

# Geofizička istraživanja zemljanih nasipa

---

Zavrtnik, Andrija

Undergraduate thesis / Završni rad

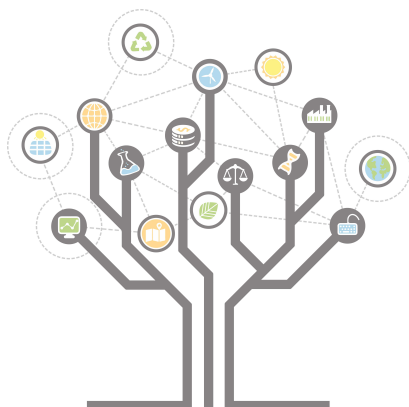
2019

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:925778>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

ANDRIJA ZAVRTNIK

GEOFIZIČKA ISTRAŽIVANJA ZEMLJANIH NASIPA

ZAVRŠNI RAD

VARAŽDIN, 2019.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

ANDRIJA ZAVRTNIK

GEOFIZIČKA ISTRAŽIVANJA ZEMLJANIH NASIPA

KANDIDAT:

ANDRIJA ZAVRTNIK

MENTOR:

Doc.dr.sc. MARIO GAZDEK

VARAŽDIN, 2019.



Sveučilište u Zagrebu  
Geotehnički fakultet



## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: ANDRIJA ZAVRTNIK

Matični broj: 2315 - 2013./2014.

### NASLOV ZAVRŠNOG RADA:

GEOFIZIČKA ISTRAŽIVANJA ZEMLJANIH NASIPA

Rad treba sadržati: 1. Uvod  
2. Zemljani nasipi i istraživanje njihove funkcionalnosti  
3. Geoelektrične metode  
4. Zaključak  
5. Literatura  
6. Popis slika  
7. Popis tablica

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

Zadatak zadan: 18.04.2018.

Rok predaje: 05.09.2019.

Mentor:

Doc.dr.sc. Mario Gazdek

*Mgazdek*



Predsjednik Odbora za nastavu:

Prof.dr.sc. Igor Petrović

*Igor Petrović*

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod naslovom **GEOFIZIČKA ISTRAŽIVANJA ZEMLJANIH NASIPA** 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, 05.09.2019.

Andrija Zavrtnik



## **SAŽETAK**

**Ime i prezime: Andrija Zavrtnik**

**Naslov rada: Geofizička istraživanja zemljanih nasipa**

Zbog svoje važnosti i funkcije koju imaju, zemljani nasipi zahtijevaju konstantno održavanje što između ostalog podrazumijeva provjeru i praćenje njihovog mehaničkog stanja. Suptilnošću kojom se izvode, geofizička istraživanja ne narušavaju postojeće stanje nasipa, brza su i jeftina, a daju važne informacije o zonama nestabilnosti u nasipu, mjestima povećane saturacije vodom, prisustvu pukotina i općenito nepovoljnim uvjetima koji ugrožavaju sigurnost i funkcionalnost nasipa. Geofizičke istraživanja zemljanih nasipa u kombinacijama metoda najčešće uključuju geoelektričnu tomografiju metodom otpornosti, seizmičku refrakciju i višekanalnu analizu površinskih valova (MASW) te georadar.

**Ključne riječi:** zemljani nasipi, geofizička istraživanja, detekcija zona nestabilnosti, procjeđivanje, erozija.

## Sadržaj

<b>1. Uvod .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Zemljani nasipi i istraživanja njihove funkcionalnosti.....</b>	<b>2</b>
<b>2.1. Geofizičke metode za istraživanje zemljanih nasipa.....</b>	<b>5</b>
<b>3. Geoelektrične metode.....</b>	<b>7</b>
<b>3.1. Geoelektrična tomografija metodom otpornosti (ERT) .....</b>	<b>7</b>
<b>3.1.1. Istraživanje erozije u zemljanim nasipima .....</b>	<b>8</b>
<b>3.1.2. Istraživanje zaslanjenja nasipa .....</b>	<b>17</b>
<b>3.2. Seizmičke metode .....</b>	<b>20</b>
<b>3.2.1. Seizmička refrakcija .....</b>	<b>21</b>
<b>3.2.2. Višekanalska analiza površinskih valova (MASW) .....</b>	<b>22</b>
<b>3.3 Georadarsko profiliranje terena (GPR).....</b>	<b>24</b>
<b>3.3.1 Primjena GPR sustava za detekciju šupljina i objekata.....</b>	<b>26</b>
<b>4. Zaključak .....</b>	<b>33</b>
<b>5. Literatura.....</b>	<b>34</b>
<b>6. Popis slika .....</b>	<b>39</b>
<b>7. Popis tablica.....</b>	<b>41</b>



## 1. Uvod

Postoji mnogo različitih zemljanih nasipa s različitim funkcijama, ali svim zemljanim nasipima je zajednička izloženost vodi koja nepovoljno utječe na njihovu stabilnost. Djelovanje vode može biti u obliku velikog vodenog vala koji u vrlo kratkom roku uzrokuje slom nasipa ili u obliku dugotrajnog djelovanja vode koje oslabljuje i dezintegrira materijal od kojeg je nasip izveden. Nasipi u ruralnim i naseljenim područjima predstavljaju veliku investiciju, ali i veliku dobit. Procijenjeno je da je od izravnih posljedica sloma nasipa i pojave poplava patilo 2,9 milijardi ljudi u posljednjih 30 godina, preko 4,5 milijuna ljudi je izgubilo svoje domove (Doocey, 2013.). Što se tiče financijske i ekonomske štete gledajući globalno u posljednjih deset godina poplave prosječno u godinu dana prouzroče otprilike 30 do 35 milijardi dolara štete (EDMAT, 2019.). Vrhunac je zabilježen u 2011. godine kada je financijska šteta kroz cijelu godinu iznosila preko 60 milijardi američkih dolara, a zemlje kao Brazil i jugoistok Sjedinjenih Američkih Država bilježile su najgore poplave u svojoj povijesti (Wikipedia, 2019.). U 2017. i 2018. financijske štete prouzročene poplavama su u padu i bilježe vrijednosti ispod gore navedenog godišnjeg prosjeka (EDMAT, 2019.). Goleme ekonomske štete i ugroza ljudske sigurnosti i materijalnih dobara potaknulo je 2007. Europsku komisiju da u suradnji s vladama i nevladinim organizacijama zemalja članica, te znanstvenicima različitih disciplina počinje integriran pristup prevenciji štete od poplava. Izrađena je direktiva za procjenu rizika od poplava koja je obavezala članove da poduzimaju preventivne mjere zaštite od poplava koje između ostaloga uključuju monitoring i održavanje riječnih i zemljanih nasipa, kanala i drugih hidrotehničkih nasipa (Tanajewski, 2016.). Geofizičke metode istraživanja, kao neinvazivne i nedestruktivne metode, odličan su način prikupljanja vrijednih podataka o stanju nasipa i njegovoj funkcionalnosti. Obično se izvode dvije ili više metoda kako bi se dobili što kvalitetniji podaci o integritetu i mehaničkom stanju zemljanog nasipa, te kako bi se izbjegle pogrešne interpretacije rezultata. U radu naglasak je na primjeni geofizičkih metoda, stoga njihov teorijski dio, iako vrlo važan, ovdje je sekundaran. Dana je teorijska osnova tamo gdje je procijenjeno da je ona potrebna kako bi se objasnila i opravdala uporaba pojedine metode, objasnio način na koji se ona koristi i što je to u prirodi pojedine metode što toliko dobro korespondira s istraživanim geomedijem.

## **2. Zemljani nasipi i istraživanja njihove funkcionalnosti**

Nasip je građevina izvedena od rastresitog gradiva. Rastresito gradivo može biti u usjecima i zasjecima na trasi građevine za koju se izvodi nasip ili može biti dopremljeno iz pozajmišta. (Roje – Bonacci, 2015.). Nasipi bilo koje vrste, moraju imati stalan oblik. Ne smije se dozvoliti naknadno klizanje nastalih kosina, naknadno slijeganje treba predvidjeti i svesti na najmanju moguću mjeru, a nasipi koji privremeno, povremeno ili stalno dolaze u jednostrani dodir s vodom, moraju biti i odgovarajuće vodonepropusnosti. (Roje – Bonacci, 2015.).

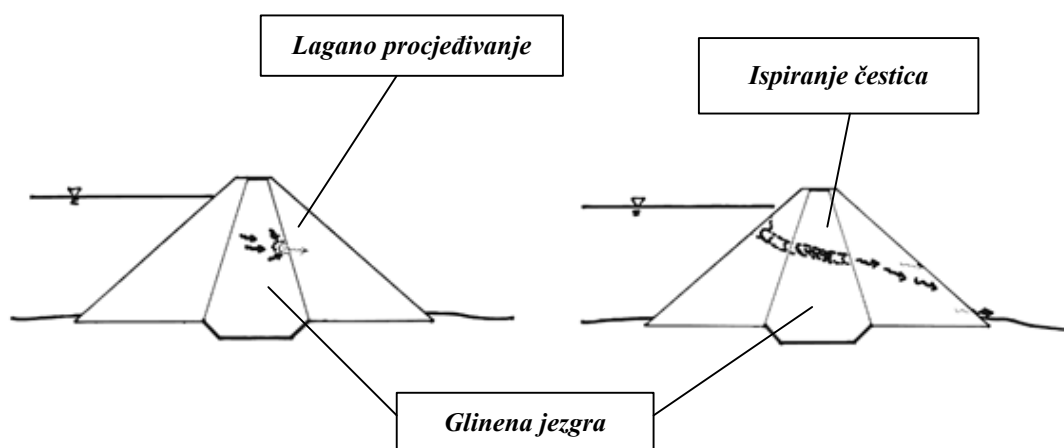
Iako postoji mnogo vrsta nasipa i njihove različite podjele (Ivšić, 2012.) sa stanovišta geofizičkih istraživanja od posebnog su interesa hidrotehnički nasipi. Njihova je važnost u obrani naseljenih i poljoprivrednih područja od nailaska velikog vodenog vala. Po definiciji hidrotehnički nasipi su nasute građevine opterećene jednostrano hidrostatskim tlakom koje moraju osigurati vododrživost različitog trajanja. Vodom mogu biti opterećeni trajno, privremeno i povremeno. Nasipi koji povremeno drže vodu su većinom nasipi za obranu od poplava. (Roje – Bonacci, 2015.). U Hrvatskoj su izgrađeni brojni sustavi obrane od poplava, koji uključuju preko 4000 km hidrotehničkih nasipa, preko 100 višenamjenskih akumulacija i brdskih retencija, sustav velikih nizinskih retencija, te brojne druge regulacijske i zaštitne vodne građevine (Šimundić, 2016.).

U svijetu pa tako i u Hrvatskoj većina hidrotehničkih građevina su nasute građevine, izgrađene od zemljanog materijala, zato što je zemljani materijal lako dostupan, jeftiniji, njegova ugradnja je jednostavnija i brža, dosta često se nalazi na samom mjestu gradnje i ne zahtijeva zadovoljavanje visokih standarda kvalitete i ugradnje kao npr. beton. Hidrotehnički nasipi kao nasipi koji su u doticaju s vodom trpe i posljedice njenog djelovanja. Djelovanje vode je uzrok nestabilnosti u nasipima. Bilo da je ono u obliku velikog vodenog voda koji u nekoliko sati može uzrokovati slom nasipa (Foster, 1999.) ili u obliku dugotrajnijeg djelovanja vode putem kojih se formiraju zone procjeđivanja vode i zone povećane saturacije vode što konačno može rezultirati pojavom erozije

(Reinhart, 2012. i Sjødahl, 2010.). Prema Foster i Schmertmanu erozija je uzrok 50 % svih slomova nasutih građevina te pojava pukotina, diskontinuiteta (Foster, 1998. i Schmertman, 2000.). U kombinaciji s erozijom i životinjske nastambe znatno utječe na stabilnost nasipa (Di Prinzio, 2010.).

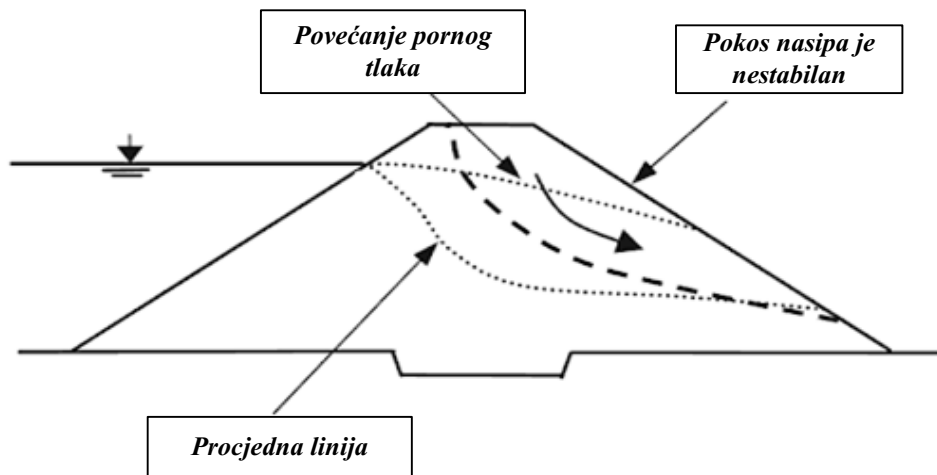
Voda može ugroziti stabilnost nasipa tako da uzrokuje dezintegraciju materijala u samom tijelu nasipa, temeljnom tlu na koji je položen nasip, te migracijom iz nasipa u temelj i obrnuto. S aspekta stabilnosti zemljanog nasipa njegovi najvažniji dijelovi su: uzvodni pokos, temeljno tlo, jezgra i procjedna linija. Jezgre u nasipima najčešće se grade od gline, jer njena visoka nepropusnost minimalizira migraciju vode unutar nasipa i djeluje preventivno u slučaju erozije, prema (Farzampour, 2014.). Nedostatak glinene jezgre je mala posmična čvrstoća koju glina ima, tako da je glinena jezgra deblja što je pokos nasipa podložniji proklizavanju.

Proces erozije započinje formiranje procjedne zone i laganim procjeđivanjem vode kroz nasip. Kako se erozija pojačava i sve više napreduje, čestice tla gube povezanost među sobom te bivaju isprane vodom. U posljednjoj fazi erozije nasipu prijeti opasnost od urušavanja. Urušavanje se najčešće manifestira formiranjem klizne plohe na pokosu nasipa ili naviranjem vode preko krune nasipa.

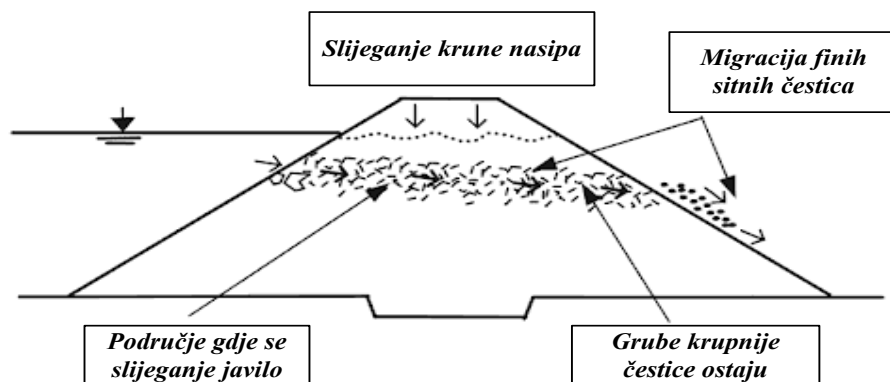


Slika 1. Pojava erozije u nasipu (Foster, 1999.).

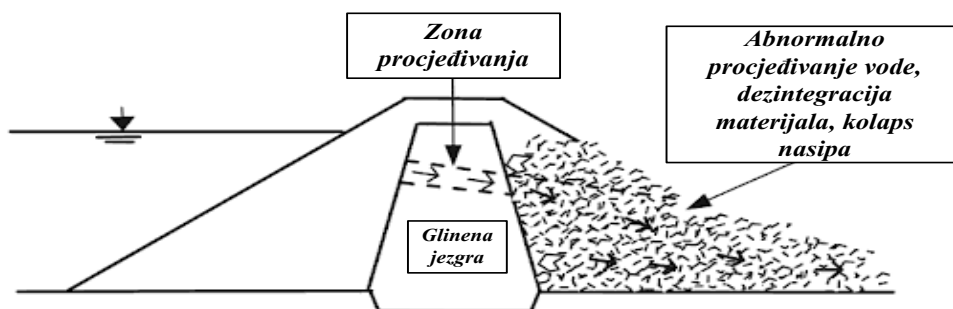
Kako erozija napreduje kroz nasipa, povećanje poreznog tlaka uzrokuje pomicanje procjedne linije naviše, prema kruni (Slika 2.). Sve veći dio nasipa je saturiran vodom, pa se efektivna naprezanja smanjuju i pokos nasipa postaje nestabilan i podložan urušavanju.



Slika 2. Klizna ploha na nasipu



Slika 3. Prelijevanje vode preko nasipa



Slika 4. Kolaps nasipa zbog narušene stabilnosti

## 2.1. Geofizičke metode za istraživanje zemljanih nasipa

Geofizičke metode s površine se vrlo često primjenjuju u geotehnici i zaštiti okoliša, jer daju vrlo efikasan prikaz fizikalnih uvjeta i stanja geomedija koji se istražuje (Reynolds, 1997.). Posebno se to odnosi na geotehničke konstrukcije poput zemljanih nasipa, retencija i brana za čije ispitivanje nije dopušteno ili je strogo ograničena primjena destruktivnih i invazivnih metoda, primjerice istražnog bušenja ili dinamičkih geotehničkih proba. Identifikacija vrsta i uslojenosti podpovršinskih formacija, ocjena mehaničko stanje konstrukcije i temeljnog tla, razina podzemne vode i stanja vodonosnika, odnosno geotehničko stanje lokacije i razvoj zona saturacije vodom, glavni su ciljevi takvih geofizičkih istraživanja (Gazdek, 2012.).

Zašto koristiti geofizičke metode? Zato što su geofizička istraživanja:

- Financijski povoljna: geofizička istraživanja jeftinija su u usporedbi s nekim drugim metodama istraživanja koja su još k tome i invazivne.
- Terenski brzo izvediva: velika područja istraživanja u kratkom roku ovisno o metodi i predmetu istraživanja. Kod zemljanih nasipa to su obično kilometri, pa dnevno može se istražiti i do 5 km.
- Neinvazivna: to znači da se obavljaju s površine, nisu potrebna kopanja ili bušenja i tako se ne pridonosi mogućoj destabilizaciji nasipa. Također, istraživati se može u urbanim područjima ili na prometnicama bez da se ometa njihov rad
- Mobilna i prilagodljiva: oprema za geofizička istraživanja lako je prenosiva, nije glomazna ili teška i lako se prilagodi konfiguraciji terena. (Rana, 2014.).

Dokazana je činjenica da korištenjem samo jedne geofizičke metode dobiva nedovoljno kvalitetna i nedovoljno jasna interpretacija rezultata, jer izmjerene vrijednosti parametra koje dobivamo imaju široku mogućnost interpretacije, zato se nastoji koristiti druga metoda ili više njih kako bi potvrdili naznake svojstva geomedija koje su uočene prvom metodom (Rana, 2014.). Interpretacija geofizičkih mjerenja se temelje na razlici i kontrastu geofizičkih svojstava, a takve promjene mogu koincidirati s promjenama i granicama geomedija različitih fizičko – mehaničkih svojstava (Gazdek, 2011.).

Postoji širok spektar geofizičkih metoda (Rana, 2014.) koje se mogu primijeniti u istraživanju zemljanih nasipa, a u ovome radu su pobliže objašnjeni rezultati primjene četiri metode koje se najčešće koriste: tomografija metodom otpornosti (geoelektrična metoda), refrakcijska seizmika i više-kanalska analiza površinskih valova (seizmičke metode), te georadar (elektromagnetska metoda). Navedenim se metodama mogu detektirati anomalije i nehomogenosti unutar nasipa, koje se pojavljuju u vidu: dezintegracije materijala, zone akumulirane vode i povećane saturacije te zone diskontinuiranosti. Osim anomalija, navedene geofizičke metode služe primjerice za modeliranje vrsta i uslojenosti geomedija pod površinom, za određivanje dubine do prirodno sraslog tla ili do svježe stijene, za određivanje vodnog lica (razina podzemne vode) te za određivanje onečišćenja (kao primjerice zaslanjenost) vodonosnika.

### **3. Geoelektrične metode**

Električna otpornost je važno dijagnostičko svojstvo geomedija, geoelektrične metode zasnivaju se na mjerenju prividne otpornosti tla i stijena. Na vrijednost otpornosti utječe niz faktora: vrsta minerala tla ili stijena, poroznost, količina i mineralni sadržaj vode u porama tla i stijenskim pukotinama, struktura sloja, raspucanost stijena. Zbog različitog stupnja poroznosti stijene i saturiranosti vodom, otpornost se može mijenjati u širokim granicama. Pri mjerenju će sve vrijednosti prividne otpornosti biti jednake stvarnoj (pravoj) otpornosti samo ako je geološka sredina po cijeloj dubini homogena. Geološke sredine su najčešće heterogene pa prividna otpornost unutar zahvaćene dubine ima neku prosječnu vrijednost. Ta vrijednost ovisi o stvarnim otpornostima i raspodijeli geomedija po dubini te o razmacima mjerenih elektroda. Interpretacijom se iz poznate geometrije elektroda i poznatih vrijednosti izmjerenih prividnih otpornosti nastoji odrediti debljina i prava otpornost pojedine vrste geomedija. Podaci dobiveni geoelektričnim istraživanjima (sondiranje, profiliranje ili tomografija) su veoma pouzdani ako se verificiraju rezultatima neposrednih metoda istraživanja (iskopi, raskopi, istražna bušenja).

Sljedeća svojstva tla spadaju među najosnovnije: gustoća, čvrstoća, stišljivost, i propusnost. Procjena tih svojstava tla od presudne je važnosti za procjenu stabilnosti nasipa. Svojstva se mogu procjeniti laboratorijskim analizama ili terenskim istraživanjima. Geoelektričnim metodama moguće je detektirati zone pojačane propusnosti kroz tijelo nasipa (ili ispod njega) te se usporedbom s područjima poznate propusnosti može ocijeniti stanje ugroženosti.

#### **3.1. Geoelektrična tomografija metodom otpornosti (ERT)**

Geoelektrična tomografija je metoda mjerenja i interpretacije električne otpornosti (eng. ERT – electric resistivity tomography). Ta metoda omogućava oblikovanje slike raspodjele geomedija različitih vrsta i svojstava pod površinom terena. Raspodjela litološki različitih geomedija temelji se na razlikama njihove stvarne otpornosti. Princip

primjene metode je distribucija električne struje u tlo oko elektroda, te mjerenje električne otpornosti tla kao funkcije dubine ili položaja. Elektrode se zabiju (ili na drugi načina učvrste) u površinski sloj terena, a preklopnik uređaja za mjerenje automatski mijenja (prebacuje) raspored strujnih i potencijalnih elektroda. Mjeri se razlika električnog potencijala (napon) na potencijalnim elektrodama te jakost struje potrebne za nastanak tog potencijala između strujnih elektroda da bi se uz pomoć konstante geometrijskih odnosa svih elektroda (K) odredila prividna otpornost.

Za mjerenje i interpretaciju 2D tomografije koriste se po dvije strujne elektrode (C1 i C2) i dvije potencijalne elektrode (P1 i P2), koje su dio niza elektroda postavljeni duž zadanog pravca (profila). Interpretacijom se potom određuju debljine i prava otpornost pojedinih geoelektričnih sredina. Polovište potencijalnih elektroda P1 i P2 je točka na koju se odnosi podatak mjerenja, a razmakom strujnih elektroda C1 i C2 je određena dubina mjerenja (dubinski zahvat). Mjerenje otpornosti se izvodi iz više dubinskih zahvata, a pri tome se mijenjaju točke mjerenja. 2D tomografija se smatra kombinacijom metoda sondiranja i profiliranja, a izvodi se sofisticiranim više-elektrodnim sustavima. Geoelektrična tomografija se sve češće koristi za istraživanje zona složene geologije u kojima druge geofizičke metode pokazuju slabije rezultate. Prednosti geoelektrične tomografije:

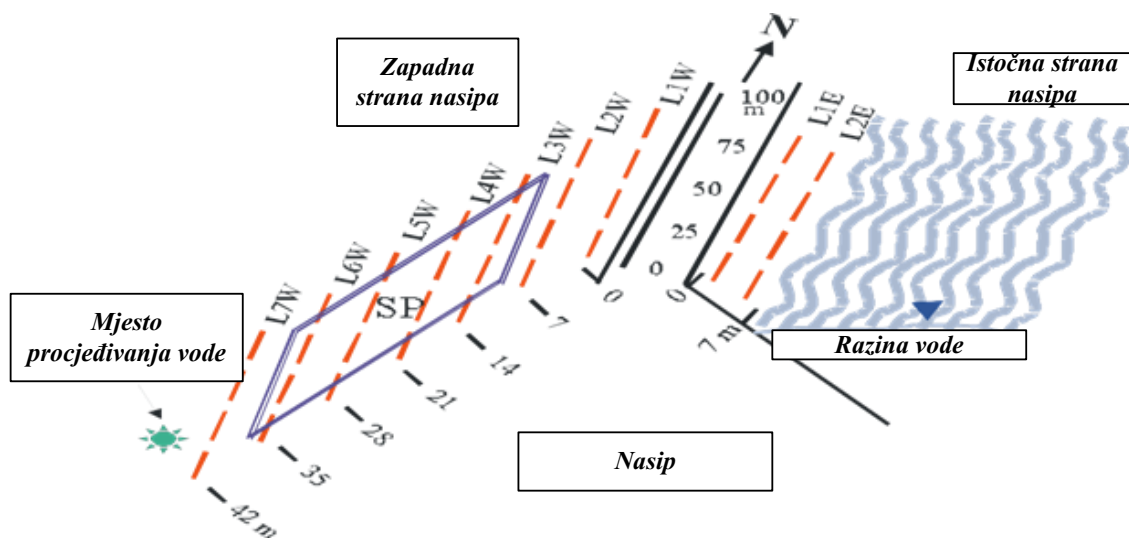
- nije potrebno naknadno razmicanje elektroda u profilu,
- mjerni raspored se u profilu pozicionira automatizirano.

### **3.1.1. Istraživanje erozije u zemljanim nasipima**

Erozija u zemljanim nasipima nastaje kada se čestice tla od kojih je nasip izgrađen ispiru djelovanjem vode (transport čvrsti čestica tla djelovanjem toka vode kroz tijelo nasipa). Mogućnost pojave erozije ovisi o koheziji među česticama, propusnosti materijala ili mogućnosti da materijal djeluje kao svojevrsna barijera prodiranju vode (Flores-Berrones, 2011.). Erozijska se povećava kada postoji veći broj mjesta unutar nasipa kojim voda može migrirati, a ti su diskontinuiteti obično pukotine ili šupljine.



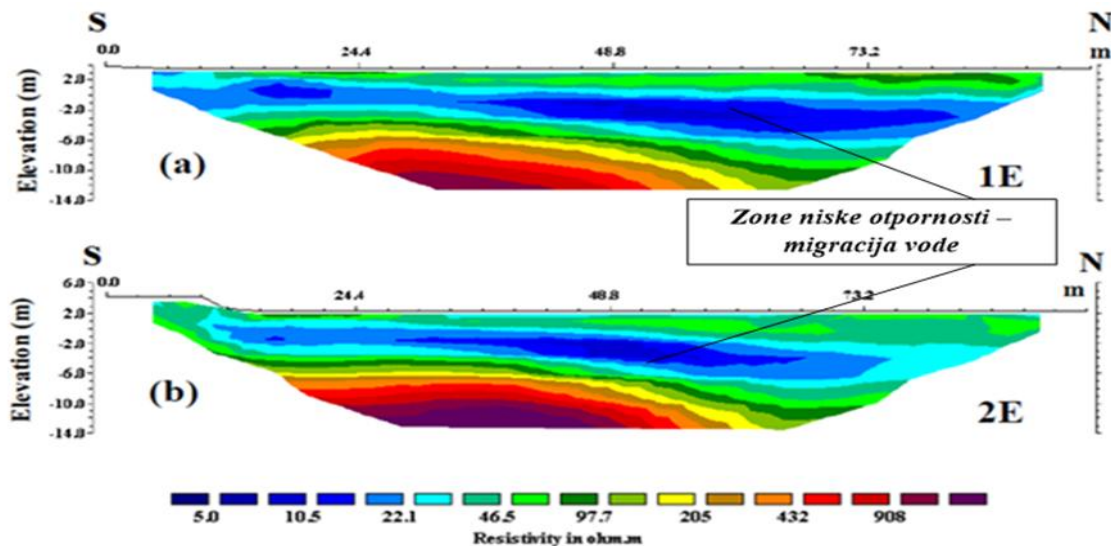
Slika 5. prikazuje istraživanje homogenog nasipa bez jezgre, izgrađenog od gline i pijeska s prosječnom visinom od 10 metara iznad temeljne dolomitne stijene. Normalna razina vode na istočnoj (uzvodnoj) strani nasipa bila je 3,5 metara mjereno od krune nasipa, ali je s vremenom pala na razinu od 7 metara zbog procjeđivanja vode kroz nasip. Prijašnji pokušaji da se zaustavi procjeđivanje vode bili su neuspješni zbog nedostatka informacija o unutrašnjoj građi nasipa i anomalijama koje omogućuju stvaranje puta kojim voda migrira. Istraživanje metodom električne otpornosti jedan je od najboljih načina detektiranja anomalija u nasipu koje su povezane s procjeđivanjem vode i stupnjem saturacije, dubine do podzemne vode ili općenito za određivanje lokacije saturirane zone (Gamal et al., 2014.).



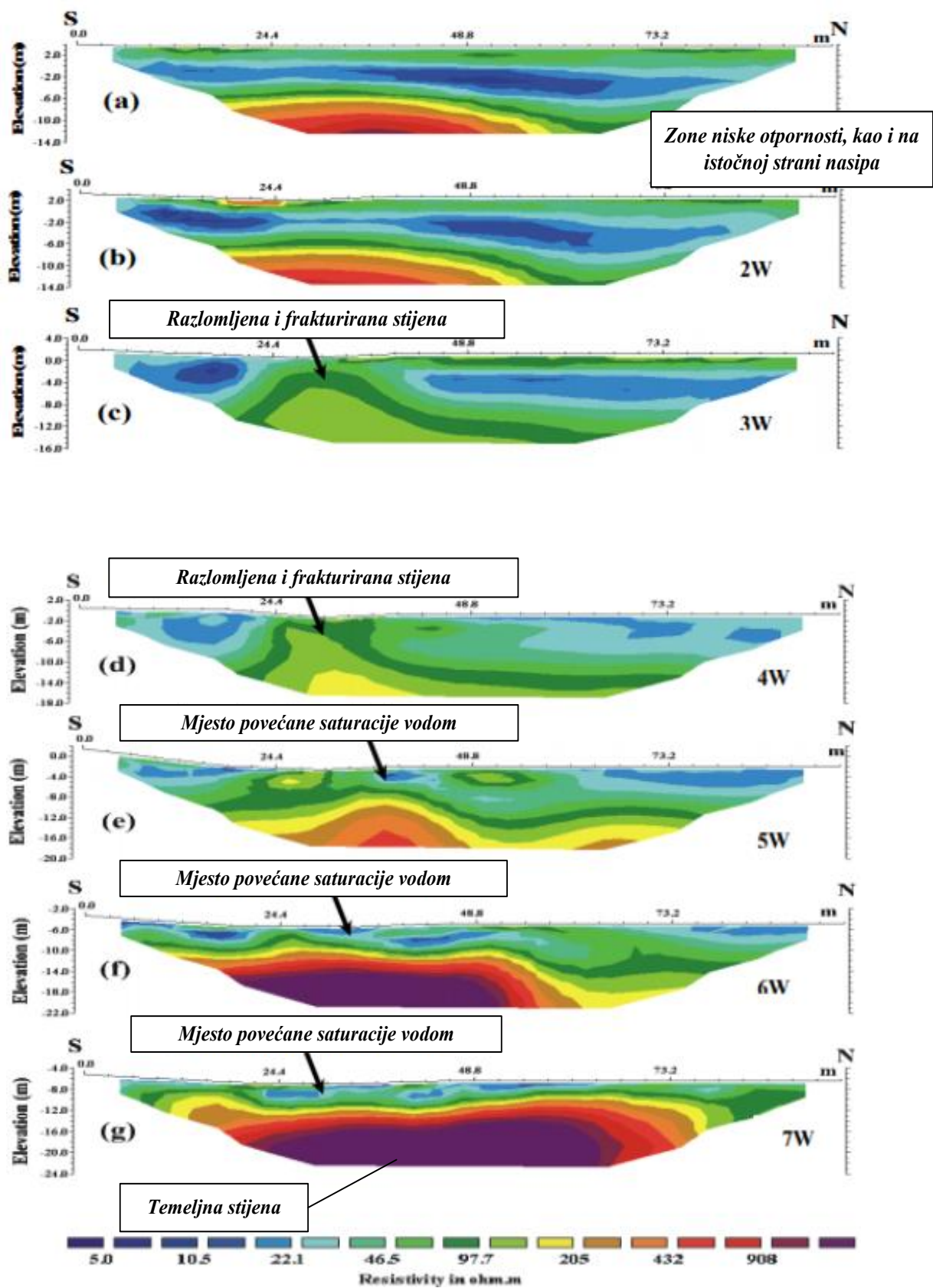
Slika 5. Prikaz ERT istraživačkih profila kojima su detektirane anomalije unutar nasipa (Gamal et al., 2014.).

Postavljeno je ukupno 9 istraživački profila (Slika 5., crvene crtkane linije), dva s istočne i sedam sa zapadne strane, kako bi se dobila što kvalitetnija i jasnija slika stanja unutar nasipa. Mjesto procjeđivanja bilo je u podnožju nasipa s njegove zapadne strane. Slika 6 (a) i (b) prikazuje rezultate geoelektrične tomografije metodom otpornosti na istočnoj strani nasipa. Oba profila (L1E i L2E) otpornosti pokazuju gornju stranu nasipa koju karakteriziraju vrijednosti otpornosti od 5 do 15  $\Omega\text{m}$ , a debljina tog sloja varira od 1 do 2,5 metara. To je sloj muljevite gline s vrlo niskim udjelom saturacije. Ispod tog sloja identificiran je homogen sloj niske otpornosti koji mijenja svoju debljinu, od 4 m na južnoj strani do 10 m na sjevernoj. Taj sloj se sastoji pretežito od gline, a zbog niskih vrijednosti otpornosti (5-50  $\Omega\text{m}$ ) pretpostavlja se da je sloj gline natopljen vodom koja

migrira kroz nasip pod utjecajem različitih vrijednosti hidrauličkog gradijenta. Zona na dubini između 10 i 14 m je zona visoke otpornosti i predstavlja temeljnu dolomitnu stijenu. Istraživački profili L1W i L2W na zapadnoj strani pokazuju vrlo slično situaciju kao i profili L1E i L2E na istočnoj strani, Slika 7. (a) i (b). Istraživački profili L3W i L4W Slika 7. (c) i (d) detektirali su zonu otpornosti s vrijednostima između 50 i 200  $\Omega\text{m}$  kao zonu frakturirane i razlomljene stijene. Nadalje, profil L5W, Slika 7. (e), pokazuje u blizini razlomljene stijene zonu niske otpornosti koja ima vrijednost oko 20  $\Omega\text{m}$ . To je jasan indikator procjeđivanja vode na tom dijelu nasipa. Na Slikama 7. (e) i (f) vidi se trend pojavljivanja te iste zone niske otpornosti koja zauzima sve veću površinu. Na posljednjim profilima, L6W i L7W, opet je detektirana temeljna stijena koja se može prepoznati po visokim vrijednostima otpornosti (većim od 900  $\Omega\text{m}$ ).



Slika 6. Rezultati geoelektrične tomografije na istočnoj strane nasipa (Gama let al., 2014.).



Slika 7. Rezultati geoelektrične tomografije istraživanja zapadne strane nasipa (Gamal et al., 2014.).

Sljedeći primjer prikazuje istraživanje heterogenog nasipa s glinenom jezgrom radi detektiranja zona procjeđivanja vode (Al Fares, 2014.). Zadaća nasipa je bila zadržavanje velikog vodenog vala, te snabdijevanje okolnog područja vodom za potrebe agrikulture i navodnjavanja.

Geoelektričnom tomografijom je detektirana prisutnost šupljina, diskontinuiteta te razlomljenih i okršenih područja u temeljnoj stijeni koja je sastavljena od vapnenca i dolomita. Pretpostavlja se da su upravo te anomalije uzrok povećanom procjeđivanju vode kroz nasip.

Nasip se istraživao dvama ERT profilima: ERT P-1 duljine 715 metara s razmak elektroda od 5 m i ERT P-2 duljine 430 m s razmakom elektroda od 2 m. Istraživana dubina bila je u rasponu od 20 do 45 m. Istraživački profil ERT P-1 otkrio je sloj aluvijalnog tla koji sadrži razlomljenu i okršenu vapnenačku stijenu. Pronađeno je nekoliko šupljina, diskontinuiteta u vapnenačkoj stijeni, koje igraju ključnu ulogu u procjeđivanju vode kroz nasip. ERT P-1 profil je bio postavljen s uzvodne strane, a ERT P-2 s nizvodne strane nasipa.

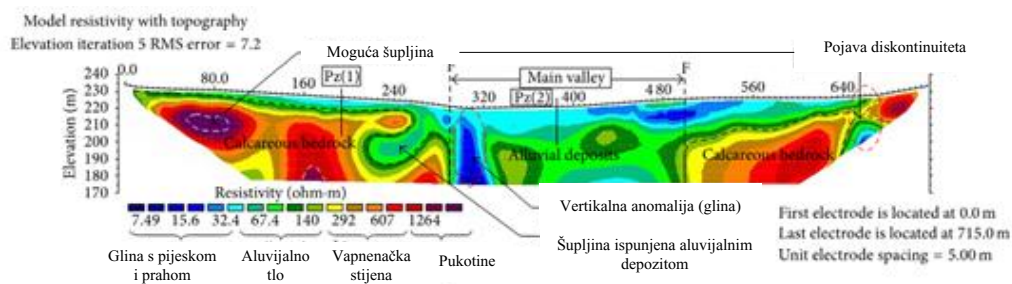
Rezultati ERT P-1 (Slika 8.) istraživačkog profila mogu se podijeliti na tri bloka. Prvi blok se prostire od 0 do 300 m po duljini profila. Sastavljen je sloja debljine 7 m u kojem otpornost ima vrijednost između 50 i 150  $\Omega$ m. To je interpretirano kao mješavina gline, pijeska i šljunka koji se nalaze na dnu jezera. Zona visoke otpornosti čija vrijednost seže do 1200  $\Omega$ m predstavlja razlomljenu stijenu ili stijenu koja sadrži šupljine nastale djelovanje podzemnih voda u vapnenačkoj stijeni. Još jedna šupljina detektirana je između 230 i 250 m i predstavlja šupljinu koja je ispunjena mješavinom pijeska i šljunka (aluvijalni depozit), a nastala je trošenjem karbonatne stijene.

Drugi blok prostire se između 300 i 500 m i većinom je ispunjen aluvijalnim (kvartarnim) naslagama s vrijednostima otpornosti između 50 i 150  $\Omega$ m. Zona vrlo niske otpornosti koja se nalazi između 310 i 320 metara predstavlja vertikalnu anomaliju - prostor na granici dvaju blokova ispunjen glinom. Aluvijalne naslage u tom bloku omogućuju kretanje (migraciju) vode. Voda je „pronašla svoj put“ na samom kontaktu aluvijalnih naslaga i razlomljene karbonatne stijene. Sa stanovišta sigurnosti nasipa taj dio je najvažniji i predstavlja mjesto najvećeg procjeđivanja vode.

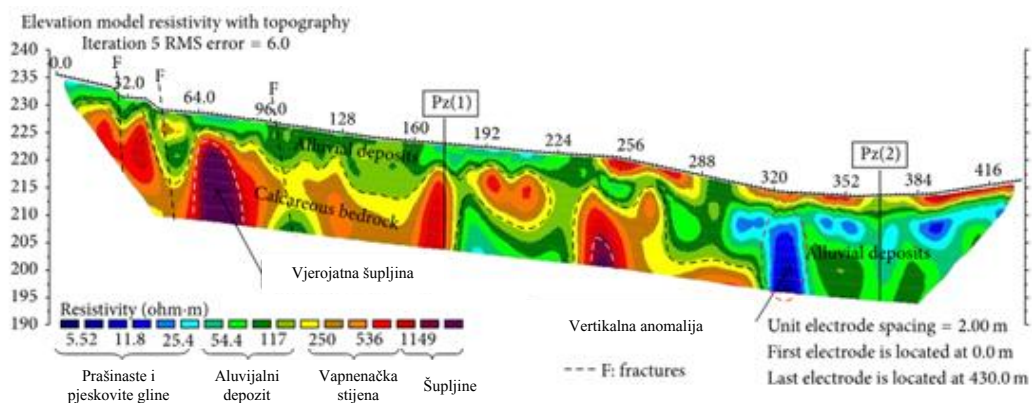
Treći blok je raznovrstan. Prvi slojevi imaju vrijednost otpornosti između 50 i 150  $\Omega$ m te se također sastoje od kvartarnih naslaga. Ispod njih je zona visoke otpornosti koja je

interpretirana kao vapnenačka stijena. Oko 650-og metara profila nalazi se manja zona niže otpornosti, koja se identificirala kao razlomljena stijenska masa i također predstavlja mjesto (zonu) procjeđivanja vode.

Profil ERT P-2 (Slika 9.) smješten je u terenu iza nasipa. Razmještaj elektroda s razmakom od 2 m pa se dobila detaljnija slika u presjeku. Gornji sloj je sastavljen od mješavine gline, pijeska i šljunka i varira u svojoj debljini. Razlog tome je erodirana vapnenačka stijena koja se nalazi ispod tog sloja. Temeljna vapnenačka stijena se prepoznaje po otpornostima između 300 i 1000  $\Omega\text{m}$ . Manje vrijednosti odgovaraju jače razlomljenoj i diskontinuiranoj stijenskoj masi. Može se zaključiti da postoji trend pojave pukotina, šupljina i diskontinuiteta s obje strane nasipa što samo potvrđuje činjenicu da kroz te lateralne anomalije postoji kretanje vode (komunikacija vode kroz nasip).

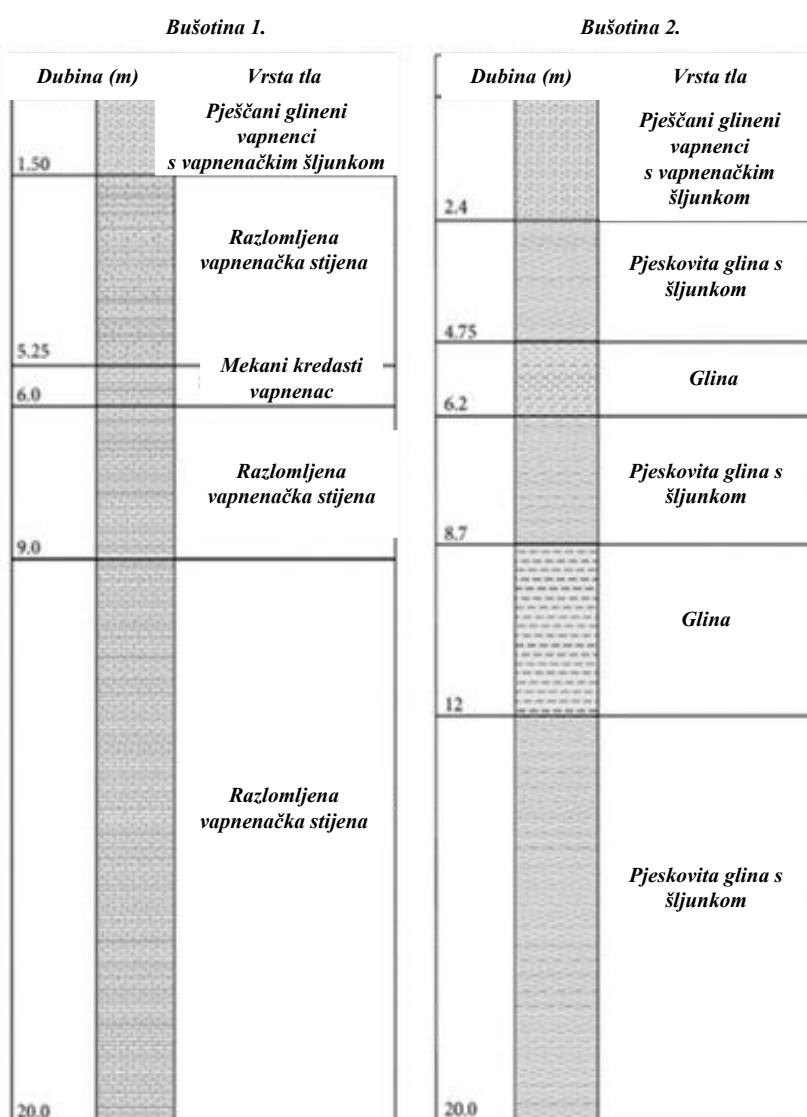


Slika 8. Geoelektrični profil nasipa Abu Baara, profil ERT P-1 (Al Fares, 2014.).



Slika 9. Geoelektrični profil nasipa Abu Baara, profil ERT P-2 (Al Fares, 2014.).

Slika 10. prikazuje rezultate geoloških i geotehničkih istraživanja u bušotinama (Pz(1) i Pz(2) na Slikama 8. i 9.) da bi se potvrdile indikacije o uslojenosti postavljene geofizičkim metoda. Geofizičke interpretacije se dobro slažu s geotehničkom determinacijom.

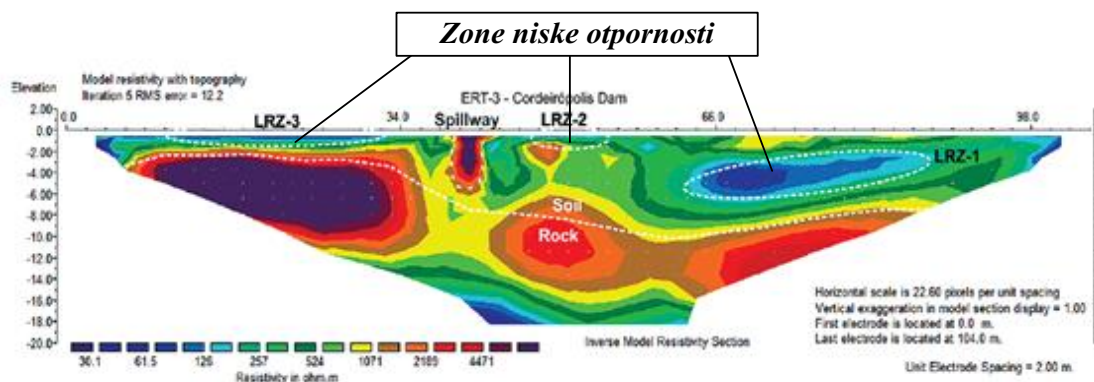


Slika 10. Uslojenost tla nasipa Abu Baar (Al Fares, 2014.).

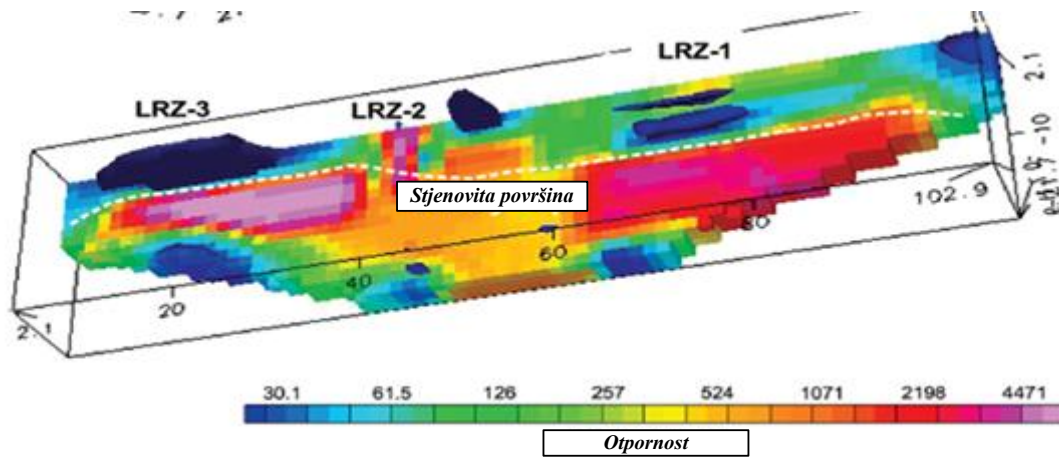
Posebna značajka nasipa kojeg prikazuje Slika 11. (Camarero, 2017.) je odvodni kanal između 39. i 43. m profila, pri samoj kruni nasipa. Taj se „objekt“ može prepoznati po vrijednostima visoke otpornosti (veće od 1000  $\Omega$ m) u geoelektričnoj sredini male

otpornosti (do 250  $\Omega$ m). Nadalje, detektirane su tri zone niske otpornosti. Prva (označena s LRZ 1) smještena je između 56. i 86. m profila na dubinama između 4 do 8 m. Vrijednost otpornosti unutar te je između 60 i 100  $\Omega$ m. To je područje povećane saturacije, voda migrira tim dijelom nasipa i akumulira se okomito na uzdužnu os nasipa. Druga zona niske otpornosti (LRZ-2) nalazi se pored odvodnog kanala, između 46. i 54. m, pri samom vrhu nasipa. Pretpostavlja se da je to zona procjeđivanja vode. Između 10. i 32. m, također pri samom vrhu nasipa, treća je zona niske otpornosti, označena s LRZ-3. Zone LRZ-1 i LRZ-3 imaju slično podrijetlo, a formira ih materijal kod kojeg je izgubljena kompaktnost među česticama i ne može djelovati kao barijera. LRZ-2 je zona podložna eroziji, a takve zone uglavnom mogu biti izložene snažnom procjeđivanju vode.

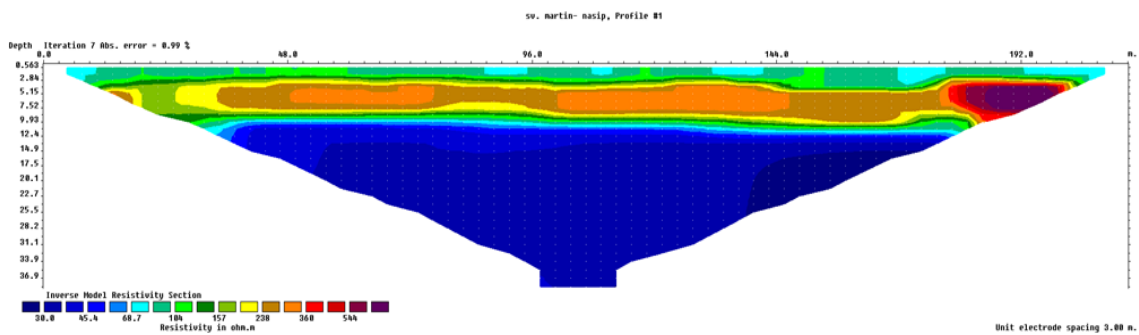
Na Slici 12. je 3D prikaz istraživanog nasipa. Lako se uoče zone niske otpornosti koje imaju lateralnu/horizontalnu distribuciju.



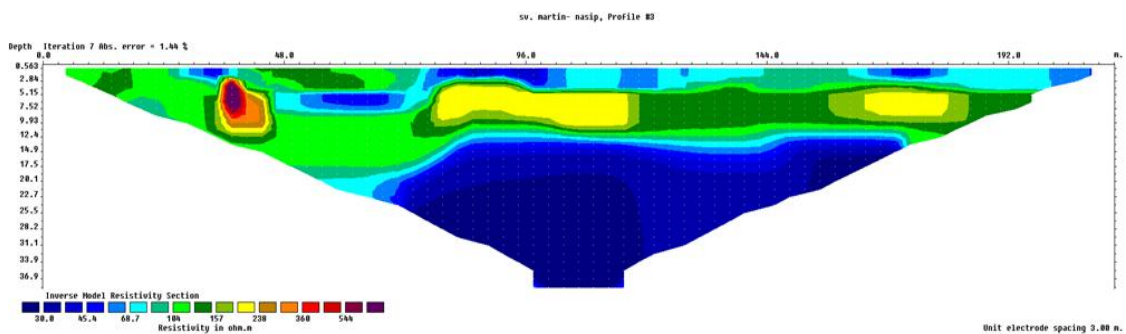
Slika 11. Prikaz istraživanja nasipa u kojem su otkrivene 3 zone niske otpornosti (Camarero, 2017.).



Slika 12. 3D prikaz nasipa sa slike 11. Jasnije se uočavaju veličina i položaj zona nestabilnosti (Camarero, 2017.).



Slika 13. Geoelektrični profil „Sv. Martin – nasip, Profil 1“



Slika 14. Geoelektrični profil „Sv. Martin – nasip, Profil 2“

Na slici 12. je 3D prikaz istraživanog nasipa, vide se zone niske otpornosti koje imaju lateralnu/horizontalnu distribuciju, općenito Wennerov raspored elektroda ima veću uspješnost u otkrivanju horizontalno položenih anomalija (Camarero, 2107.; Loke,



2004.). Manje vrijednosti specifične električne otpornosti (10 - 50  $\Omega\text{m}$ ) ukazuju na vezane klastične sedimente, glinu i lapor, Slika 13. Takvi sedimenti uglavnom zaliježu na dubinama većim od 10 m, iako su moguće leće gline i u plićim slojevima, što je vidljivo na Profilu 2, Slika 14., gdje čine podinu nevezanim klastičnim sedimentima. Nevezani sedimenti na nasipu Sv. Martin su bili: pijesci (s otpornostima 50 – 100  $\Omega\text{m}$ ) te šljunkoviti pijesci do pjeskoviti šljunci (s otpornostima 100 - 360  $\Omega\text{m}$ ). Na profilima 1 i 2, Slike 13. i 14., mogu se vidjeti i zone (leće) električne otpornosti veće od 360  $\Omega\text{m}$ . U njima se najvjerojatnije nalaze krupnozrnati šljunci iz kojih su isprane sitnije čestice, pa se pretpostavlja da kroz te zone nasipa dolazi do znatnijeg procjeđivanja vode.

U navedenim primjerima može se vidjeti da su ERT metodom uspješno prikupljeni vrijedni podaci o zonama povećane saturacije vodom. Najčešće se koriste Wennerov i dipolni raspored elektroda, jer se nastoji dobiti što bolja vertikalna i horizontalna rezolucija tomografskog presjeka. Nadalje, radi utvrđivanja stanja unutar nasipa detektiranjem pukotina i diskontinuiteta u primjeru homogenog nasipa za obranu od viskoha voda (Gamal et al., 2014.), mjerilo se na čak 9 istraživačkih profila. Detaljnije slike daju precizniji uvid o mjestima unutar nasipa koja mogu biti prijetnja za sigurnost konstrukcije. Štoviše, istraživački profili postavljeni na obje strane nasipa (uzvodna i nizvodna) omogućuju detekciju dezintegracije te dobru procjenu volumena i stanja zona u kojima se voda kreće kroz tijelo nasipa. Također, ERT metoda bila je uspješna u davanju informacija o vrsti i distribuciji slojeva koji čine nasip, a u primjeru nehomogenog nasipa s glinenom jezgrom (Al Fares, 2014.) pretpostavka o uslojenosti potvrđena je podacima iz bušotina što je samo potvrda kvalitete metode. Ne može se zanemariti jedan očigledan nedostatak, što iz nužnosti što iz nemogućnosti utjecaja na prirodnu konfiguraciju terena: temeljna stijena na kojoj je izabrana gradnja nasipa u dva primjera je bila vapnenačkog porijekla. Takvu vrstu stijenske mase voda lako otapa i okršava pa onda tako dezintegrirana stijena uvijek predstavlja rizik za sigurnost nasipa.

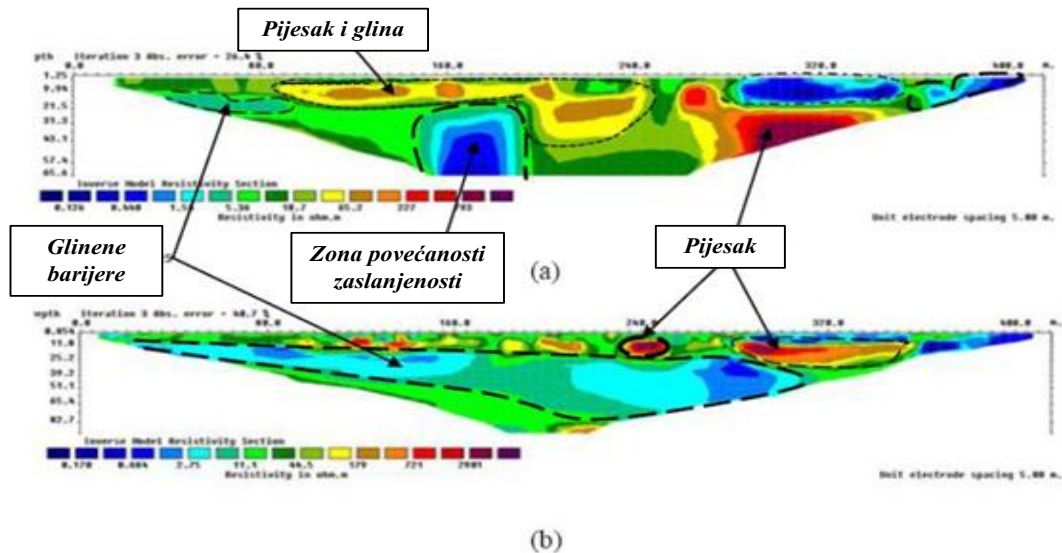
### **3.1.2. Istraživanje zaslanjenja nasipa**

Istraživanje stanja zemljanih nasipa i barijera je vrlo često i usko vezano uz istraživanje vodonosnih zona pa se najčešće koriste geoelektrične metode otpornosti. Distinkcija litoloških formacija kao što su gline, prahovi, pijesci i šljunci s različitim stupnjem saturacije slanom vodom nije moguća zbog njihovih vrlo sličnih vrijednosti otpornosti. Tomografija otpornosti ipak u određenoj mjeri smanjuje utjecaj odnosa razmaka elektroda i dubine prodora s obzirom na rezoluciju, ali i dalje neke kombinacije debljine i otpornosti pojedinog geomedija mogu uzorkovati iste oblike i vrijednosti anomalija pa jednoznačnost interpretacije nije zagarantirana (Gazdek, 2012.).

U istraživanju zaslanjenja vodonosnika (Oyeyemi, 2015.) koristio se Wennerov i dipol-dipol raspored elektroda da bi se dobila kvalitetna vertikalna i horizontalna rezolucija. Wennerov raspored izabran je zbog mogućnosti razlučivanja vertikalnih promjena (horizontalne strukture), iako ima umjerenu dubinu istraživanja (rijetko više od 20% duljine profila). Manjkavost tog rasporeda može biti i horizontalna (lateralna) rezolucija kada se povećava udaljenost između elektroda (Loke, 2000.). Da bi se taj nedostatak nadoknadio, uzima se dipol-dipol raspored s prividnom otpornošću  $\pi n(1+n)(2+a) aR$ , gdje je „a“ razmak između elektroda izražen u metrima, a „R“ predstavlja otpor izražen u Ohmima ( $\Omega$ ). Prednost tog rasporeda je u tome da je dobar u mapiranju vertikalnih anomalija-struktura i daje bolju lateralnu sliku u odnosu na Wennerov raspored (Loke, 2004.).

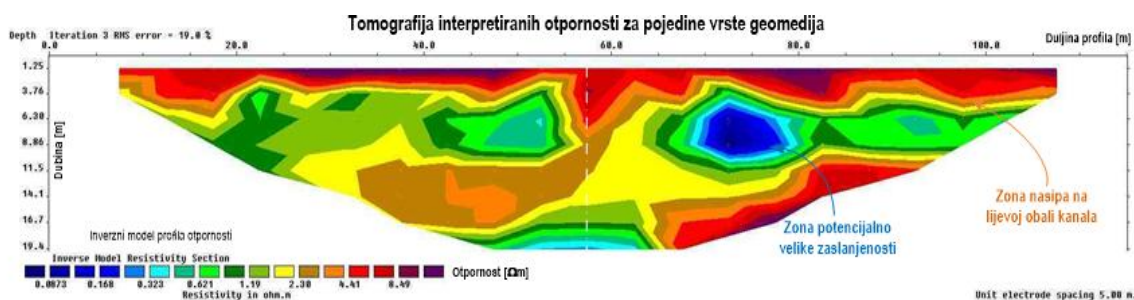
Wennerovim rasporedom zabilježene su vrijednosti otpornosti 0,423-196  $\Omega$ m, 0,260-1909  $\Omega$ m, 0,126-760  $\Omega$ m, 0,453-143  $\Omega$ m, dok za dipolni raspored vrijednosti otpornosti bile su 0,192-4100  $\Omega$ m, 0,270-66,2  $\Omega$ m, 0,170-2901  $\Omega$ m, 0,0494-2496  $\Omega$ m. Neka područja koja karakterizira niska otpornost (manja od 5  $\Omega$ m) zahvaćena su slanom vodom ili je to zona bočate vode. Uzrok tome prodoru zaslanjenja se smatra prekomjerno crpljenje podzemne vode za industrijske i kućanske potrebe. To rezultira padom razine slatke vode i prodoru gušće slane vode u „oslobođeni“ prostor. Prodoranjem zaslanjene vode formirala se zona vrlo male otpornosti dubljim slojevima ispod vodonosnika, Slika 15. (a). Daljnjim crpljenjem podzemne vode dolazi do sve većeg zaslanjenja pitke vode.

U istraživanju stanja zemljanog nasipa melioracijskog kanala Most Raša (Gazdek, 2012.) dodatan je zahtjev bio i detekcija prodora zaslanjenja u tijelo nasipa. Da bi odredile referentne vrijednosti otpornost saturiranog pijeska je utvrđena sondiranjem neposredno uz obalu mora.

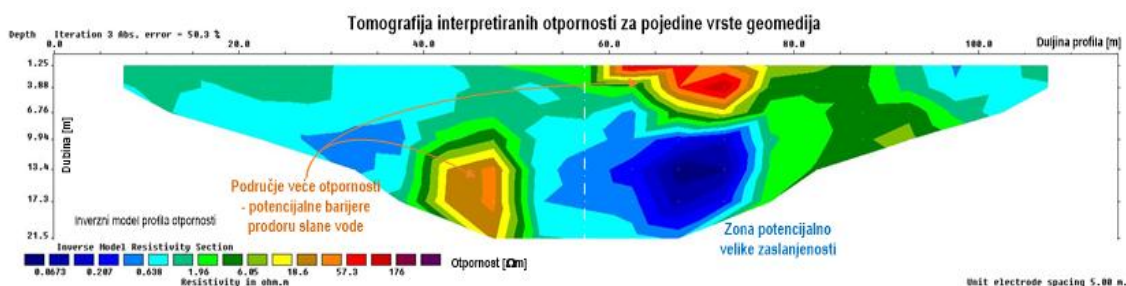


Slika 15. Rezultati dobiveni Wennerovim a) i dipolnim rasporedom elektroda (Oyeyemi, 2015.).

Raspon izmjerenih vrijednosti  $\rho_f = 0,5-1,6 \Omega m$  je odgovarao očekivanim otpornostima u marinskim sedimentima (Schoen, 2004.). Osim toga, vrijednosti su odgovarale i Manheimovom izrazu ( $S=7,042 \rho_p^{-1,0233}$ ), iz kojeg je moguće izraziti salinitet S iz otpornosti morske vode,  $\rho_p \approx 0,2 \Omega m$  (Manheim, 2004.; Swarzenski, 2006.). Prema tome, otpornost pitke vode saliniteta 2,5-5 mg/l bi imala vrijednosti 2,8-1,4  $\Omega m$  i mogla bi se pratiti kao „granica“ slane i slatke vode (Gazdek, 2012.). U prostoru isušivanja i aeracije vjerojatne su i manje otpornosti pornog sadržaja od  $\rho_p \approx 0,2 \Omega m$ , što bi impliciralo porast koncentracije soli u porama, ali i smanjenje zrna nekonsolidiranih sedimenata - pijesaka (Schoen, 2004.). Zbog toga bi se moglo pretpostaviti da je utjecaj slatke vode na salinitet u geomediju mali, a da dominantan utjecaj ima marinsko porijeklo i pulsiranje plime i oseke o čemu ovisi daljnje zaslanjivanje prostora. Efekt širenja salinizacije je i bila inicijalna problematika (Gazdek, 2012.).



Slika 16. Geoelektrična tomografska slika interpretirane otpornosti za pojedine vrste geomedija. Lijeva obala kanala (Gazdek, 2012.).



Slika 17. Geoelektrična tomografska slika interpretirane otpornosti za pojedine vrste geomedija. Desna obala kanala (Gazdek, 2012.).

### 3.2. Seizmičke metode

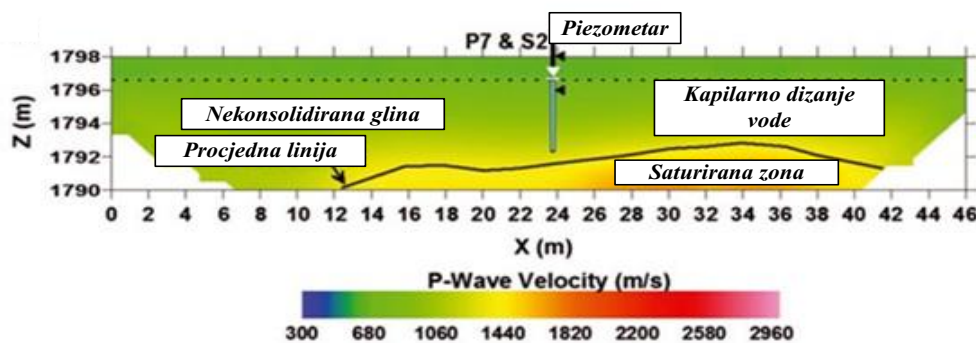
Seizmičko profiliranje se izvodi primjenom metoda u kojima se koriste seizmički valovi za stratificiranje geološke sredine i određivanje mehaničkih i dinamičkih svojstava geomedija. Seizmičke metode odličan su način da se detektiraju promjene u vlažnosti i gustoći materijala od kojih su zemljani nasipi izvedeni (Rana, 2015.). Seizmički valovi u beskonačnom, homogenom i izotropnom mediju šire se kao kompresijski P i posmični S prostorni valovi. S približavanjem granici polu-beskonačnog prostora (primjerice površina terena) ti se valovi transformiraju u površinske valove. Kada se za generiranje seizmičkih valova na površini koriste vertikalni izvori poput čekića ili pada utega, nastaju volumni i površinski Rayleighevi (R) valovi koji preuzimaju približno dvije trećine seizmičke energije izvora (Richart, 1970.).

### 3.2.1. Seizmička refrakcija

Ovom metodom se određuju vremena prvih nailazaka koji se očitavaju sa snimljenih seizmograma. Prvi se nailasci odnose na uzdužne P ili posmične S valove što već ovisi o načinu generiranja i snimanja seizmičkog poremećaja. Brzina seizmičkih valova je u uskoj vezi s dinamičkim svojstvima materijala koja se izražavaju preko Youngovog modula te su važni za procjenu geotehničkih parametara i identifikaciju slojeva u nasipima (Karl, 2011; Morris, 2005.).

Ograničenja refrakcijske metode je pretpostavka o porastu brzine seizmičkih valova s dubinom. Zbog toga nije moguće detektirati sloj niže brzine ispod sloja više brzine, pa je konačni rezultat prikaz na kojemu brzine seizmičkih valova uvijek rastu s dubinom.

Na slici 18. prikazani su rezultati dobiveni seizmičkom refrakcijom, kada je uspješno identificirana uslojenost nasipa kao i procjedna linija.



Slika 18. Rezultati seizmičke refrakcije (Rana, 2015.).

### 3.2.2. Višekanalska analiza površinskih valova (MASW)

Primjena višekanalne analize Rayleighevih površinskih valova (engl. Multi-Channel Analysis of Surface Waves, MASW) omogućava određivanje brzine VS posmičnih valova analizom disprezije površinskih valova u geomediju. Brzine posmičnih valova se koriste za procjenu dinamičkih svojstava geomedija. Složeni oblik Rayleighevih valova se sastoji od longitudinalnog i transverznog gibanja s međusobnim pomakom u fazi. Materijalna supstanca opisuje eliptičko gibanje, odnosno putanju kojoj je velika poluos vertikalna kada je val blizu površine. R valovi često se nazivaju i valjanje tla (engl. ground roll). Najvažnije svojstvo R valova je disprezija. Tako se valovi niže frekvencije, pa prema tome veće valne duljine, šire dublje u geomedij nego valovi visoke frekvencije, odnosno male valne duljine. Brzina širenja pri pojedinoj frekvenciji naziva se fazna brzina, a krivulja koja prikazuje faznu brzinu u ovisnosti o frekvenciji naziva se krivulja fazne brzine ili disperzijska krivulja. Prostorni P i S valovi nemaju disperzivno svojstvo.

Fazna brzina širenja Rayleighevih valova (VR) prvenstveno ovisi o brzini posmičnih valova (VS). Izraz koji pokazuje odnos između brzine posmičnih valova i brzine Rayleighevih valova je:

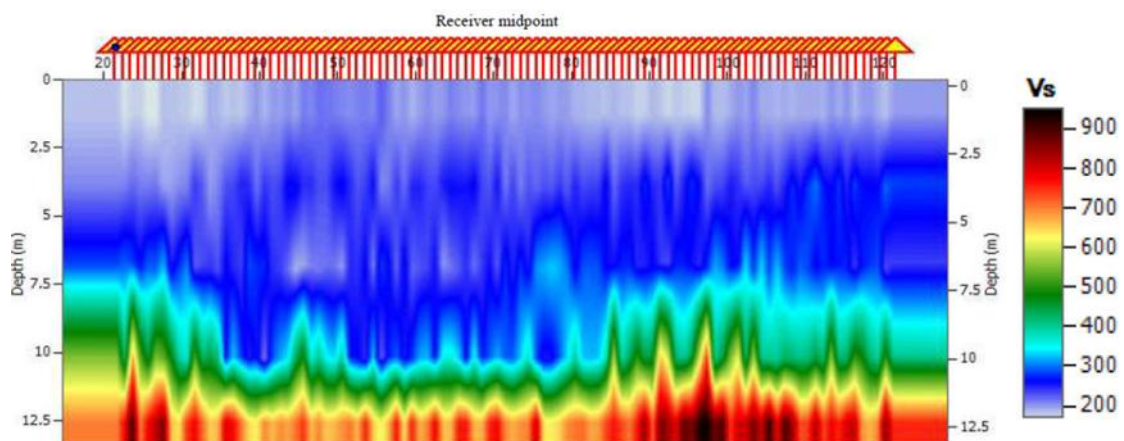
$$V_S = P V_R$$

Pri tome je P konstanta ovisna o Poissonovom koeficijentu  $\nu$

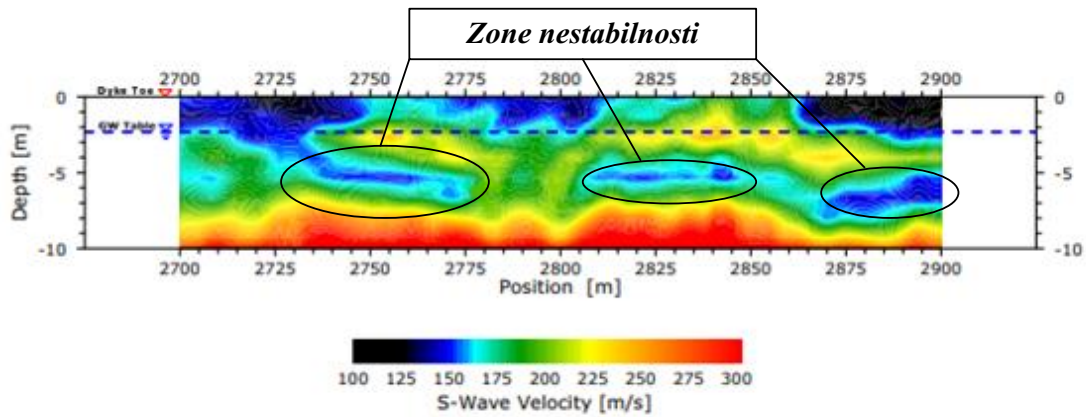
Pri istraživanju zemljanih nasipa MASW metodom procjenjuju se svojstva materijala u nasipu, što je od presudne važnosti za sigurnost nasipa. U primjeru (Collins, 2014.) dan je profil duljine 100 m i dubine 12,5 m koji prikazuje brzinu posmičnih valova u tijelu nasipa. Brzina posmičnih valova rasla je s dubinom, te je bila u rasponu od 200 do 900 m/s, Slika 19. Brzina P valova također se povećavala s dubinom, što samo potvrđuje da ne postoje slojevi niže brzine širenja valova ispod slojeva veće brzine širenja valova. Postojanje takve inverzije brzina bi ukazivalo na moguću dezintegraciju nasipa, odnosno na moguću nestabilnost.

Također, Poissonov koeficijent bilježio je porast s dubinom i kretao se u rasponu od 0,24 do 0,33. Lelio (2007.) je potvrdio da su manje vrijednosti Poissonovog koeficijenta indikativne za materijale koji je dobro konsolidirani i samim time dobri i stabilni građevni materijali u tijelu nasipa. Zaključno, nasip je u vrlo dobrome stanju, materijal je dovoljno konsolidiran i kompaktno, vrijednosti mjenjenih parametara su u rasponu očekivanih, te ne postoje nikakve značajnije anomalije. Izgled VS profila kakav je prikazan na Slici 19. je gotovo idealan, ukoliko su sigurnost i funkcionalnost nasipa prvi prioritet.

MASW metoda u (Lutz, 2011.) korištena je kako bi dala informacije o stanju nasipa, njegovoj uslojenosti i možebitnim anomalijama koje bi narušile sigurnost nasipa. Detektirane su tri zone unutar kojih bi integritet i kompaktnost materijala mogla biti narušena. Sumnja se da je rasjedna zona povezana sa saturiranom zonom pa može koristiti kao prostor kroz koji će voda otjecati kroz ili ispod nasipa. Za razliku od slika 19. ovdje možemo vidjeti slojeve niže brzine Vs valova kako se isprepliću s slojevima više brzine Vs valova, a kako je već spomenuto, takva situacija ukazuje da bi sigurnost nasipa mogla biti ugrožena.



Slika 19. Prikaz promjene brzine Vs valova s dubinom (Collins, 2014.).



Slika 20. Profil koji pokazuje zone male brzine VS u tijelu nasipa (Lutz, 2011.).

### 3.3 Georadarsko profiliranje terena (GPR)

Osnovni princip rada GPR sustava (engl. ground-penetrating radar) je odašiljanje kratkotrajnih elektromagnetskih pulsova (valova) raznih frekvencija u geomedij (tlo ili stijene). Odašiljač emitira puls, a putujući kroz geomedij on gubi dio svoje energije. Preostali dio se reflektira natrag do prijamnika, koji zajedno s odašiljačem čini antenski sustav. Amplituda elektromagnetskog (EM) pulsa ovisi o međusobnom položaju predajnika i prijamnika te načinu širenja u geomediju, ali značajno ovisi o kontrastu električnih svojstava geomedija.

Tehnika profiliranja georadarom se sastoji u cikličkom ponavljanju transmisije EM pulsova dok je antena u pokretu te registriranja amplituda reflektiranog EM vala u vremenu. Na taj se način oblikuje niz zapisa, odnosno radargram, s refleksima za svaku poziciju GPR sustava na profilu, u realnom vremenu.

Razlika između dielektričnih konstanti na granicama slojeva, predmeta ili objekata (dva medija različite električne vodljivosti) je ono što omogućuje registrirane promjene: što je veća razlika to je veći koeficijent refleksije (Conyers i Goodman, 1997.). Ove razlike povezane su s promjenama teksturi, litologiji, gustoći i porozitetu materijala, ali osobito s udjelom vode. Voda umanjuje energiju transmitiranih valova, te promjene u stupnju saturacije mogu prouzročiti nepravilne vrijednosti dielektrične provodljivosti (Di



Prinzio, 2010.). Stoga se preporuča izvođenje GPR istraživanja u suhim uvjetima (Conyers i Goodman, 1997.). U nastavku je tablični prikaz nekih geoloških sredina koje se nalaze u zemljanim nasipima i za njih svojstvene vrijednosti dielektrične konstante, električne vodljivosti, koeficijenta prigušenja i brzine EM vala (Tablica 1).

GPR ima široku primjenu u različitim inženjerskim granama (Reynolds, 2011.). Budući da se ovaj rad koncentrira na zemljane nasipe, georadarskim profiliranjem zemljanih nasipa moguća je detekcija:

- Šupljina ili pukotina koje se nalaze u nasipu, temeljnom tlu ili stijeni
- Vodopropusnosti slojeva i zona procjeđivanja vode
- Strukture tla i stijena
- Objekata nastalih djelovanjem životinja (nastambe i jazbine koje ugrožavaju stabilnost nasipa zato što su izgrađene kao tuneli i veliki pukotinski sustavi).

Neke druge geofizičke metode (geoelektrične metode otpornosti) nemaju dovoljno dobru rezoluciju za otkrivanje malih pukotina koje bi mogle biti važne za stabilnost nasipa. Velika prednost GPR je to što se može snimati u kontinuitetu te pokriti široko područje u relativno kratkom vremenu istraživanja. GPR podaci se mogu pratiti i vidjeti u realnom vremenu tijekom istraživanja, pa to omogućuje procjenu kvalitete prikupljenih podataka odmah na terenu (Di Prinzio, 2010.).

Tablice 1. Vrijednosti elektromagnetskih svojstava nekih medija u nasipu pri frekvenciji antene od 100 MHz (Morey, 1998.).

<b>Materijal</b>	<b>Dielektrična konstanta <math>\epsilon_r</math></b>	<b>Električna provodljivost <math>\sigma</math> [mS/m]</b>	<b>Prigušenje <math>\alpha</math> [dB/m]</b>	<b>Brzina <math>v</math> [m/ns]</b>
<b>Zrak</b>	1	0	0	0,30
<b>Svježa voda</b>	81	0,05	0,1	0,033
<b>Suhi pijesak</b>	3 – 5	0,01	0,01	0,15
<b>Saturirani pijesak</b>	20 – 30	0,1 – 1,0	0,03 – 0,3	0,06
<b>Mulj</b>	5 – 30	1 – 100	1 – 100	0,07
<b>Glina</b>	5 - 40	2 - 1000	1 - 300	0,06

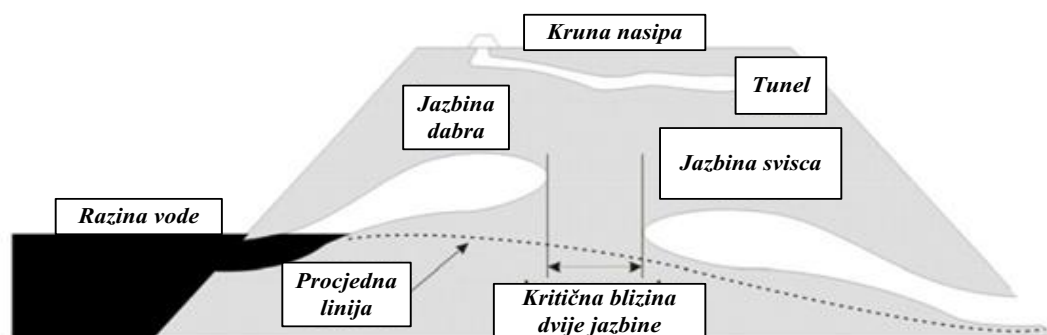
Pri korištenju antene bitno je obratiti pozornost na frekvenciju koja se koristi te na cilj istraživanja. Kada je važnija dubina istraživanja u odnosu na rezoluciju, koriste se antene niže frekvencije: od 50 do 250 MHz. Kako se frekvencija povećava tako se dubina istraživanja smanjuje, ali se zato rezolucija povećava (Reynolds, 2011.).

Tablica 2. Vrijednosti frekvencije GPR antene i pripadne dubine istraživanja i rezolucije (Di Prinzio, 2010.).

Frekvencija MHz	Rezolucija (m)	Dubina istraživanja (m)
50	0,5 – 1	25 – 40
100	0,25 – 0,5	16 – 25
200	0,20 – 0,10	6 – 10
500	0,10 – 0,05	3,5 – 6
800	0,06 – 0,03	1,5 – 2,5

### 3.3.1 Primjena GPR sustava za detekciju šupljina i objekata

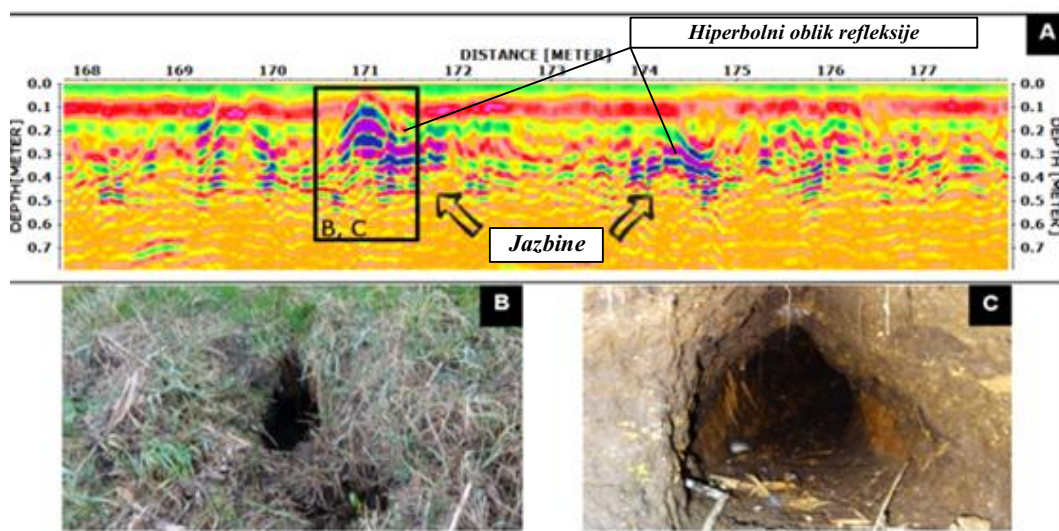
Životinjske nastambe kao strani objekti u tijelu nasipa, značajno utječu na njegovu stabilnost, jer omogućavaju procjeđivanje vode kroz nasip, Slika 21, a to može biti uzrok sloma nasipa (Mazzini i Simoni, 2008.; Ojha, 2003.). Prije svakog istraživanja idealno bi bilo ukloniti vegetaciju i raslinje, jer to može uzrokovati pogrešku u mjerenju (Shields i Gray, 1993.; Hyson, 1985.), a tada postoji mogućnost da neke jazbine i pukotine koje se i nalaze u nasipu ne budu detektirane.



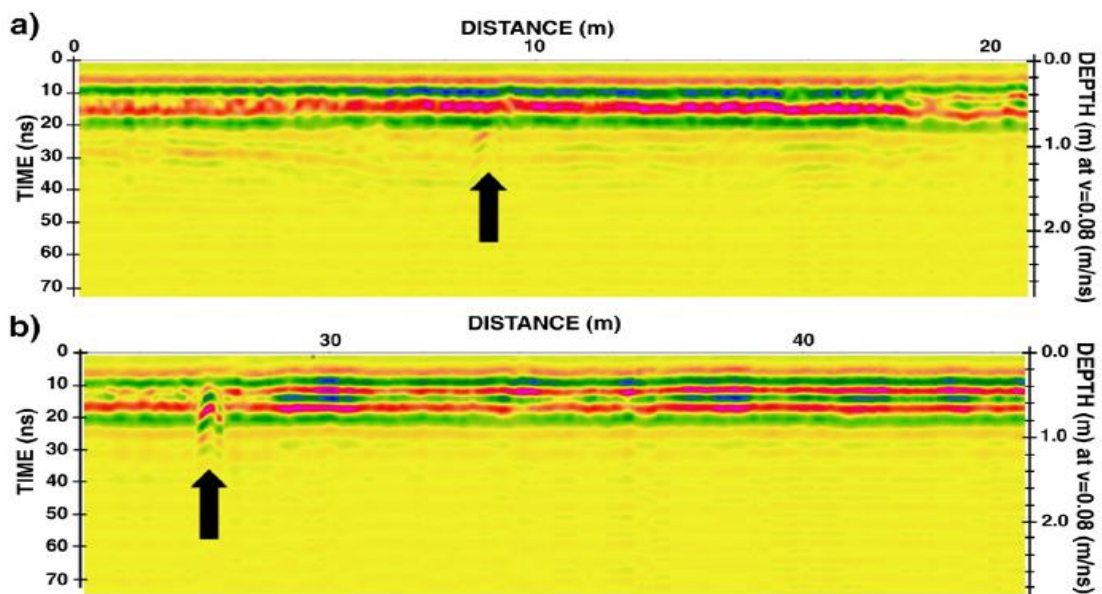
Slika 21. Utjecaj životinjskih jazbina na nasip (FEMA, 2015.).

Na Slici 22. vide se identificirane životinjske jazbine na dubini od 0,4 do 1 m, koje se na radargramu prepoznaju kao hiperbolne refleksije na mjestu šupljine u tijelu nasipa.

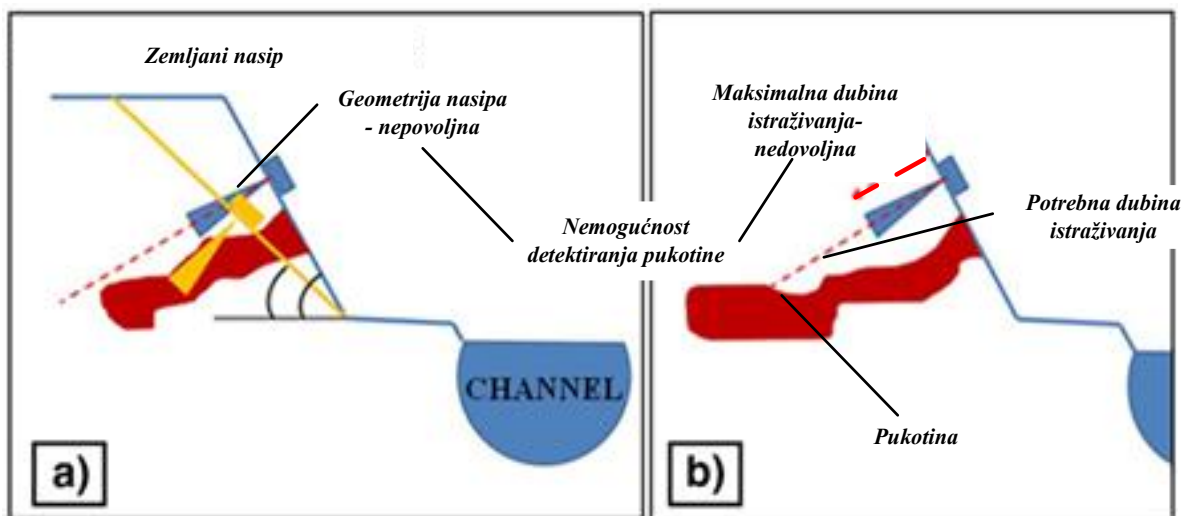
Slika 23. prikazuje detektirane životinjske nastambe, ali kvaliteta rezultata nije sasvim zadovoljavajuća. Razlog je nemogućnost nailaska emitiranog vala na pukotinu u nasipu zbog nedovoljne dubine istraživanja ili (za istraživanje) neodgovarajuće konstrukcije nasipa. Konstrukcija i geometrija nasipa je problem ako se istražuje s pokosa nasipa, gdje su nagib i visina pokosa te položaj pukotine/šupljine u takvom odnosu da odaslani signal ne može doći do pukotine. Zbog navedenih razloga preporuča se GPR istraživanje s krune nasipa ili berme, Slika 24. (Di Prinzio, 2010.).



Slika 22. Životinjske jazbine detektirane u nasipu (Tanajewski, 2016.).

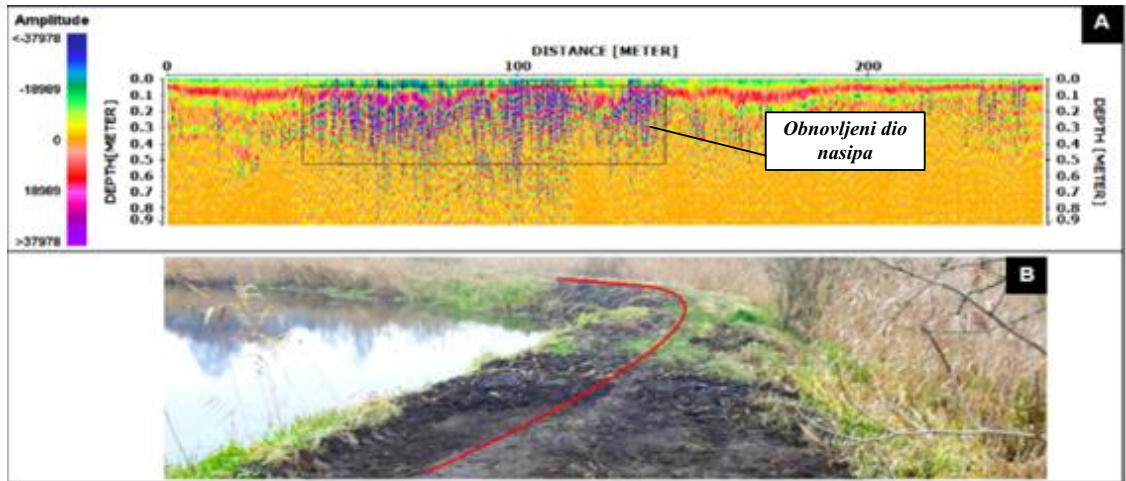


Slika 23. Detekcija životinjskih nastamba pomoću GPR uređaja (Di Prinzio, 2010.).

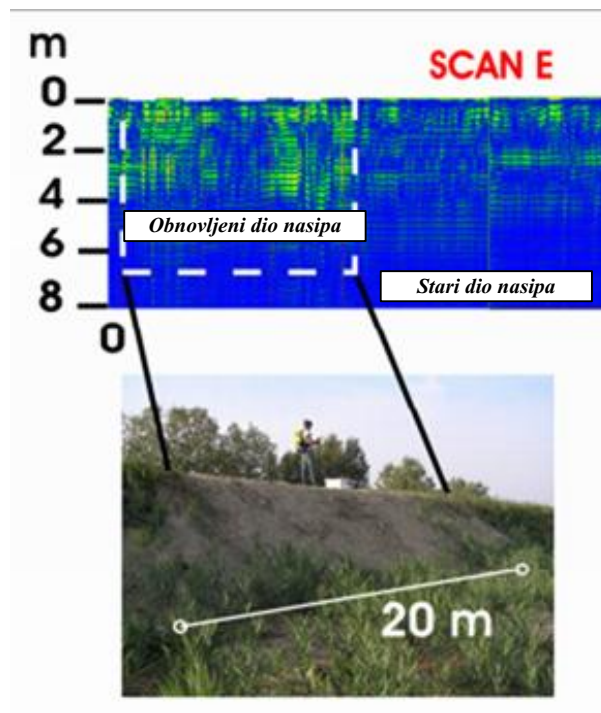


Slika 24. Prikaz neuspješnog mjerenja GPR uređajem zbog nepovoljne geometrije nasipa (Di Prinzio, 2010.).

Obnovljeni ili nadograđeni dio nasipa proizvodi specifične reflekske pa radargram izgleda kao na Slici 25. (Tanajewski, 2016.). Takav slučaj potvrđuje i Biavati (2008.), Slika 26. Dijelovi nasipa koji su novijeg datuma lakše se prepoznaju u odnosu na starije dijelove, jer noviji materijal nije toliko kompaktan i zbijen kao stariji materijal.



Slika 25. Obnovljen dio nasipa (Tanajewski, 2016.).



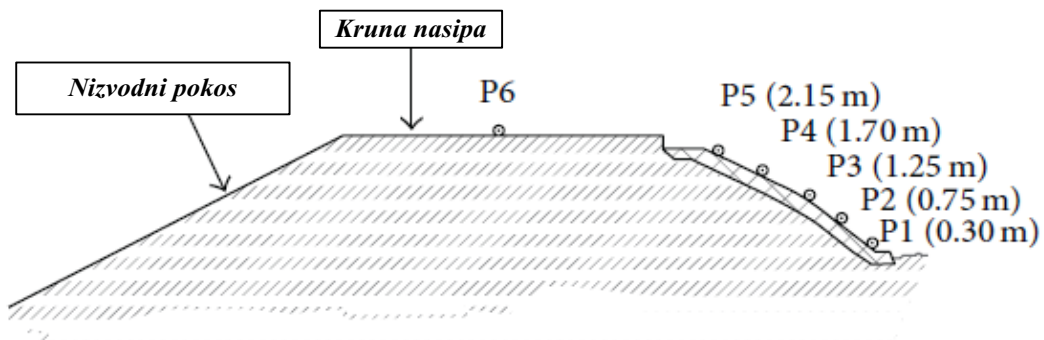
Slike 26. Obnovljen dio nasipa i njegov specifični radargram (Biavati, 2008.).

### 3.3.2 Primjena GPR uređaja da detekciju zona procjeđivanja vode

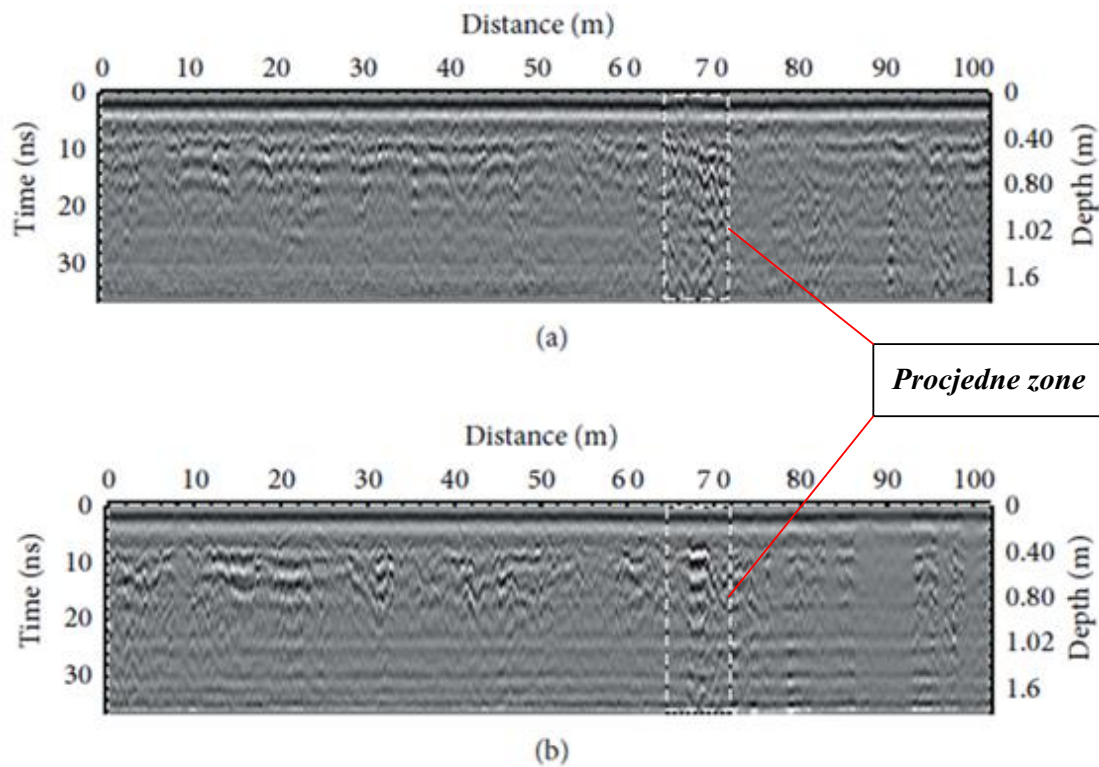
Istraživanje zemljanih nasipa GPR metodom vrlo često znači detektiranje pripovršinske anomalije, budući da uvjeti u nasipu, kao što je povećan udio vode ili glina od koje je nasip građen, ograničavaju dubinu istraživanja koja tada doseže svega par metara ispod krune nasipa. Ali unatoč takvom nedostatku GPR metoda ostaje vrlo efikasan način za provjeru stanja zemljanog nasipa i njegovo održavanje.

Jedan takav nasip, visine između 3 i 7 m istraživao se radi detekcije procjednih zona, Slika 27. (Antonie, 2015.). Korištene su antene od 200 i 400 MHz s dubinom prodiranja signala do 2 m. Pet istraživačkih profila postavljeno je na kosini nasipa i to na visinama od: 0,30 m, 0,75m, 1,25m, 1,70 m i 2,15 m. Tim su redom i označeni kao: P1, P2, P3, P4 i P5. Profil P1 je vrlo sličan profilu P2 pa nije posebno prezentiran. Profil P6 postavljen je po sredini krune nasipa.

Slika 28. pokazuje profile P2 i P3 na visini od 0,75 m i 1,25 m. Oba profila pokazuju snažnu refleksiju na 70-om m. Ista se anomalija također pojavljuje na profilima P1, P4 i P5, a može se interpretirati kao mjesto velike infiltracije vode iz akumulacije u tijelo nasipa. Anomalija je dakle rezultat nastalog oštećenja nasipa na tom dijelu.



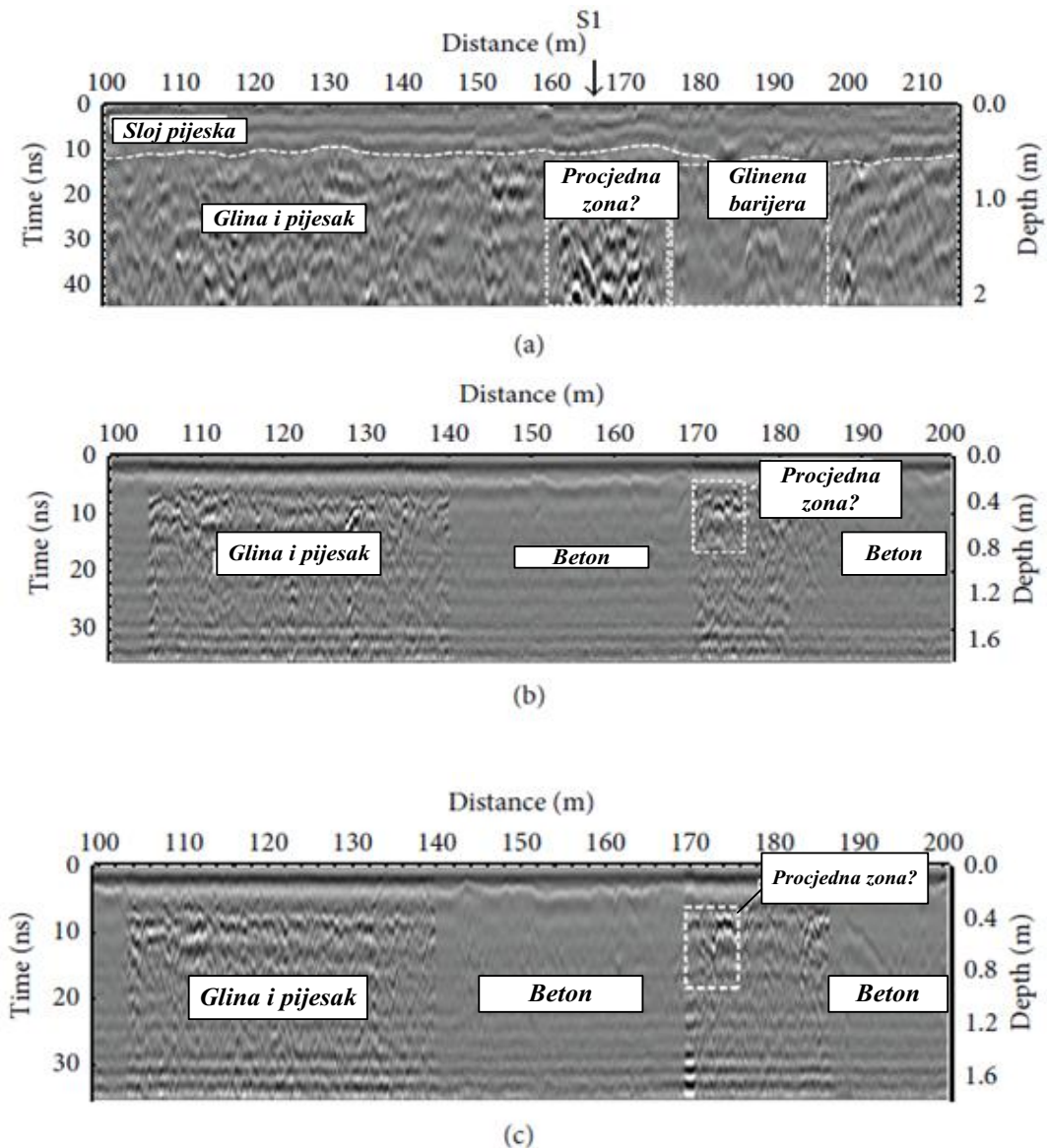
Slika 27. Presjek nasipa i prikaz istraživačkih profila (Antonie, 2015.).



Slika 28. Prikaz potencijalne zone procjeđivanja detektirane na GPR profilima P-2 i P-3 (Antonie, 2015.).

Druga anomalija istraživana je antenom od 200 MHz na kruni nasipa što predstavlja istraživački profil P6. Površinski sloj na tom profilu čine pijesci i muljeviti pijesci. Ispod tog sloja zamijećena je heterogena zona koja se sastoji od mješavine pijeska i šljunka s udjelom gline. Lateralne varijacije signala vidljive su uzduž profila, a ukazuju na promjene u materijalu, odnosno promjene odnosa glina-pijesak-šljunak.

Prigušenje GPR signala dogodilo se između 175. m i 198. m na 70 cm dubine. Prema „razmazanom“ ili „zadebljanom“ obliku/izgledu tragova na radargramu, dogodila se disperzija signala što je tipično za glinovite materijale. Na istom profilu još je jedna heterogena zona zamijećena na 160. i 175. m profila i to na dubini od 60 cm. Ova anomalija nalazi se blizu procjedne zone smještene u podnožju nasipa. Anomalija ukazuje na prostor u kojem se došlo do ispiranja i transporta čestica gline prema nizvodnoj strani nasipa. Slike 29 (b) i (c) predstavljaju profile snimljene antenom od 400 MHz na visini od 1,70 m i 2,15 m što odgovara profilima P4 i P5. Prigušenja signala se događaju između 140. i 170. m te između 190. i 200. m što odgovara dijelovima nasipa koji su naknadno obnovljeni i zaštićeni betonskim zastorom.



Slika 29. a) Profil P-6 antenom od 200 MHz, b) profil P-5 s visine 2, 15 m i antenom 400 MHz, c) profil P-4 s visine 1,70 m i antenom 400 MHz. (Antonie, 2015.).

Heterogene zone između 170. i 176. m koje su registrirane antenom od 400 MHz na profilu P6 također su detektirane antenom od 200 MHz. To upućuje na mogućnost postojanja procjedne zone i na tom području. Kao nedostatak u ovom GPR istraživanju pokazala se pojava prigušenja signala zbog dijelova nasipa izvedenih s udjelom gline te maskiranje signala na mjestima na kojima je postavljen betonski zastor. Mjerenja su izvedena u suhim uvjetima, ali isto tako mogla su se izvoditi u saturiranim uvjetima, budući da je dielektrična konstanta vode vrlo velika (oko 81) pa bi zbog kontrasta dielektričnosti u saturiranim uvjetima detekcija zona procjeđivanja bila uspješnija.



#### 4. Zaključak

Geofizička istraživanja zemljanih nasipa mogu dati konkretne informacije o mehaničkom stanju zemljanih nasipa. Ideja korištenja geofizičkih metoda na zemljanim nasipima jest otkrivanje anomalija i zona nestabilnosti u tijelu nasipa.

Geoelektrična tomografija metodom otpornosti (ERT) je metoda koja omogućava stvaranje slike o raspodijeli geomedija na temelju razlike u otpornosti različitih materijala od kojih su nasipi izgrađeni. Ta metoda daje zadovoljavajuće rezultate u detektiranju područja povećane saturacije vodom. Takvi su dijelovi nasipa izloženi migraciji vode što može značiti da je nasip u opasnosti od pojave erozije. Osim toga, tomografski presjek otpornosti daje dobre procjene o vrstama, debljini i stanju slojeva u tijelu nasipa te geomedija u njegovim temeljima.

Seizmička refrakcija tomografija se temelji na kontrastima seizmičkih brzina i posljedično na razlikama u mehaničkim svojstvima geomedija. Zbog toga je moguće procijeniti područje i dimenzije mehaničke dezintegracije te detektirati različite zone i razine saturacije vodom kao i položaj procjedne linije. Tomografije otpornosti i seizmičkih brzina se u istraživanju zemljanih nasipa koriste kao komplementarne metode.

Georadarskim i istraživanjima pomoću površinskih valova (GPR i MASW) mogu se uspješno otkriti sustavi pukotina, procijeniti položaji i dimenzije šupljina te frakturiranost stijenskih materijala u tijelu i temeljima nasipa. MASW metodom se najčešće određuju brzine posmičnih valova pa se mogu odrediti moduli posmika u gradivnim materijalima nasipa, a na temelju toga se može procijeniti i opće stanje stabilnosti nasipa. Uspješna primjena GPR sustava ovisi i o načinu postavljanja profila na tijelu nasipa, jer nepovoljna geometrija nasipa može uzrokovati pogreške u mjerenjima.

## 5. Literatura

1. Al Fares W. (2014). Application of Electrical Resistivity Tomography Technique for Characterizing Leakage Problem in Abu Baara Earth Dam, Syria. *International Journal of Geophysics*. Volume 2014. Article ID 368128, 9 pages.
2. Antonie, R., Fauchard, C., Fargier, Y., Durand, E. (2015.). „Detection of Leakage Areas in an Earth Embankment from GPR Measurements and Permeability Logging“. *International Journal of Geophysics*. Volume 2015, Article ID 610172, 9 pages.
3. Biavati, G., Ghirotti, M., Mazzini, E., Mori, G., Todini, E. (2008). The use of GPR for the detection of non – homogeneities in the Reno river embankments (north – eastern Italy)
4. Camarero L. P., Moreira C. A. (2017). Geophysical investigation of earth dam using the electrical tomography resistivity tehniqe. *REM - International Engineering Journal*. Vol. 70
5. Carnevale M., Hager J.L., Buller R. (2011). Investigation of source of seeps beneath earthen dam, Central Massachusetts. *Hager GeoScience, Inc., Woburn, MA*.
6. Collins C. Chiemek. (2014.).Investigation of Dam Safety Making Use of Multichannel Analysis of Surface Wave (MASW) Seismic Method
7. Conyers, L.B. and Goodman, D. (1997) Ground Penetrating Radar: A Primer for the Archaeologist, AltaMira Press, USA.
8. De Vries, S., R.A. Verheij, P.P. Groenewegen, and P. Spreeuwenberg (2003), Natural enviroments healthy environments? An exploratory analysis of the relationship between greenspace and health, Environ.
9. Di Prinzio M., Bittelli M., Castellarin A., Pisa P. R. (2010). Application of GPR to the monitoring of river embankments. *Journal of Applied Geophysics*. Vol.71, no. 2-3, pp.53-61.
10. Doocy, S., A. Daniels, S. Murray i T.D. Kirsch (2013), The human impact od floods: a historical review of floods 1980 – 2009 and systemic literature review

11. EMDAT (2019): OFDA/CRED International Disaster Database, Université catholique de Louvain – Brussels – Belgium. Dostupno na: <https://ourworldindata.org/natural-disasters> <11.06.>
12. Farzampour A., Salmasi F., Mansuri B. (2014). Optimum Size For Clay Core of Alavian Earth Dam by Numerical Simulation. *Iranica J. Energy & Environ.* , 5 (3): 240-246.
13. FEMA (2005), Technical manual for dam owners. Impacts of Animals on Earthen Dams, FEMA 473, Federal Emergency Management Agency
14. Flores-Berrones R., Lopez-Acosta N.P., (2011). Internal Erosion Due to Water Flow Through Earth Dams and Earth Structures.
15. Foster, M. A. (1999). *The probability of failure of embankment dams by internal erosion and piping*. PhD Thesis. School of Civil and Environmental Engineering, The University of New South Wales, Sydney.
16. Foster, M.A., Fell, R., and Spannagle, M. (1998). Analysis of Embankment Dam Incidents, UNICIV Report No. R-374, University of New South Wales, Sydney, Australia.
17. Gamal Z. Abdel Aal, Ahmed M. Ismail, Neil L. Anderson, and Estella A. Atekwana, godina, geophysical investigation of seepage from earth fill dam, Washington county, mo. Dept. of Geology and Geophysics, University of Missouri-Rolla, Rolla, MO. 65409 <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.566.2867&rep=rep1&type=pdf>, <30.05.>
18. Gazdek M., Strelec S., Grabar K. (2012). Preliminarni geofizički pokazatelji stanja zemljanih nasipa i barijera. *2nd International Scientific Meeting*.
19. Gazdek M., Strelec S., Golub I., Smrečki D. (2011). Geofizička istraživanja lokacije buduće zapornice na otoku kanala br. 2 u Rašu, Most Raša, Istra
20. Hynson, J.R., Adamus, P.R., Elmer, J.O., DeWan, T., Shields, F.D., 1985. Environmental Features for Streamside Levee Projects. *U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS. Technical Report E-85-7*
21. Features for Streamside Levee Projects. U.S. Army Corps of Engineers Waterways

Experiment Station, Vicksburg, MS. Technical Report E-85-7.

22. Ivšić T. Nastavni materijal za kolegij nasipi i brane. Građevinski fakultet Zagreb, ak. god. 2011./2012.

23. Lelio H. M., And M. D. Ethan, “Analysis of Seismic Response of Seven Oaks Dam“, SMIP07 Seminar Proceedings, URS Corporation Oakland, California, 2007, pp. 33.

24. Loke, M. H., 2000. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: A practical guide to 2-D and 3-D surveys

25. Loke, M. H., 2004. Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys, 2004 Revised Edition.

26. Lutz, K., Fechner, T., Schevenels, M., Francois, S., Degrande, G. (2011). Geotechnical characterization of a river dyke by surface waves

27. Manheim, F. T., Krantz, D. E., Bratton, J. F.: Studying ground water under DELMARVA costal bays using geoelectrical resistivity, *Ground Water*, 42, 2004., pp. 1052-1068

28. Mazzini, E., Simoni, G., 2008. Relazione Descrittiva: Evento di Piena del 20 maggio 2008 del Torrente Samoggia. Regione Emilia-Romagna —Servizio Tecnico Bacino Reno (in Italian).

29. Morey, R.M. (1998), Ground Penetrating Radar for Evaluating Subsurface Conditions for Transportation Facilities, NCHRP Synthesis 255, Transportation Research Board, National Research Council, National Academy Press, Washington.

30. Ojha, C.S.P., Singh, V.P., Adrian, D.D., 2003. Determination of critical head in soil piping. *J. Hydraul. Eng.* 129 (7), 511–518.

31. Oyeyemi K.D., Aizebeokhai A. P., Oladunjoye M. A. (2015). Integrated Geophysical and Geochemical Investigation of Saline Water Intrusion In a Costal Alluvial Terrain, Southwestern Nigeria. *International Journal of Applied Environmental Sciences*. Volume 10, Number 4 (2015), pp. 1275-1288.

32. Rana S., „Integrated Geophysical Approach For Dam Site Investigation & Dam Health Checks & Monitoring“, 2014.

33. Rana S., (2015). Non-destructive techniques for inspecting dams (concrete, masonry, earthen) and spillways. Parsan geophysics.
34. Reynolds J.M. (1997). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. John Wiley and Sons, Chichester.
35. Reynolds J.M. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Second edition. John Wiley and Sons, Chichester.
36. Reinhart V. R., Parekh L. M., Rittgers B. J., Mooney A. M., Revill A. (2012). Preliminary Implementation of Geophysical Techniques to Monitor Embankment Dam Filter Cracking at the Laboratory Scale. *Rinehart, Parekh, Rittgers, Mooney, & Revil*.
37. Richart F. E., J. R. Hall, and R. D. Woods, "Vibrations of Soils and Foundations": Prentice – Hall, Inc 1970.
38. Roje – Bonacci T., (2015) *Nasute građevine*. Split: Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije.
39. Schmertmann, J. H. (2000). "The No-Filter Factor of Safety against Piping Through Sands," Geotechnical Special Publication No. 11 Judgement and Innovation, The Heritage and Future of the Geotechnical Engineering Profession, pp. 65-132.
40. Schoen J.H. (2004). *Physical Properties of Rocks: Fundamentals and Principles of Petrophysics*. Elsevier Ltd. Oxford, UK.
41. Shields Jr., F.D., Gray, D.H., 1993. Effects of woody vegetation on sandy levee integrity. *Water. Resour. Bull.* 28 (5), 917–931.
42. Sjødahl P., Dahlin T., Johansson S. (2010). Using the resistivity method for leakage in a blind test at the Rossvatn embankment dam test facility in Norway. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*.
43. Swarzenski P. W., Burnett W. C., Greenwood W. J., Herut B., Peterson R., Dimova N., Shalem Y., Yechieli Y., Weinstein Y. (2006). Combined time-series resistivity and geochemical tracer techniques to examine submarine groundwater discharge at Dor Beach, Israel, *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, L24405, pp. 1-6.
44. Šimundić N., Babić M. (2016) *Zaštita od štetnog djelovanja voda u Hrvatskoj*. Hrvatska vodoprivreda. 216, 33 – 38.

45. Tanajewski D., Bakula M. (2016). Application of Ground Penetrating Radar Surveys and GPS Surveys for Monitoring the Condition Levees and Dykes, August 2016, Volume 64, Issue 4, pp 1093–1111

46. Wikipedia. (10.06.2019). *List of floods*. Dostupno na:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_floods](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_floods) <12.06.>

## 6. Popis slika

Slika 1. Pojava erozije u nasipu (Foster, 1999.).

Slika 2. Klizna ploha na nasipu

Slika 3. Preljevanje vode preko nasipa

Slika 4. Kolaps nasipa zbog narušene stabilnosti

Slika 5. Prikaz ERT istraživačkih profila kojima su detektirane anomalije unutar nasipa (Gamal et al., 2104.).

Slika 6. Rezultati geoelektrične tomografije na istočnoj strane nasipa (Gamal et al., 2014.).

Slika 7. Rezultati geoelektrične tomografije istraživanja zapadne strane nasipa (Gamal et al., 2014.).

Slika 8. Geoelektrični profil nasipa Abu Baara, profil ERT P-1 (Al Fares, 2014.).

Slika 9. Geoelektrični profil nasipa Abu Baara, profil ERT P-2 (Al Fares, 2014.).

Slika 10. Uslojenost tla nasipa Abu Baar (Al Fares, 2014.).

Slika 11. Prikaz istraživanja nasipa u kojem su otkrivene 3 zone niske otpornosti (Camarero, 2017.).

Slika 12. 3D prikaz nasipa sa slike 11. Jasnije se uočavaju veličina i položaj zona nestabilnosti (Camarero, 2017.).

Slika 13. Geoelektrični profil „Sv. Martin – nasip, Profil 1“

Slika 14. Geoelektrični profil „Sv. Martin – nasip, Profil 2“

Slika 15. Rezultati dobiveni Wennerovim a) i dipolnim rasporedom elektroda (Oyeyemi, 2015.).

Slika 16. Geoelektrična tomografska slika interpretirane otpornosti za pojedine vrste geomedija. Lijeva obala kanala (Gazdek, 2012.).

Slika 17. Geoelektrična tomografska slika interpretirane otpornosti za pojedine vrste geomedija. Desna obala kanala (Gazdek, 2012.).

Slika 18. Rezultati seizmičke refrakcije (Rana, 2015.).

Slika 19. Prikaz promjene brzine Vs valova s dubinom (Collins, 2014.).

Slika 20. Profil koji pokazuje zone male brzine VS u tijelu nasipa (Lutz, 20.).

Slika 21. Utjecaj životinjskih jazbina na nasip (FEMA, 2015.).

Slika 22. Životinjske jazbine detektirane u nasipu (Tanajewski, 2016.).

Slika 23. Detekcija životinjskih nastamba pomoću GPR uređaja (Di Prinzio, 2010.).

Slika 24. Prikaz neuspješnog mjerenja GPR uređajem zbog nepovoljne geometrije nasipa (Di Prinzio, 2010.).

Slika 25. Obnovljen dio nasipa (Tanajewski, 2016.).

Slike 26. Obnovljen dio nasipa i njegov specifični radagram (Biavati, 2008.).

Slika 27. Presjek nasipa i prikaz istraživačkih profila (Antonie, 2015.).

Slika 28. Prikaz potencijalne zone procjeđivanja detektirane na GPR profilima P-2 i P-3 (Antonie, 2015.).

Slika 29. a) Profil P-6 antenom od 200 MHz, b) profil P-5 s visine 2, 15 m i antenom 400 MHz, c) profil P-4 s visine 1,70 m i antenom 400 MHz. (Antonie, 2015.).



## **7. Popis tablica**

Tablice 1. Vrijednosti elektromagnetskih svojstava nekih medija u nasipu pri frekvenciji antene od 100 MHz (Morey, 1998.).

Tablica 2. Vrijednosti frekvencije GPR antene i pripadne dubine istraživanja i rezolucije (Di Prinzio, 2010.).