapping, proizvođača Gemetrics, Inc., San Jose, USA). Budući da se problematika u inženjerstvu okoliša najčešće svodi na posljedice promjena koje uzrokuju onečišćivači u tlu i vodama, koji uglavnom smanjuju otpornost geomedija, veće će vrijednosti električne vodljivosti (inverzna fizikalna veličina specifičnog električnog otpora) stoga odmah ukazivati na zone mogućeg zagađenja. Takvo je onda mapiranje vodljivosti fizikalno određeno, no ima i značajan psihološki efekt na korisnika podataka, jer vizualno veća vodljivost ukazuje na potencijalno veće onečišćenje u geomediju i zbog toga mnogo bržu reakciju.

2. Mapiranje geoelektrične vodljivosti

Koncept metode mapiranja vodljivosti (otpornosti) je po svemu istovjetan standardnoj geoelektričnoj dipol-dipol metodi, osim u primjeni izmjeničnog umjesto istosmjernog napona i načinu realizacije kontakta elektrode i geomedija. Taj se kontakt ostvaruje kapacitivnom spregom plohe elektrode i površine geomedija. U osnovi je dakle upotreba kondenzatora za stvaranje struje naboja (iniciranje strujnog toka) i za mjerenje napona nastalog kao posljedica tog toka kroz geomedij.

2.1. Fizikalne osnove metode

Ova je geoelektrična metoda dobila ime po njemačkom fizičaru Georgu Simonu Ohmu (1789-1854). On je ustanovio vezu između elektromotorne sile (E, odnosno razlike električnog potencijala U = V1 – V2 = ΔV) i toka struje (I) slobodnih nositelja električnog naboja. Primijetio je da se taj tok naboja, potaknut razlikom potencijala, ne događa bez stanovite „frikcije“, koju je nazvao električni otpor, te je pokazao da je upravo ta veličina konstanta proporcionalnosti u odnosu:

$$E\,[V] = R\,[\Omega]\; I\,[A] \qquad (1)$$

Navedeni izraz (1) poznati je oblik Ohmovog zakona pomoću kojeg je moguće objasniti mnoge pojave i zbivanja iz područja elektriciteta. Jedinice u zakonu su: Volt [V], Ohm [Ω] i Amper [A].Istodobno su istraživači primijetili da otpor R ovisi o vrsti vodiča, njegovoj duljini i presjeku. Duljina L [m] i poprečni presjek A [m^2] su geometrijske veličine vodiča, a inherentno svojstvo po kojem se međusobno razlikuju različite vrste medija je nazvano „otpornost“ ρ [Ω m] (taj se naziv u Geofizici zadržao do danas, dok se u fizici koristi „specifični električni otpor“). Eksperimentalno je dokazan njihov odnos:

$$R\,[\Omega] = \rho\,[\Omega\ m]\; L\,[m]\; (A\,[m^2])^{-1} \qquad (2)$$

Iz tog se odnosa može odrediti otpornost, ako se mjere jakost struje (I) i razlika potencijala (ΔV) te ako je poznata geometrija vodiča (L i A):

$$\rho\ [\Omega\ m] = \Delta V\ [V]\ A\ [m^2]\ (I\ [A]\ L\ [m])^{-1} \quad (3)$$

Električna vodljivost σ je recipročna fizikalna veličina otpornosti ρ, mjeri se u simensima po metru [S/m], a pokazuje sposobnost nekog medija da provodi struju električnog naboja.

$$\sigma\ [S/m] = (\rho\ [\Omega\ m])^{-1} \quad (4)$$

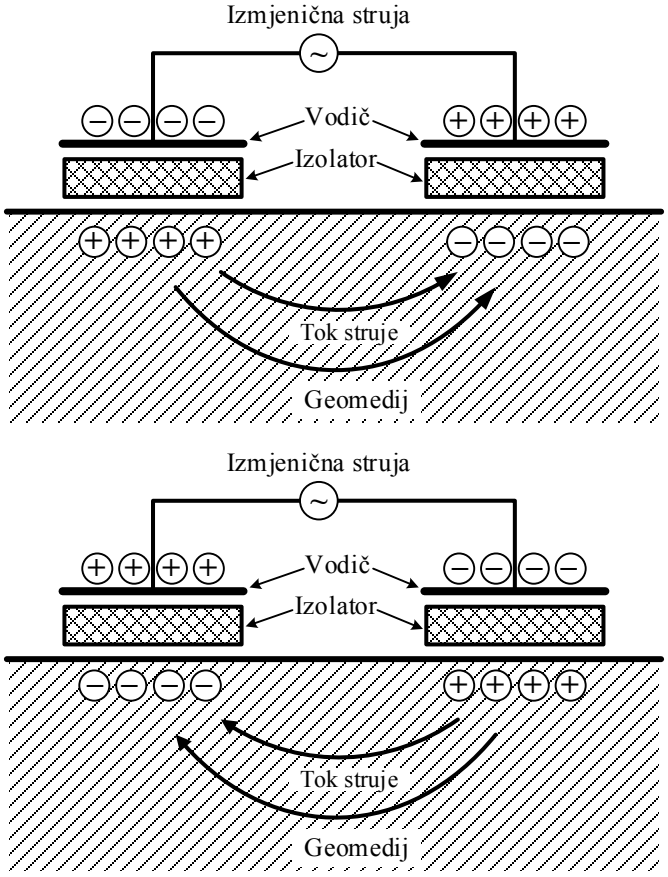
U geofizičkim geoelektričnim metodama, otpornost se koristi kao relevantan distinkcijski (vrste tla i stijena) i dijagnostički (saturiranost vodom ili ispunjenost glinom) parametar. Identifikacija različitih vrsta geomedija i detekcija različitih mehaničko-fizičkih, ali i kemijskih promjena u njemu je danas posebno važna za primjenu u inženjerstvu okoliša. Geomedij blizu površine je uglavnom iznimno heterogen (i anizotropan) pa se vrijednosti otpornosti koje se mogu izračunati izravno iz Ohmovog zakona nazivaju „prividne otpornosti“. Te su otpornosti zapravo uprosječene vrijednosti čitavog volumena geomedija kroz koji prolazi strujni tok (po dubini i lateralno). Izraz za otpornost se mora još korigirati za oblik tijela koji taj tok zauzima u geomediju (pretpostavlja se sfera).

2.2. Opis metode kapacitivnog mjerenja otpornosti

Konvencionalne geoelektrične metode otpornosti se temelje ne četvero-elektrodnom sustavu s poznatim razmacima između njih (poznata geometrija). Najčešće vanjski par elektroda služi kao izvor i ponor strujnog toka (zato se i nazivaju strujne elektrode i označavaju se s C1 i C2). Prema Ohmovom zakonu, gdje god postoji strujni tok u geomediju mora postojati i razlika električnog potencijala. Drugi par elektroda se zato postavlja u istom profilu (na istom pravcu) koji određuju strujne elektrode, najčešće između njih. Na njima se mjeri razlika potencijala kojeg tok struje, potaknut nekom vanjskom elektromotornom silom, stvara u geomediju. Te se elektrode nazivaju potencijalne elektrode (njihove su oznake sukladno P1 i P2). Pri izvođenu mjerenja je posebno važno ostvariti dobar, čvrsti kontakt elektroda (šipke su od nehrđajućeg metala prokroma, nehrđajući čelik s najmanje 12% kroma) i geomedija pa se zbog toga

elektrode zabijaju u tlo, odnosno stijenu (za stijenu se koriste elektrode manjeg promjera i manje duljine; promjer je oko 8 mm, a duljina kontakta može biti svega 50 mm).

Fizikalni koncept metode kapacitivnog mjerenja otpornosti, odnosno mapiranja vodljivosti, prikazuje Slika 1. Osnove komponente mjernog sustava su izvor izmjeničnog napona i dva kondenzatora kojima je jedna ploča vodič, kao element uređaja, a druga ploča je kontaktna ploha-površina geomedija. Između ploča kondenzatora je postavljen izolator, pa je tako ostvarena kapacitivna sprega (engl. capacitively-coupled) vanjske ploče uređaja i kontaktne površine geomedija u kondenzatorski par. Kada se vodljive ploče sustava stave pod napon, na pločama kondenzatora se pojavi naboj različite polarizacije. Budući da su i ploče vodiča različito nabijene, u samom geomediju se pojavljuje izvor (pozitivan naboj) i ponor (negativan naboj) električne struje, pa je na taj način osiguran tok električne struje kroz geomedij. S promjenom polariteta na izvoru (izmjenični napon), očito će se promijeniti i polaritet na pločama kondenzatora, a onda će se posljedično promijeniti izvor i ponor naboja, a time i smjer električne struje. Pri ovakvom radu sustav ima funkciju odašiljača (engl. transmitter).



Slika 1. Konceptualni model kapacitivnog mjerenja otpornosti (engl. capacitively-coupled resistivity, CCR) (Yamasita et al., 2004).

Kada se jednom uspostavi tok struje u geomediju, po istom principu sustav može služiti za mjerenje napona stvorenog na pločama kondenzatora, pa tada sustav ima funkciju prijamnika (engl. receiver). Iz izmjerenih vrijednosti napona stvorenog u geomediju i jakosti električne struje, uz poznatu geometriju sustava može se odrediti otpornost, odnosno vodljivost geomedija. Princip interpretacije rezultata mjerenja je po svemu drugome istovjetan metodama interpretacije standardnih geoelektričnih metoda.

2.3. Kapacitivno sprezanje

Kondenzator se inženjerski vizualizira kao sendvič dvaju vodiča (metalnih ploča) s izolatorom između njih (primjerice, dvije metalne ploče istih dimenzija, razmaknute, sa zrakom kao izolatorom). Kada se na jednu od ploča dovede naboj, a potom se odmah odvede, elektroni na drugoj ploči će doživjeti pomak samo za vrijeme dok postoji naboj na prvoj (Groom, 2018). Ako se na ploču kontinuirano i naizmjenično dovodi i odvodi naboj (alternacija), onda će se u drugoj ploči uspostaviti tok jednake količine naboja. Zbog toga će se pod utjecajem izmjeničnog napona na jednoj ploči kondenzatora (alternacija), pojaviti izmjenični napon (istog iznosa) na drugoj ploči.

To svojstvo pomaka naboja u jednom vodiču uzrokovanog izmjeničnim naponom u drugom bliskom vodiču se naziva kapacitivno sprezanje (engl. capacitive coupling). Upravo se to svojstvo koristi u sustavu/metodi za mapiranje otpornosti/vodljivosti. U praksi se uobičajeno koristi naziv Ohmmapper (engl.) za uređaj/sustav kojim se izvode mjerenja na terenu. Odašiljač sustava koristi sprezanje elektrode i geomedija za pokretanje strujnog toka u njemu, a prijamnik koristi sprega geomedija i elektrode za mjerenje napona nastalog u geomediju.

I u ovom se konceptu može koristiti Ohmov zakon uvođenjem pojma kapacitivnog otpora Xc [Ω] (poznat kao treći oblik Ohmovog zakona):

$$E\,[V] = Xc\,[\Omega]\; I\,[A] \qquad (5)$$

Kapacitivni otpor (engl. reactance) se pojavljuje na kondenzatoru zbog izmjeničnog nabijanja u jednom smjeru, pražnjenja, ponovnog nabijanja u suprotnom smjeru te ponovnog pražnjenja (jedan ciklus) pri čemu se razvija izmjenični napon. Maksimalne vrijednosti nastaju u trenutku kada strujni tok prestane i nastoji promijeniti smjer (napon kasni za strujom), pa se po tome razlikuje od radnog (Ohmskog) otpora (razlika potencijala je mjerljiva samo u trenutku kada struja teče kroz tijelo, napon i struja su u istoj fazi).

Kapacitet kondenzatora C [F] (Farad) se obično definira kao njegov parametar kojim je određena količina naboja Q [C] (Coulomb) koju sustav može primiti pri nekom naponu U [V]. Tako će sustav s manjim kapacitetom dosegnuti veću razliku potencijala za istu količinu primljenog naboja. Međutim, količina naboja koju neki kondenzator mora primiti (spremiti) nije određena samo jakošću struje (I) koja „puni" sustav, već ovisi i o duljini vremena u kojem je sustav izložen punjenju. Ako se frekvencija f [Hz] izmjenične struje povećava, onda će vrijeme „punjenja" biti kraće pa će zato i količina napoja u kondenzatoru biti manja. Kapacitivni otpor se prema tome može izraziti kao (Groom, 2004):

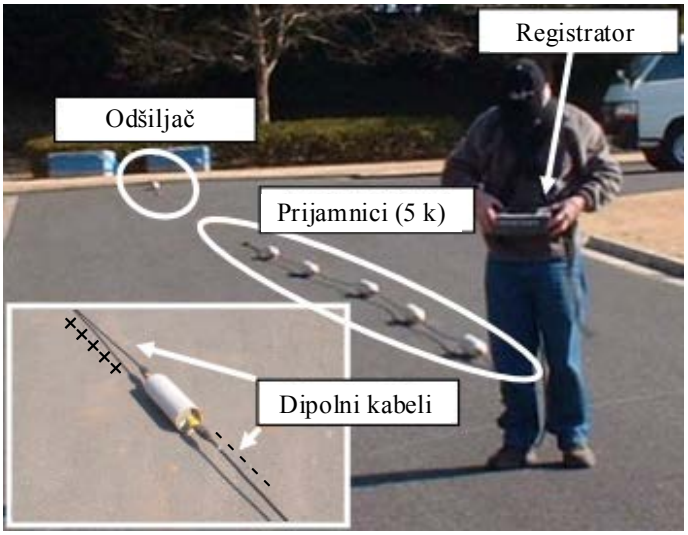
$$Xc\ [\Omega] = (2\ \pi\ f\ [Hz]\ C\ [F])^{-1} \qquad (6)$$

Da bi se izrazio utjecaj ukupnog električnog otpora, uveden je pojam „impedancija" koji povezuje radni i kapacitivni otpor.

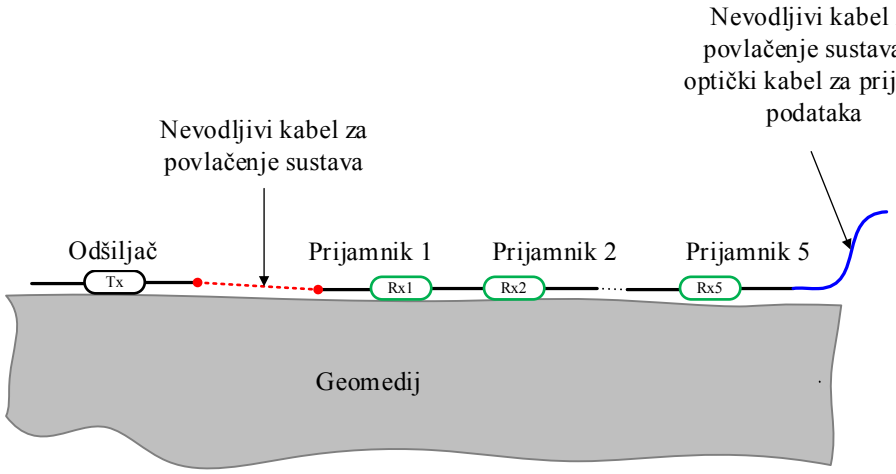
3. Oprema za mapiranje otpornosti (vodljivosti)

Razumijevanje načina rada i primjene ove metode najlakše je usvojiti opisom samog uređaja i prateće opreme. Slika 2 prikazuje sustav s jednim odašiljačem i pet prijemnika (OhmMapper TR5, Geometrics Inc.), a Slika 3 prikazuje shematski dijagram tog sustava.

Prijamnici su međusobno povezani s jednim zajedničkim dipolnim kabelom, a odašiljač je povezan u „vlak" s nevodljivom vezom (primjerice, obično planinarsko uže). Tako povezani sustav može vući jedna osoba ili neko vozilo brzinom ljudskog hoda ili znatno većom (primjerenom za konfiguraciju terena te složenost i heterogenost geomedija).



Slika 2. Izgled sustava za mapiranje vodljivosti s jednim odašiljačem i pet prijamnika (kanala): OhmMapper TR5, Geometrics Inc. (Yamashita et al., 2004).



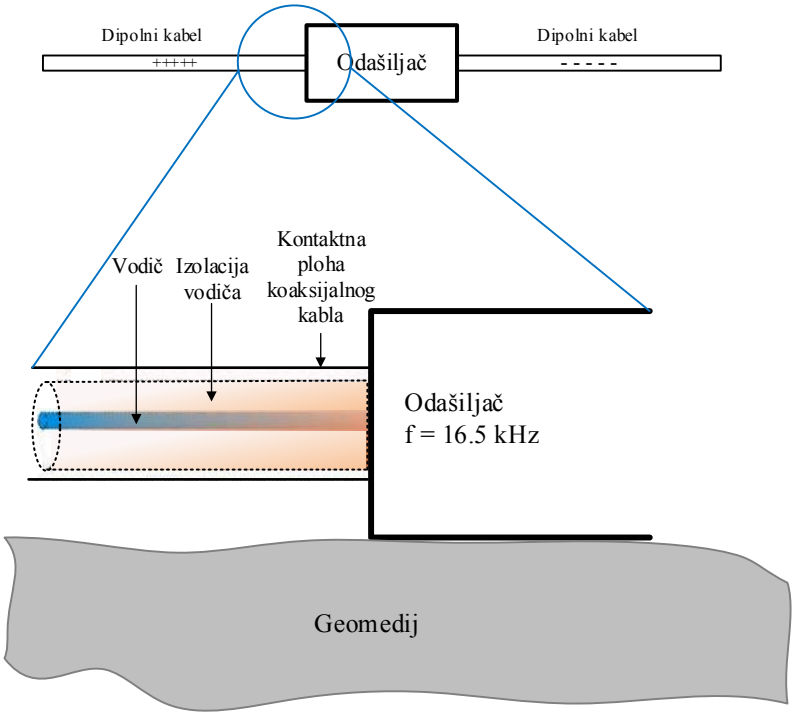
Slika 3. Shematski prikaz sustava OhmMapper TR5, Geometrics Inc. za terensko mjerenje (Yamashita et al., 2004).

3.1. Elektrode Ohmmappera

Vanjski izgled elektroda Ohmmmapera nalik je na standardni električni kabel. Slika 4. pokazuje konstrukciju dipolnog kabela koji ima ulogu kapacitivne kontaktne elektrode.

Središnji vodič u kabelu čini par isprepletenih žica, izoliran je omotačem željene debljine da se osigura promjer kabla i da se oblikuje kondenzator, a na njemu se s vanjske strane nalazi vodljiva, najčešće bakrena, ovojnica. Konačno, kabel je s vanjske strane zaštićen izolatorskim omotačem otpornim na habanje (Slika 1., Izolator). Upravo je bakrena ovojnica element koji djeluje kao elektroda u ovom sustavu (Slika 1., Vodič).

Kapacitivno sprezanje ovojnice i geomedija (kontaktne plohe tla) omogućava odašiljaču iniciranje strujnog toka od elektrode u geomedij. Svaki odašiljač ima dva dipolna kabela, a isto tako svaki prijamnik ima dva kabla, od kojih je jedan zajednički u višekanalnom sustavu (više prijamnika). Takva elektrodna konfiguracija sustava odgovara dipol-dipol konfiguraciji standardne geoelektrične metode (par strujnih elektroda C1C2 kroz koje se pušta struja u geomedij zamjenjuje odašiljač s parom dipolnih kabela, dok se par mjernih potencijalnih elektroda P1P2 nalazi izvan obuhvata strujnih elektroda i ima ulogu jednog prijamnika s dva dipolna kabela: redoslijed elektroda je C1C2P1P2 umjesto uobičajenog C1P1P2C2).



Slika 4. Shematski prikaz konstrukcije dipolnog kabla (Yamashita et al., 2004).

Standardne elektrode se nazivaju i točkaste elektrode, dok se elektrode Ohmmappera nazivaju linijske elektrode (kontakt se ostvaruje duž cijelog profila mjerenja, a ne samo u pojedinim točkama). Važna konstrukcijska svojstva linijskih elektroda: i) otpor bakrene ovojnice mora biti vrlo mali, ii) promjer ovojnice, odnosno debljina izolacije mora biti konstantna, iii) kapacitet elektrode po metru njene duljine mora biti konstantan, bez obzira na ostvarenu dužinu kontakta s geomedijem, iv) napon potreban za svladavanje kapacitivnog otpora odašiljača radi iniciranja strujnog toka u geomediju je znatno veći od onog koji potreban za svladavanje otpora njemu. Zbog toga je jasno da kapacitivni otpor (s elektrode u geomedij) i izmjenični napon koji se dovodi na elektrodu kontroliraju strujni tok u geomediju.

Konstrukcija elektrode je takva da je, bez obzira na duljinu, napon u bilo kojoj njenoj točki gotovo konstantan (vrlo su male razlike napona s kraja na kraj elektrode), a jednako je tako konstantan i kapacitivni otpor po duljini. Budući da su te dvije veličine gotovo nepromjenjive, očito je da i struja (po jedinici duljine) koja se inicira u geomediju mora biti konstantna u svim točkama elektrode.

3.2. Odašiljač

Odašiljač je sustav s dva dipola (dipolni kabeli, odnosno elektrode) pomoću kojeg se inicira (pokreće) izmjenična struja u geomediju. Budući da je jedni način da se uspostavi tok od izvora (jedan pol) do ponora (drugi pol) upravo kroz geomedij, na odašiljaču se može ustanoviti inicirana jakost struje mjerenjem na polu koji je ponor. Poznajući tu vrijednost (inicijalnom probom), može se vrlo brzo odrediti izlazni napon odašiljača potreban za iniciranje potrebne (projektirane) jakosti struje (koja predstavlja emitirani signal uređaja).

Diskretne vrijednosti jakosti struje (dimenzionirane radi optimalnog rada sustava s pogreškom do 1%) su: 0.125, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8 i 16 mA. Sustav će automatski izabrati sljedeću nižu vrijednost od pretpostavljene, ako je zbog stanja u geomediju nije moguće inicirati. Osim toga, potrebno je izabrati i frekvenciju iniciranja struje (odnosno puls emitiranog sinusnog signala). Maksimalni napon na odašiljača može biti 1000 [V], ali je snaga ograničena na manje od 2 [W].

3.3. Prijamnik

Očekuje se da ulazna impedancija (ukupni otpor) bude veća od 10 MΩ na radnoj frekvenciji. Ta je impedancija nužna radi sprečavanja formiranja strujnog toga od elektrode prema prijamniku. Osim toga, n taj je način minimiziran mogući utjecaj ambijentalnih smetnji koje mogu nastati pri frekvencijama od 50 ili 60 Hz izmjenične struje iz opskrbne mreže. Signali (registrirane vrijednosti) razlika potencijala na dvama elektrodama se filtriraju i pojačavaju. Koristi se filtar širine 25 Hz s obzirom na radnu frekvenciju odašiljača, a signal se može pojačati u koracima od (potencije broja 2): 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12 i 13. Pojačanje 0 znači da sustav može raditi na 2 [V] izmjeničnog napona. Za terenska istraživanja se najčešće koriste pojačanja 8, 10 i 12.

3.4. Dubina istraživanja

Dubina istraživanja, odnosno dubina zahvata se kontrolira duljinom dipolnih kabela (izborom kabela određene duljine koje nude proizvođači) te razmakom između odašiljača i prijamnika. U praksi se preporuča da razmak između njih ne prelazi karakterističnu debljinu sloja Kd (engl. skin depth) koja se može približno izračunati kao produkt:

$$Kd = 503\ (\rho/f)^{1/2}\ [m] \quad (6)$$

Pri tome je ρ pretpostavljena otpornost geomedija, a f je karakteristična frekvencija odašiljača (izmjeničnog napona), odnosno frekvencija transmisije. Primjerice, za geomedij prividne otpornosti (prosječna otpornost do dubine zahvata) od 10 [Ω m], dubina istraživanja (ili dubina prodora) će biti oko 12.5 [m] pri frekvenciji od 16.5 [kHz].

Prema tome, maksimalna dubina istraživanja sustava za mapiranje raste s porastom otpornosti, odnosno obrnuto je razmjerna korijenu vrijednosti vodljivosti geomedija.

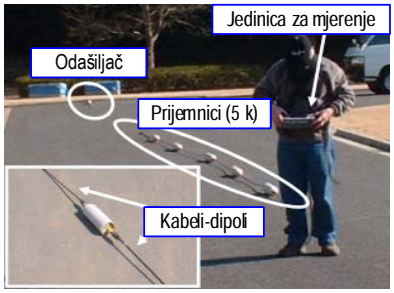
Tablica 1 prikazuje osnovne tehničke karakteristike za sustav OhmMapper TR5, Geometrics Inc.

3.5. OhmMapper TR5 (Geometrics Inc.)

Opis sustava za mapiranje geoelektrične otpornosti (vodljivosti).

Naziv opreme

OhmMapper©





http://www.geometrics.com/geometrics-products/geometrics-electro-magnetic-products/ohm-mapper/

Proizvođač

Geometrics, Inc.
2190 Fortune Dr, San Jose, CA 95131, United States of America
Geometrics je dio velike tvrtke OYO Corporation, Tokyo
http://www.geometrics.com

Vrsta opreme

Geofizički sustav za mjerenje električne otpornosti geomedija (tla, stijena, otpada i tekućina u njima).
Sustav se sastoji od odašiljača i jednog (ili više) prijamnika povezanih koaksijalnim kabelom te jedinice za registraciju i pohranjivanje podataka.

Metoda mjerenja

Osnovni mjerni parametar je električni napon koji se registrira na odašiljaču i prijamniku nakon prolaska električne struje kroz geomedij. Sustav se napaja izvorom izmjenične struje visoke frekvencije, a kontakt s površinom geomedija se realizira kapacitivno. Metoda se naziva Capacitively-Coupled Resistivity (CCR) i omogućava brzo mjerenje bez standardnog statičnog postavljanja elektroda.

Tehnička svojstva

- Omogućava vrlo brzo profiliranje geoelektrične otpornosti dipol-dipol metodom u usporedbi sa standardnim geoelektričnim metodama mjerenja.
- Omogućava mjerenja na smrznutom tlu, ledu, betonu, asfaltu i kroz druge vrste površinskog sloja koji inače otežava mjerenja.
- Jedinica za mjerenje i pohranjivanje mjernih podataka istovremeno bilježi i njihov položaj u profilu (pozicioniranje podataka u prostoru).
- Obrada mjernih podataka se provodi u programu za protokol mjerenja, a omogućen je i izvoz podataka za renomirane programe geoelektrične tomografije (RES2DINV, Dr. M. H

	.Loke).
Konfiguracija sustava	Maper geoelektrične otpornosti se sastoji od odašiljača („transmiterske“ jedinice s baterijom i dva dipolna Tx kabela) i prijamnika („resiverske“ jedinice s baterijom i dva Rx dipolna kabela). Odašiljač i prijamnik su međusobno povezani izoliranim kabelom kojim se sustav odašiljač-prijamnici može vući u neposrednom kontaktu s površinom terena. Mjerni signal (napon) se konvertira u digitalni signal koji se optičkim kabelom prenosi u jedinicu za upravljanje i pohranjivanje rezultata mjerenja (engl. DataMapper).
Namjena sustava	Plitka istraživanja stanja i svojstava geomedija do 15 m. Stratificiranje i identifikacija geoloških slojeva. Istraživanje krških pojava. Arheološka istraživanja. Istraživanje i sanacija klizišta. Detekcija slijeganja cestovnih i željezničkih konstrukcija. Detekcija ukopanih temelja i infrastrukture u industrijskim i urbanim područjima. Praćenje pronosa zagađenja kroz tlo. Mapiranje distribucije umjetnih gnojiva na poljoprivrednim površinama (prekomjerna ili nedostatna fertilizacija). Mapiranje poljoprivrednih površina obzirom na stanje vlažnosti u tlu. Istraživanje razine i fluktuacije vodnog lica. Istraživanja stanja i procjeđivanja kroz brane i nasipe za obranu od poplava. Mapiranje tijela odlagališta otpada i granica kontakata s podzemnom vodom i nezagađenim tlom.
Prednosti	Vrlo brzo mjerenje na terenu. Skeniranje većeg područja u kratkom vremenu. Jednostavno rukovanje, ne zahtijeva prethodno postavljanje mreže istraživanja. Dobar odnos cijene troškova i rezultata istraživanja. Primjena na različitim vrstama kontaktnih materijala. Mogućnost nadogradnje sustava iz jednokanalnog u višekanalni. Primjena u različitim znanstvenim i gospodarskim granama (arheologija, građevinarstvo, geotehnika i hidrotehnika, rudarstvo, inženjerstvo i zaštita okoliša, poljoprivreda).
Ograničenja	Ograničen dubinski zahvat. Vodljivi materijali ometaju mjerni signal i prodor u dubinu. Potrebna naknadna obrada i interpretacija podataka. Visoka početna cijena sustava.
Opća ocjena	Iako sustav inicijalno zahtijeva znatna financijska sredstva, zbog iznimne raznovrsnosti i pouzdanosti primjene u različitim gospodarskim granama, ovaj sustav omogućava proširenje stručne djelatnosti svake institucije ili tvrtke koja se bavi istraživanjem geomedija. Sustav je isplativ dugoročno, jer omogućava pohranjivanje podataka za formiranje budućih geo-referenciranih baza podataka sa stanjem okoliša.

Također, sustav doprinosi zapošljavanju stručnjaka različitih inženjerskih profila, stjecanju iskustava i usavršavanju primjene novih tehnologija u istraživanju geomedija.

*(*iz osobne komunikacije 2016. s Mr. Nick Nick Odlum, Applications Geophysicist, Geometrics Inc. USA)*

Tablica 1. Tehnička specifikacija za OhmMapper TR5, Geometrics Inc.

Princip rada	Konstantna izlazna struja, kapacitivno sprezanje, dipol-dipol mjerenje otpornosti
Raspon mjerenja	od 3 do 100 000 Ohm m
Broj ciklusa mjerenja	Izborno, do 2 potpuna mjerenja u sekundi
Memorija sustava	2 MB RAM
Odašiljač	Frekvencija: oko 16.6 kHz Izlazna snaga: do 2 W Izlazna struja: od 0.125 mA do 16 mA
Prijamnik	Duljina kabela: 1, 2.5, 5 (standard), 10 m Ulazna impedancija: > 5 Ohm Točnost mjerenja napona: < 3% Raspon ulaznog napona: 0 do 2 RMS

4. Primjeri primjene mapiranja otpornosti (vodljivosti)

Navedena su tri primjera mapiranja otpornosti i testiranja sustava za kapacitivno mjerenje otpornosti (Yamashita et al., 2004):

1) Usporedba s konvencionalnim galvanskim metodama na koherentnom tlu
2) Primjena mapiranja vodljivosti na asfaltnoj podlozi
3) Primjena mapiranja vodljivosti duž nasipa s asfaltiranom krunom.

Osim, toga prikazani su primjeri posebno značajni u inženjerstvu okoliša:

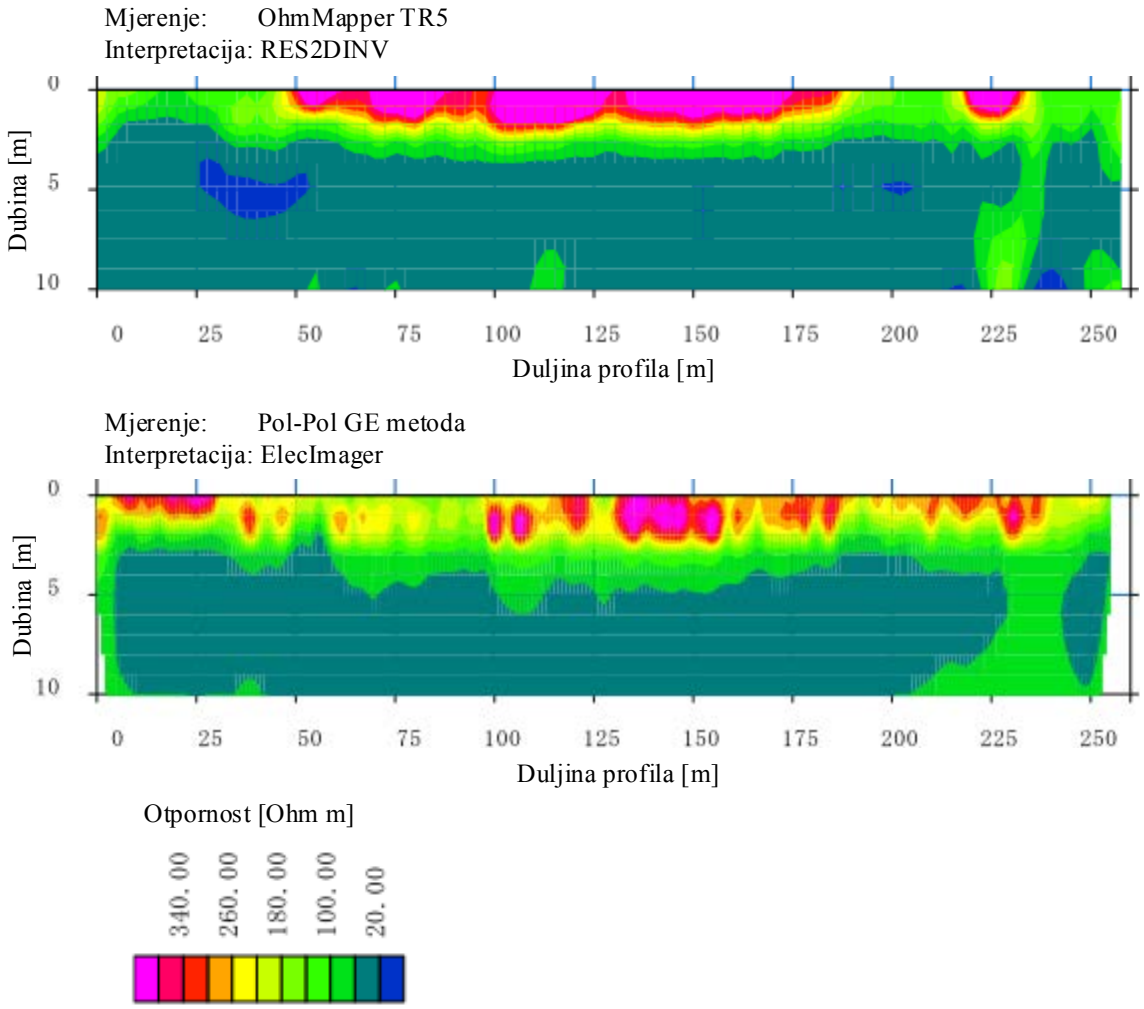
4) Mapiranje potencijala korozivnosti geomedija Bayowa i Olayiwola (2015)

5) Profiliranje šljunkovitih naslaga u blizini odlagališta otpada (Lucius et al., 2008).

4.1. Usporedba s konvencionalnim galvanskim metodama na koherentnom tlu

Mapiranje vodljivosti se provodilo duž istog geoelektričnog profila duljine 250 m. Površinski uvjeti su bili uobičajeni: humus prekriven travom. Razmak između dipolnih elektroda odašiljača i prijamnika je bio 5 m minimalno i 35 m maksimalno. Duljina dipolnih elektroda je bila standardna 5 m. Za geoelektričnu tomografiju se koristio pol-pol raspored s jednolikom razmakom elektroda na minimalno 1 m i maksimalno 15 m. Podaci mjerenja OhmMapperom su interpretirani pomoću istog programskog paketa za 2D inverziju otpornosti: RES2DINV, Geotomo Software Inc. (2D resistivity inversion software). Galvanska mjerenja otpornosti su interpretirana pomoću programa ElecImager. OYO Corporation.

Usporedba interpretacija pokazuje razlike u pripovršinskim zonama, Slika 5, ali je zaključeno da se interpretacije slažu u dovoljnoj mjeri, budući da su se horizontalno izmjenjivali nasipani materijal do dubine 1.4 m, glinovite serije do dubine 2.3 m te pijesci do dubine 1.8 odnosno 4.3 m. Budući da se mjerilo s različitim elektrodnim rasporedima i interpretiralo s različitim programima, pokazalo se da i ovdje vrijedi iskustveno geofizičko pravilo: ako jedan paket metoda mjerenja-interpretacija dovoljno realno prikazuje stvarno stanje, tada ni drugi paketi ne bi trebali pokazivati drastične razlike.

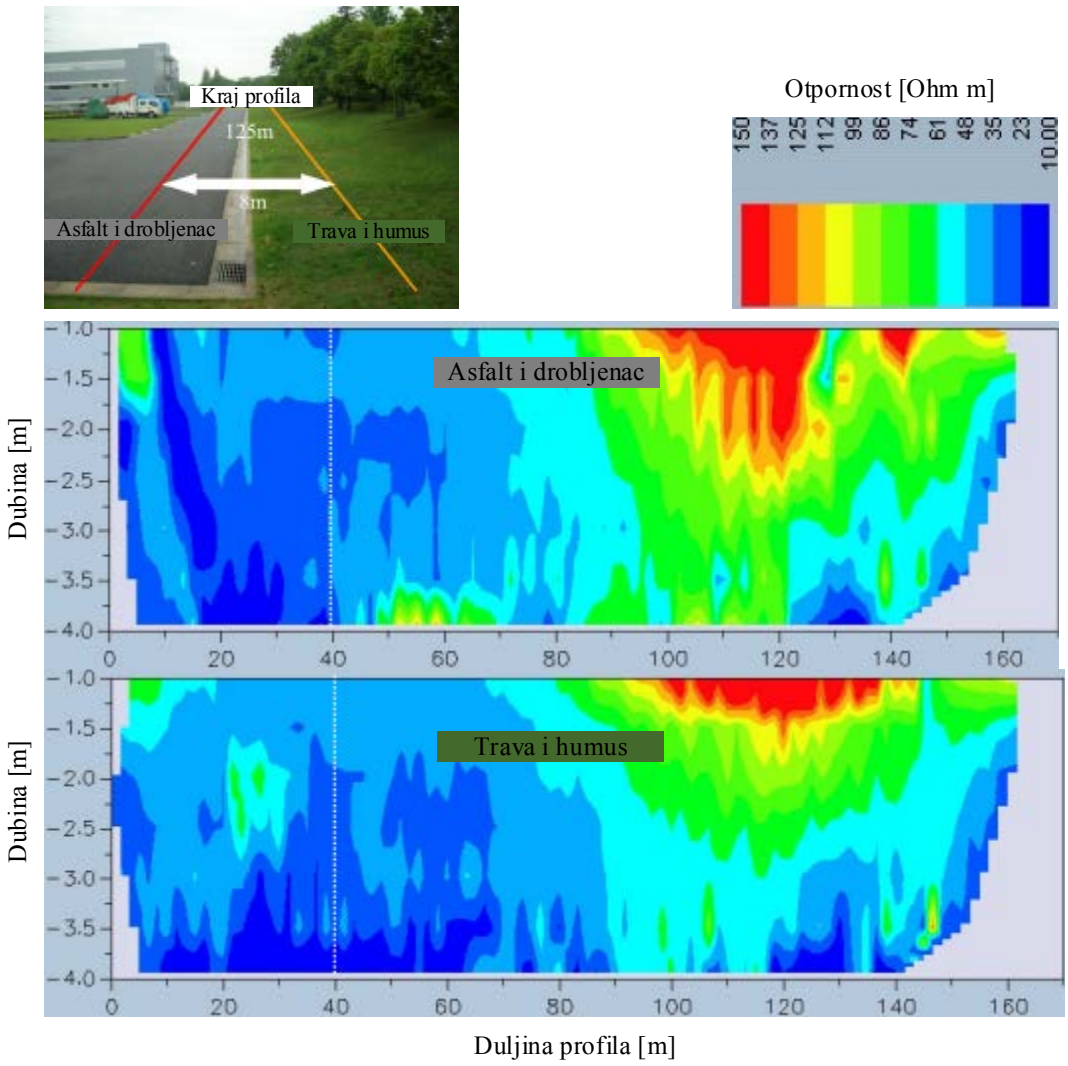


Slika 5. Usporedba mjerenja i interpretacije i) OhmMapper TR5 (Geometrics Inc.) i RES2DINV (gornja slika), ii) pol-pol geoelektrična metoda otpornosti i ElecImager (OYO Corp.) duž istog profila u koherentnom tlu (glinovita sredina) do dubine 10 m (Yamashita et al., 2004).

4.2. Primjena mapiranja vodljivosti na asfaltnoj podlozi

U sljedećem se primjeru, Slika 6, željela utvrditi razlika, odnosno utjecaj asfalta na rezultate mjerenja u istoj geoelektričnoj sredini. Profiliranje vodljivosti se provodilo duž 125 m dugih profila, paralelnih i međusobno razmaknutih 8 m. Kontaktna površina je bila humus i trava, odnosno asfalt debljine 5 cm. Ispod asfaltnog zastora se nalazio sloj

drobljenca debljine 20 cm, od 0. do 40. m profila, te debljine 35 cm od 40. do 125. m profila.

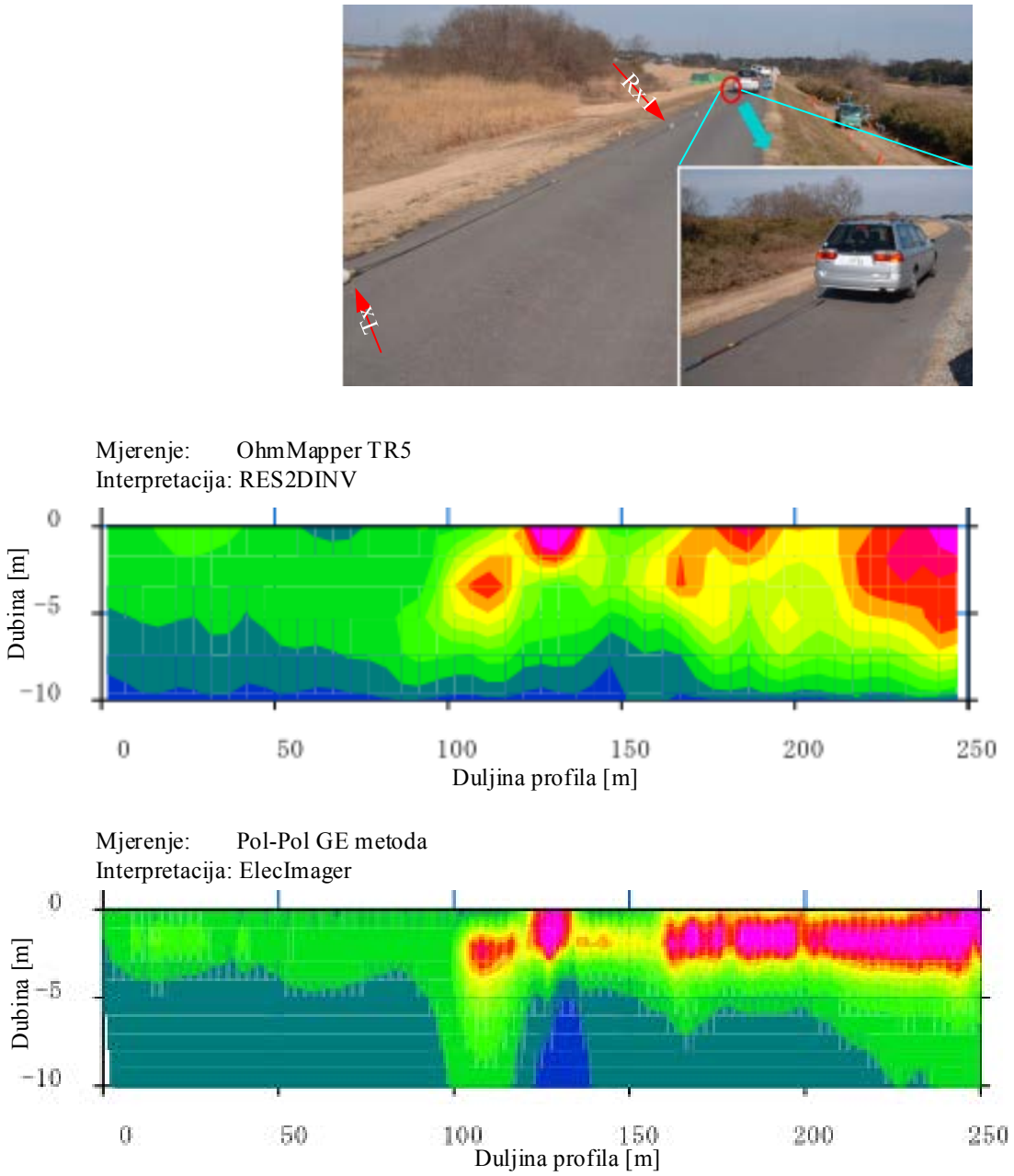


Slika 6. Usporedba mjerenja i interpretacije: OhmMapper TR5 (Geometrics Inc.) i RES2DINV duž paralelnih profila u istoj geoelektričnoj sredini s različitim površinskim slojevima (asfalt i drobljenac - gornja slika, u odnosu na humus – donja slika) (Yamashita et al., 2004). Dubina zahvata je bila 4 m.

Elektrode su bile duljine 2.5 m, a razmak odašiljač-prijamnik je bio minimalno 5 m, a maksimalno 20 m. Interpretacije su bile vrlo slične, pa se zaključilo da sloj asfalta i drobljenog kamena ispod njega ne utječe znatno na vrijednosti geomedija u podini.

4.3. Primjena mapiranja vodljivosti duž nasipa s asfaltiranom krunom

Istraživanje duž krune nasipa je povedeno u duljini od 1200 m za svega 12-ak minuta. Upotrijebljene su dipoli duljine 5 m, a razmak odašiljač-prijemnik je bio 5 i 35 m, minimalno i maksimalno. Površina kontakta je bio asfalt. Set senzora se povlačio automobilom. Za usporedbu, konvencionalna galvanska metoda otpornosti u pol-pol rasporedu se primijenila od 0 do 250 m. Minimalni razmak elektroda je bio 1 m, a maksimalni 15 m. U tijelu nasipa je uočena zona vrlo male vodljivosti, iznad 1 kΩm, pa su rezultati mjerenja OhmMapperom dali vrlo dobar odnos signal-šum (engl. signal-to-noise data). Interpretacije 2D geoelektrične tomografije i mapiranja vodljivosti su se podudaraju do zadovoljavajuće razine.



Slika 7. Usporedba mjerenja i interpretacije izvedene i) OhmMapperom TR5 – gornja slika, ii) pol-pol geoelektričnom tomografijom duž 250 m nasipa s asfaltnom krunom. Fotografija prikazuje način izvođenja mapiranja na terenu. (Yamashita et al., 2004).

4.4. Mapiranje korozivnosti geomedija

Korozivnost i agresivnost geomedija su svojstva kojima se opisuje podložnost podzemne infrastrukture, uglavnom metalnih cjevovoda i spremnika, kemijskom oštećenju (razaranju) površinske strukture u kontaktu s geomedijem. Korozivna oštećenja u konačnici mogu dovesti do mehaničkog sloma objekta (infrastrukture). Iz višegodišnjih istraživanja je poznato da otpornost (vodljivost) geomedija može biti relevantan parametar za procjenu potencijala korozivnog sloma, odnosno kategorizaciju korozivnosti. Velike vodljivosti su indikativne za područja reducirane aeracije, odnosno za zone u kojima je povećana saturacija elektrolita u porama ili je povećana koncentracija otopljenih soli u geomediju. Bayowa i Olayiwola (2015) potencijal korozivnosti kategoriziraju prema otpornosti geomedija, Tablica 2.

Tablica 2. Kategorizacija korozivnosti geomedija prema otpornosti, (Bayowa i Olayiwola, 2015).

Otpornost geomedija [Ω m]	**Kategorija korozivnosti**
> 200	Uglavnom nekorozivno
100 - 200	Slabo korozivno
50 - 100	Umjereno korozivno
30 - 50	Korozivno
10 - 30	Vrlo korozivno
> 10	Ekstremno korozivno

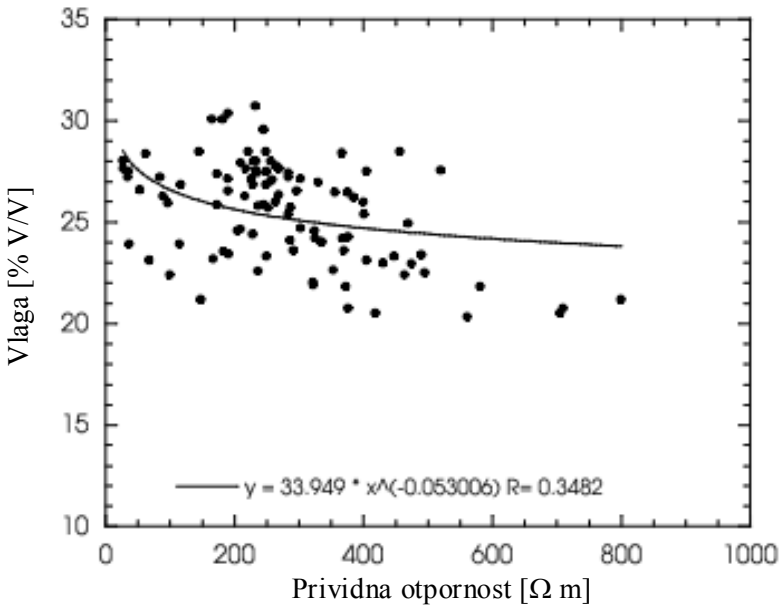
4.5. Mapiranje vodljivosti radi određivanja vlage u tlu

Primjenu mapiranja vodljivosti radi određivanja vlage u tlu su pokazali već Walker i Houser (2000). Sadržaj vlage, odnosno saturacija vodom, u površinskoj zoni od nekoliko metara je posebno važan podatak u mnogim istraživačkim, ali i primijenjenim

djelatnostima: proučavanje dinamike podzemne vode, modeliranje stanja vlažnosti tla, procjena djelovanja pornog tlaka u poljoprivredi i integracija terenskih podataka s podacima daljinskih istraživanja vlage u površinskim slojevima tla.

U svom istraživanju Walker i Houser (2000) uspoređuju rezultate mapiranja primjenom OhmMappera (Geometrics Inc.) i reflektometrijskih mjerenja na pojedinim točkama profila (engl. point time-domain reflectometry, TDR) do dubine od svega 70 cm. Ustanovili su dobru korelaciju podataka, iako su podaci mapiranja dosezali znatno veće dubine nego reflektometrijski. No, već i takva usporedba je pokazala da je rezolucija mapiranja zadovoljavajuća za određivanje vlažnosti relativno tankog površinskog sloja.

Također su potvrdili da je oblik odnosa između zapreminskog sadržaja vlage (Θ) i otpornosti geomedija (ρ) eksponencijalno ovisan o parametru kojim se definira tekstura geomedija i obrnuto-proporcionalan količini elektrolita (primjerice, količini otopljene soli) (Hymer et al., 2000).

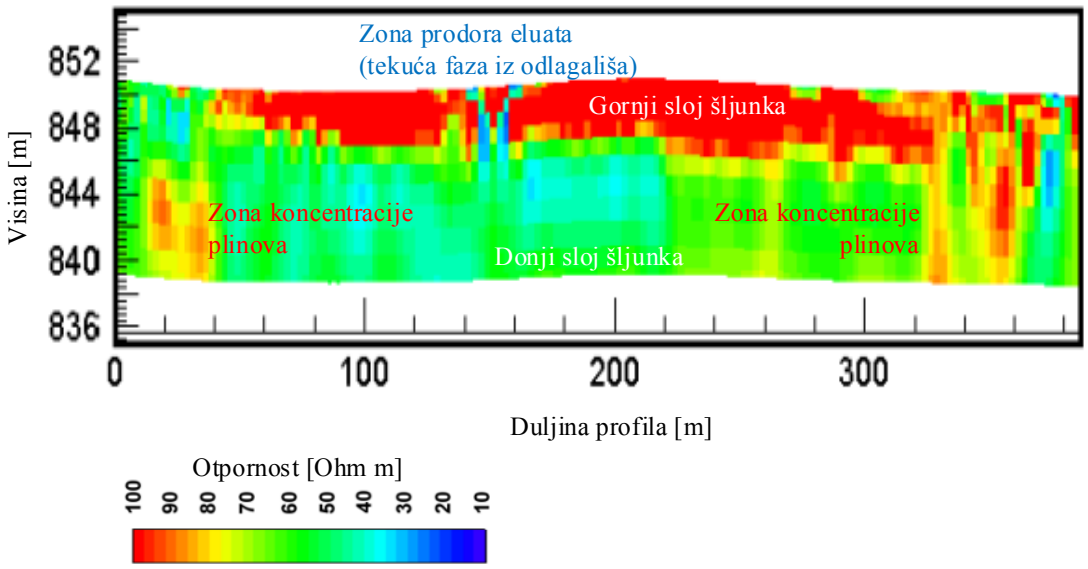


Slika 8. Aproksimacija podataka prividne otpornosti mjerene OhmMapperom i sadržaja vlage mjerenim TDR metodom. Udaljenost odašiljač-prijamnik je bila 2 m, a mjerenja TDR sustavom su zahvatila 70 cm dubine. (Walker and Houser, 2000). Mjerenja su provedena u pjeskovitom, odnosno pjeskovito-prašinasto-glinovitom tlu (engl. sandy loam).

4.6. Profiliranje šljunkovitih naslaga u području odlagališta otpada

Posebno važna istraživanja u inženjerstvu okoliša su ona kojima je moguće mapirati slojeve propusnog nekoherentnog geomedija (šljunci i pijesci) za koje se pretpostavlja sa su neposrednom kontaktu s tijelom nekog odlagališta. Procjeđivanje eluata iz odlagališta u takve slojeve može uzrokovati zagađenje podzemne vode i okolnog tla u velikim razmjerima, a sanacije tako onečišćenog prostora (znatnog volumena) su zahtjevne, dugotrajne i skupe.

Istraživači Lucius et al. (2008) iz Geološkog društva Sjedinjenih Američkih Država (United States Geological Survay, USGS) su proveli mapiranja vodljivosti (primjenom OhmMappera TR5) i profiliranja geoelektričnom tomografijom (engl. Electrical Resistivity Imaging, ERI) dva različito propusna sloja šljunka kroz koje širilo onečišćenje iz odlagališta. Plitki i tanji sloj je bio debljine od 0.5 do 2.2 [m], dok je drugi sloj bio varijabilne debljine, od 15 do 30 [m]. Prethodnim geotehničkim istraživanjima je utvrđeno da su dublji sedimenti finozrnati i da je stupanj saturacije vodom znatno veći od slojeva blizu površine. Suhi slojevi šljunka su općenito pokazivali znatno veće otpornosti i vrlo su se jasno izdvajali od okoline saturiranih finozrnih sedimenata. Međutim, gornje slojeve šljunka je bilo vrlo teško razdvojiti po otpornosti s obzirom na strukturu (finozrnato ili krupnozrnato). I u ovom je istraživanju bilo vrlo važno ustanoviti korelaciju između vlažnosti i vodljivosti neposredno za lokalne uvjete u prostoru koji se istraživao. Ipak, moglo se jasno ustanoviti da male vodljivosti na većim dubinama (približno 20-ak [m]) ukazuju na prisutnost plinova iz odlagališta.



Slika 9. Profil otpornosti kroz slojeve šljunka u neposrednoj blizini odlagališta. Mapiranje je izvedeno OhmMapperom TR5. Veće otpornosti u donjem sloju šljunka ukazuju na koncentraciju plinova iz odlagališta u porama. Male otpornosti u gornjem sloju su indikativne za zone procjeđivanja tekuće faze iz odlagališta u gornje naslage šljunka. (Lucius et al. 2008).

5. Zaključak

Ovaj rad se temelji na proučavanju mapiranja geoelektrične vodljivosti metodom kapacitivnog mjerenja otpornosti, primjenom sustava OhmMapper TR5 (Geometrics Inc. OYO Corporation USA). Cilj ovog rada bio je pokazati da takav sustav daje nove mogućnosti za istraživanje geomedija, odnosno određivanje fizikalno-mehaničkih i kemijskih promjena stanja u njemu (primjerice zaslanjenost, korozivnost, sadržaj organske tvar, dinamika pronosa zagađenja i drugo).

U radu su izdvojena istraživanja potvrdila da je mapiranje vodljivosti izvedivo s visokom razinom pouzdanosti u koherentnim tlima otpornosti od 20 do 100 Ohm m. Istraživanje nasipa s glinovitim jezgrama daje također zadovoljavajuće rezultate, a izvodi se vrlo brzo i učinkovito posebno kada su profili iznimno dugi (više stotina metara). Nedostaci metode se pokazuju pri mjerenjima u vrlo vodljivim medijima, no ukoliko postoje znatni kontrasti visoke otpornosti okoline i tada se mogu vrlo dobro utvrditi zone i područja male vodljivosti.

Iz primjera navedenih u ovom radu, vidljivo je da je cilj te tehnologije pravilnim analizama, koje nisu štetne za okoliš, efikasnije analizirati stanje u geomedij u svrhu bolje i ekonomičnije produktivnosti čovjekova rada. Stoga je potrebno i nadalje takve tehnologije unapređivati i ulagati u njihov daljnji razvoj, kako bi se smanjili troškovi, te povećala pozitivna djelovanja na okoliš.

Popis literature

[1] Yamashita, Y., Groom, D., Inazaki, T. and Hayashi , K. (2004). Rapid near surface resistivity survey using the capacitively-coupled resistivity system: OhmMapper. http://www.geometrics.com/files/images/segj-oyo-om-levee.pdf <10. 9. 2018.>.

[2] Inazaki, T. (2002). Utilization of S-wave Land Streamer surveying for high resolution profiling of levees, Proceedings of the 106th SEGJ Conference, 55-58.

[3] Timofeev, V. M., Rogozinski, A.W., Hunter, J.A. and Douma, M. (1994). A new ground resistivity method for engineering and environmental geophysics, Proceedings of the SAGEEP, EEGS, 701-715.

[4] Sabo, S. H. (2008). Evaluation of Capacitively Coupled Electrical Resistivity for Locating Solution Cavities Overlain by Clay rich Soils. https://etd.ohiolink.edu/rws_etd/document/get/bgsu1219092853/inline <10. 9. 2018.>

[5] Shima, H., Texier, B., Kobayashi, T. and Hasegawa, N. (1995). Fast imaging of shallow resistivity structures using a multichannel capacitive electrode system, 65th Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys., 377-380.

[6] Groom, D. (2004). Introduction to ohmmapping brief theory. https://www.geomatrix.co.uk/cms/resources/downloads/ohmmap-theory.pdf <10. 9. 2018.>

[7] Bayowa, O. G. and Olayiwola, N. S. (2015). Electrical Resistivity Investigation for Topsoil Thickness, Competence and Corrosivity Evaluation: A Case Study from Ladoke Akintola. 2nd International Conference on Geological and Civil Engineering. IACSIT Press, Singapore, DOI: 10.7763/IPCBEE. 2015. V80. 11.

[8] Walker, J. P. and Houser, P. R. (2000). Evaluation of the OhmMapper Instrument for Measurement of Soil Moisture. Soil Science Society of America Journal.

[9] Hymer, D. C., Moran, M. S. and. Keefer, T. O. (2000). Soil water evaluation using a hydrologic model and calibrated sensor network. Soil Science Society of America Journal, 64:319-326.

[10] Lucius, J.E., Abraham, J.D., and Burton, B.L., 2008, Resistivity profiling for mapping gravel layers that may control contaminant migration at the Amargosa Desert

Research Site, Nevada: U.S. Geological Survey Scientific Investiga-tions Report 2008–5091, 30 p. [available online at http://pubs.usgs.gov/sir/2008/5091/].

Popis slika

Slika 1. Konceptualni model kapacitivnog mjerenja otpornosti (engl. capacitively-coupled resistivity, CCR) (Yamasita et al., 2004).

Slika 2. Izgled sustava za mapiranje vodljivosti s jednim odašiljačem i pet prijamnika (kanala): OhmMapper TR5, Geometrics Inc. (Yamashita et al., 2004).

Slika 3. Shematski prikaz sustava OhmMapper TR5, Geometrics Inc. za terensko mjerenje (Yamashita et al., 2004).

Slika 4. Shematski prikaz konstrukcije dipolnog kabla (Yamashita et al., 2004).

Slika 5. Usporedba mjerenja i interpretacije i) OhmMapper TR5 (Geometrics Inc.) i RES2DINV (gornja slika), ii) pol-pol geoelektrična metoda otpornosti i ElecImager (OYO Corp.) duž istog profila u koherentnom tlu (glinovita sredina) do dubine 10 m (Yamashita et al., 2004).

Slika 6. Usporedba mjerenja i interpretacije: OhmMapper TR5 (Geometrics Inc.) i RES2DINV duž paralelnih profila u istoj geoelektričnoj sredini s različitim površinskim slojevima (asfalt i drobljenac - gornja slika, u odnosu na humus – donja slika) (Yamashita et al., 2004). Dubina zahvata je bila 4 m.

Slika 7. Usporedba mjerenja i interpretacije izvedene i) OhmMapperom TR5 – gornja slika, ii) pol-pol geoelektričnom tomografijom duž 250 m nasipa s asfaltnom krunom. Fotografija prikazuje način izvođenja mapiranja na terenu. (Yamashita et al., 2004).

Slika 8. Aproksimacija podataka prividne otpornosti mjerene OhmMapperom i sadržaja vlage mjerenim TDR metodom. Udaljenost odašiljač-prijamnik je bila 2 m, a mjerenja TDR sustavom su zahvatila 70 cm dubine. (Walker an Houser, 2000). Mjerenja su provedena u pjeskovitom, odnosno pjeskovito-prašinastom tlu (engl. sandy loam).

Slika 9. Profil otpornosti kroz slojeve šljunka u neposrednoj blizini odlagališta. Mapiranje je izvedeno OhmMapperom TR5. Veće otpornosti u donjem sloju šljunka ukazuju na koncentraciju plinova iz odlagališta u porama. Male otpornosti u gornjem sloju su indikativne za zone procjeđivanja tekuće faze iz odlagališta u gornje naslage šljunka. (Lucius et al. 2008).

Popis tablica

Tablica 1. Tehnička specifikacija za OhmMapper TR5, Geometrics Inc.

Tablica 2. Kategorizacija korozivnosti geomedija prema otpornosti, (Bayowa i Olayiwola, 2015).