

GEOFIZIČKO - GEOTEHNIČKO ISTRAŽIVANJE ODLAGALIŠTA OTPADA

GEOPHYSICAL - GEOTECHNICAL LANDFILL SITE INVESTIGATIONS

Stjepan Strelec¹, Kristijan Grabar², Mario Gazdek¹, Miljenko Špiranec², Davor Stanko¹, Jasmin Jug¹

¹ Geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, HR-42000 Varaždin, HRVATSKA, stjepan.strelec@gmail.com, mario.gazdek@gmail.com, stankodavor@gmail.com, jasmin.jug@gmail.com

² SPP d.o.o., Trstenjakova 3, HR-42000 Varaždin, HRVATSKA, kgrabar@inet.hr, spiranec@spp.hr

Sažetak: Prilikom izrade tehničkih podloga i definiranja parametara za projektiranje i sanaciju odlagališta otpada kao nasute građevine, koriste se dugotrajna, skupa i relativno ograničena istražna bušenja koja daju podatke točkastog formata s vrlo problematičnim uzorkovanjem intaktnog uzorka. Deformabilnost odlagališta otpada ključna je za održanje mehaničke otpornosti samog tijela stoga su osnovni problem odlagališta otpada fizikalno - mehanička svojstva komunalnog otpada u ovisnosti o sastavu, obujam i gustoća tijela odlagališta te vlaga i starost odloženog materijala koja određuju veličinu ukupnog slijeganja.

U ovom radu prikazani su rezultati geofizičko – geotehničkog istraživanja odlagališta otpada primjenom geofizičkih metoda spektralne analize površinskih valova – MASW, seizmičke refrakcije – RF, 2D geoelektrične tomografije – ERT, georadara – GPR, mjerenja mikroseizmičkog nemira – HVSR, te insitu ispitivanja dinamičkog penetracijskog pokusa – DPH. MASW i seizmička refrakcija omogućuju profiliranje slojeva odlagališta, određivanje dubina stijena, te elastičnih svojstava tla (krutost otpada), dok 2D električna tomografija i GPR daju profil terena po dubini i koriste se za istraživanja razina podzemne vode, kontaktnih ploha tijela odlagališta i vodonosnih slojeva, mogućeg potencijala širenja onečišćenja u vodonosne slojeve te za utvrđivanje glinovitih barijera.

Dubine i debljine slojeva određene geofizičkim metodama koreliraju se s podacima istražnih bušenja i penetracijskih ispitivanja. Također se mogu definirati inženjerskogeološka svojstva podloge i mehanička svojstva iznimno deformabilnih i heterogenih dijelova odlagališta, te procijeniti volumen odloženog otpadnog materijala.

Ključne riječi: Odlagalište, komunalni otpad, MASW, ERT, DPH

Abstract: Within the process of landfill design and defining design parameters for the construction of new, or for the old landfill remediation, long-term, expensive and relatively restricted borehole drilling is implemented. Borehole investigations give point like data with very difficult soil sampling in waste material. Deformability of waste material is crucial for the mechanical bearing resistance of the landfill. A physical-mechanical property of the landfill material depends on waste material composition, volume and density, as well as moist and landfill age that sets the rate of the total settlement.

Paper presents results of geophysical-geotechnical investigations on the landfill by utilizing geophysical methods: Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW), Seismic Refraction (RF), 2D Geoelectrical Tomography (ERT), Ground Penetrating Radar (GPR) and geotechnical in-situ investigation by Dynamic Probe Heavy (DPH). MASW and Seismic Refraction results in detecting layering lithology, depth of the soil mass and elastic properties (stiffness), while Geoelectrical tomography and GPR results in fine spatial profiling of the landfill body, as well as potential aquifer contamination and clay lining system detection.

Depth and thickness of layers determined by geophysical investigations are correlated with data from the prior documented borehole drilling as well the dynamic penetration which enables to determine dynamic characteristics of landfill material and settlement rate. Engineering-geology properties of the bedrock can also be defined from the geophysical investigations, as well as estimation of the total volume of the waste material.

Keywords: Landfill, Municipal solid waste, MASW, ERT, DPH

Zaprimljeno / Received: 30.09.2014 / Prihvaćeno / Accepted: 19.10.2014

Stručni rad / Technical paper

1. UVOD

Rad analizira rezultate primijenjene grupe geofizičkih istraživanja u svrhu određivanja fizikalno-mehaničkih svojstava tijela saniranog odlagališta otpada u Knegincu Gornjem (Đorđević, 2002), korelirajući ih s rezultatima invazivnog geotehničkog sondiranja mjerenjem dinamičkog otpora prodiranju šiljka (DPH). Grupa geofizičkih istraživanja u ovom radu implementirana je na odlagalištu komunalnog otpada Kneginec. Na predmetnom odlagalištu odložen je neobrađeni komunalni otpad, no primijenje-

na istraživanja nisu ograničena na pojedinu vrstu odlagališta, a dobivena saznanja potrebno je verificirati i za druge vrste odlagališta. Strategije prostornog uređenja i strategije gospodarenja otpadom baziraju se prvenstveno na inicijalnom efikasnom reduciranju otpadne materije. Primarno izbjegavanje nastajanja otpada postiže se odvojenim prikupljanjem, zatim odabirom predobrade i konačne obrade otpada kao kompulsorne mjere za smanjenje volumena otpada, Council Directive 99/31/EC" (1999). Prvenstveno se to odnosi na učinkovito smanjenja udjela biorazgradivog otpada koji u kućnom otpadu iznosi i do

40%. Činjenica je da odlagališta, iako planiramo odlagati sve manje, do predvidljive budućnosti ostaju kao građevine koje je potrebno graditi i održavati uz sve složenije tehničke uvjete, odnosno pratiti stare i sanirati neodgovarajuće.

Opseg primjenjivih istraživanja na suvremenim odlagalištima ograničen je na neinvazivne metode s površine odlagališta. Rad je na tragu razrade sustava, odnosno uvođenja standardne procedure geofizičkih istraživanja primjenjivih na svim vrstama odlagališta i u raznim fazama izgradnje. Također, svrha provedenih istraživanja je uspostava referentnih vrijednosti kao i interpretacijskih modela karakterističnih za odlagališta. Provedena mjere-

- integracija geofizičkih metoda istraživanja u projektnoj i izvršnoj fazi građenja,
- korištenje geofizike za određivanje projektnih parametara,
- mogućnosti geofizike u određivanju prostornog rasprostiranja tijela odlagališta.

Računska analiza slijeganja temeljnog tla predstavlja standardni geotehnički zadatak. Zbog toga će se u daljnjem tekstu detaljno razmotriti samo problematika mogućeg istraživanja stanja otpadnog materijala kao i određivanje parametara dostupnim geofizičkim neinvazivnim istraživanjima.



nja služe kao smjernice projektantima i investitorima o primjeni geofizičkih istraživanja na odlagalištima, i to:

Slika 1. Situacijski plan istraživanja na odlagalištu otpada Knežinec Gornji. Geofizička istraživanja organizirana su položajno u jedinstveni profil, a dinamička sonda DPH-1 nalazi se u središtu geofizičkog profila.

2. ISTRAŽNA LOKACIJA

Predmetna istraživanja provedena su na saniranom odlagalištu otpada u Gornjem Knegincu. Odlagalište je nastalo kao divlja deponija na koju je odložen raznovrsni otpad od 70.-tih godina prošlog stoljeća bez kontrole i uvida u vrste i količine odloženog materijala (Đorđević, 2002). Prostor je nastao kao napušteni glinokop obližnje tvornice cigle u čije je depresije divlje odlagan otpad. Tijelo odlagališta je vrlo razvedeno s promjenjivom debljinom odloženog materijala. Osim komunalnog otpada ovdje je odložen i industrijski otpad, a prema rezultatima kompozitnih uzoraka i medicinski otpad (Đorđević, 2002). Odlagalište se nalazi na rubu aluvijalnog bazena Dravske potoline gdje plitka krovina glina isklinjava na sedimentu šljunka, te je tijelo odlagališta u sjevernom dijelu u izravnom kontaktu sa vodonosnim šljunkom aluvijalnog bazena.

Na odlagalištu je završena sanacija, a prostor je organiziran u odlagališne kazete. Za istraživanja je odabrana 2. odlagališna kazeta (B2) u koju je za vrijeme trajanja sanacije odlagan i novi otpadni materijal. Slika 1. prikazuje lokaciju dviju saniranih kazeta, te položaj geofizičkih profila na prostoru 2. kazete. Istražni prostor je odabran temeljem dostupnih podataka prethodnih istraživanja provedenih za potrebe izrada studija procjena utjecaja na okoliš, odnosno nekoliko projekata sanacije. Dostupni podaci za usporedbe se sastoje od sondažnih bušotina izvedenih prije sanacije odlagališta, električnog sondiranja (VES), seizmoloških mjerenja mikroseizmičkog nemira, mjerenih razina podzemne vode (RPV), te analize kompozitnih uzoraka sastava otpada. Svi ovi podaci usporedivi su sa rezultatima istraživanja provedenim u ovom radu.

3. GEOTEHNIČKE ZNAČAJKE KOMUNALNOG OTPADA

Odlagalište komunalnog otpada predstavlja posebnu vrstu nasute građevine za koju je u skladu s odredbama Zakona o gradnji potrebno dokazati mehaničku otpornost i stabilnost. Dakle, kao posljedica deformabilnosti sastavnih dijelova odlagališta dolazi do pojave slijeganja odnosno diferencijalnih slijeganja tijela odlagališta. Tijekom rada odlagališta uslijed prevelikih diferencijalnih slijeganja može doći do pojave pukotina u brtvnim slojevima što izravno utječe na njihovu osnovnu funkciju. Osim toga, uslijed slijeganja tijela odlagališta učestalo dolazi do poremećaja funkcioniranja drenažnog sustava, ali i stabilnosti uređenih pokosa.

Promatrajući prosječan sastav komunalnog otpada, može se uočiti da u početku odlaganja u volumskom smislu prevladavaju upravo organski sastojci skloni raspadanju u odnosu na ostale sastojke otpada. Odrediti sastav otpadnog materijala nije jednostavno ne postoji standardizirana tehnička klasifikacija takvoga materijala. Prisutnost fluida modificira svojstva čvrstih materijala uzrokujući različita reološka ponašanja. Postoji i granični uvjet koji odgovara maksimalnoj količini tekućine koji materijal može apsorbirati prije nego se formira procjedna tekućina (Edgers et al., 1992; Sowers, 1968).

Otpad sa odlagališta otpada u Knegincu Gornjem ispitivan je na četiri kompozitna uzorka za potrebe studije utjecaja na okoliš 2002. godine, a utvrđeni je sjedeći sastav: - prema granulometrijskom sastavu otpada prevladavaju krupnije frakcije (veće od 2 mm), dok je udio sitnice otpada (manje od 2 mm) od 11-23%. U krupnoj frakciji prevladava cigla, kamen i plastika, zatim papir i drvo, a manje su zastupljena guma, staklo i metal. Sitnica je ilovaste strukture, s udjelom gline 28-33%u plićim slojevima odloženog materijala. Sadržaj pepela u uzorcima u izravnoj je vezi sa sadržajem organske materije i varira u rasponu od 74 - 85%. U smeću se pored organskog ugljika pojavljuje i anorganski ugljik najvjerojatnije vezan u obliku karbonata. Sadržaj specifične organske tvari humusa varira u širokom rasponu od 3,5 - 26% što potvrđuje heterogenost izvornog materijala iz kojeg je humus nastao.

4. DINAMIČKO SONDIRANJE

Dinamičko sondiranje je u geotehničkom istraživanju prisutno od samog početka u cijelom svijetu, vjerojatno je najstariji i najjednostavniji oblik ispitivanje tla (Butcher et al., 1996). U osnovi se sastoji od zabijanja metalnog vrha u tlo koristeći padajući uteg poznate mase i visine pada. Do današnjeg vremena dinamičko sondiranje je dodatno unaprijeđeno, te je postalo dijelom niza suvremenih geotehničkih standarda. Kontinuirano dinamičko sondiranje na odlagalištu provedeno je sukladno normi HRN EN ISO 22476-2, 2008; HRN EN ISO 22476-2:2005/A1:2011, za tešku udarnu sondu (DPH -Dynamic Probing Heavy) koja osim broja udaraca potrebnih za penetraciju šiljka bilježi i momente rotacije za svladavanje sila koje pridržavaju udarne šipke u tlu iznad konusa. Moment torzijskog otpora šipki bilježi se na kraju svakog intervala, odnosno za dužinu šipke 1,0 m, a svrha mu je razlikovanje otpora penetraciji konusu od otpora koji se pojavljuju prilikom prolaska udarnih šipki kroz tlo. Rezultat sondiranja je izmjereni dinamički otpor prodiranja sonde R_d i dobiva se iz izraza (1):

$$R_d = \frac{g}{A} \cdot \left[\left(\frac{M^2}{M + M'} \right) \cdot \frac{h}{0.1} \cdot N_{10} + (M + M') \right] - \frac{T}{A \cdot r} \quad (1)$$

gdje su :

- R_d – otpor tla prodiranju sonde
- M - masa utega (50 kg)
- M' – masa sonde, šipki (4.8 kg)
- h – visina pada utega (50 cm)
- N_{10} – broj udaraca potrebnih za penetraciju sonde od 10 cm
- T – torzijski moment potreban za rotaciju šipke
- r – radijus šipki (32 mm)
- A – površine sonde (15 cm²)

Na Slici 2. prikazan je rezultat dinamičke sonde izvedene na odlagalištu otpada. Izmjereni dinamički otpor R_d je u funkciji izmjerenih torzijskih momenata T , čime se ostvaruje realnija slika o otporima izmjerenim na samom šiljku.

Na osnovi dobivene vrijednosti otpora (R_d) mogu se odrediti i ostali parametri otpada (Cope, 2011):

- nedrenirana čvrstoća:

$$c_u = R_d / 22 \quad (2)$$

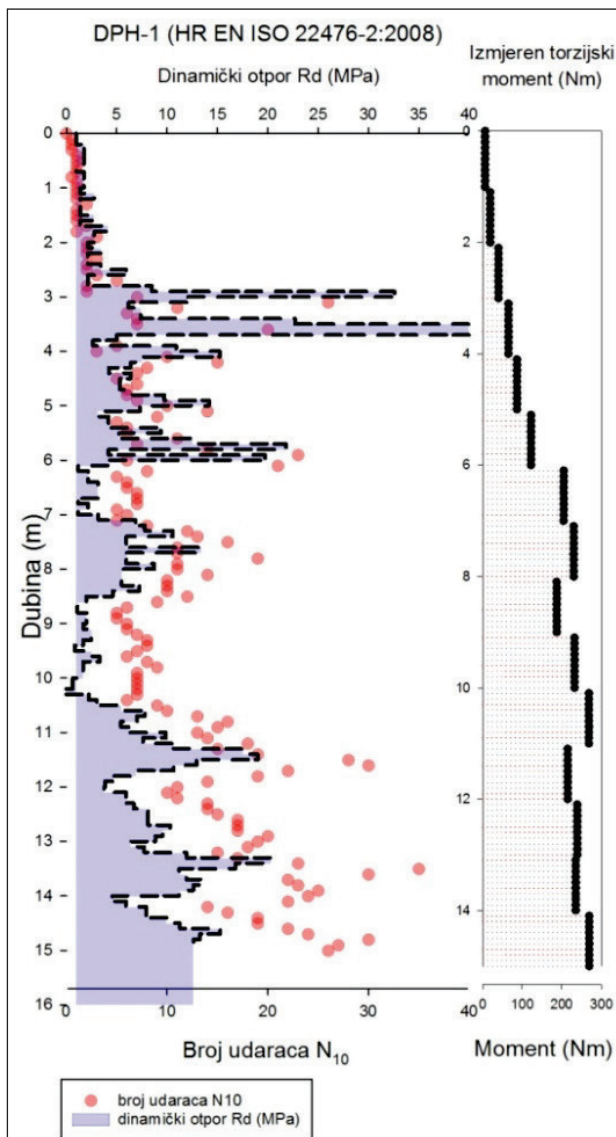
- broj udaraca standardnog penetracijskog testa:

$$(N_1)_{60} \approx 2.4 \cdot R_d \quad (3)$$

- indeks relativne zbijenosti [23]:

$$D_R = 100 \cdot \sqrt{(N_1)_{60} / 60} \quad (4)$$

U nekoherentnom zrnatom tlu, broj udaraca za penetraciju šiljka manji je ispod razine podzemne vode i to posebno u uvjetima s izmjerenim malim brojem udaraca. Iz tog razloga sukladno Normi HRN EN ISO 22476-2, 2008 provodi se korekcija za RPV u nevezanom tlu.



Slika 2. DPH, dinamički otpor korigiran za izmjerene torzijske momente na udarnim šipkama.

5. PRIMIJENJENA GEOFIZIČKA ISTRAŽIVANJA

Kada razmatramo prednosti geofizičkih metoda u istraživanju geotehničkih materijala, naspram konvencionalnom geotehničkom istraživanju, osim stalne potrebe za prikupljanjem što većeg broja podataka, potrebno je uzeti u obzir i značajne uštede vremena i ekonomskih resursa. Navedeno proizlazi iz činjenice da je geofizička oprema jeftinija, a provedena istraživanja su brža i jednostavnija. Da bi neka geofizička metoda bila primjenjiva, mora postojati promjena fizikalnog svojstva na kojeg je metoda osjetljiva, a veličina promjene uvjetuje i opseg primjene (McDowell et al., 2002). Iako većina geofizičkih metoda traži kompleksnu metodologiju i napredne matematičke algoritme interpretacije, dio informacija moguće je procijeniti na samoj lokaciji. Za detaljne interpretacije prikupljenih podataka potrebno je znanje i iskustvo iz razloga što pojedini rezultati ne moraju obavezno ukazivati na specifične karakteristike istraživane geomedija (Kovačević et al., 2013).

6. GEOELEKTRIČNA TOMOGRAFIJA

Mjerenjem električne otpornosti mogu se razlučiti granice promjene materijala i stanja uvjeta u tlu ili tijelu odlagališta. Izmjerene vrijednosti, uključujući identificirane promjene, predstavljaju osnovu za zaključke o strukturi i sastavu. Otpornost je vrlo važno svojstvo tla, stijene ili otpada, a ovisi o sadržaju vode te o količini i vrsti u njoj otopljenih tvari. Zbog različitog stupnja poroznosti geomedija i saturiranosti vodom, taj se otpor može mijenjati u širokim granicama. Do 90.ih godina prošlog stoljeća korištene električne metode davale su jednodimenzionalne rezultate u obliku vertikalnog sondiranja. Kasnije su razvijene 2D i 3D metode električne tomografije (Loke et al., 1996), koje su danas prihvaćene kao standard za profiliranje mjerenjem električnih otpornosti. Iz ekonomskih razloga i jednostavnije primjene 2D električna tomografija (ERT) još uvijek je najčešće primjenjivani oblik.

Za električno profiliranje na odlagalištu Kneginec primijenjen je Wennerov elektrodni raspored kod kojeg se koriste dvije strujne elektrode (C1 i C2) i dvije potencijalne elektrode (P1 i P2) smještene na pravcu i centrirane na nekoj lokaciji. Elektrode se postavljaju u ravnoj liniji profila, tako da se zabodu sve 24 elektrode (24, 48 ili više), a preklopnik geoelektričnog uređaja za mjerenje automatizirano prebacuje raspored strujnih i potencijalnih elektroda. Mjeri se jakost struje između strujnih elektroda pa se iz razlike potencijala između potencijalnih elektroda, pomoću konstante geometrijskih odnosa elektroda (za Wenner PRF – $K=2\pi CC/3$), određuje prividna otpornost. Interpretacijom se određuju debljine i specifični električni otpor pojedinih geoelektričnih sredina.

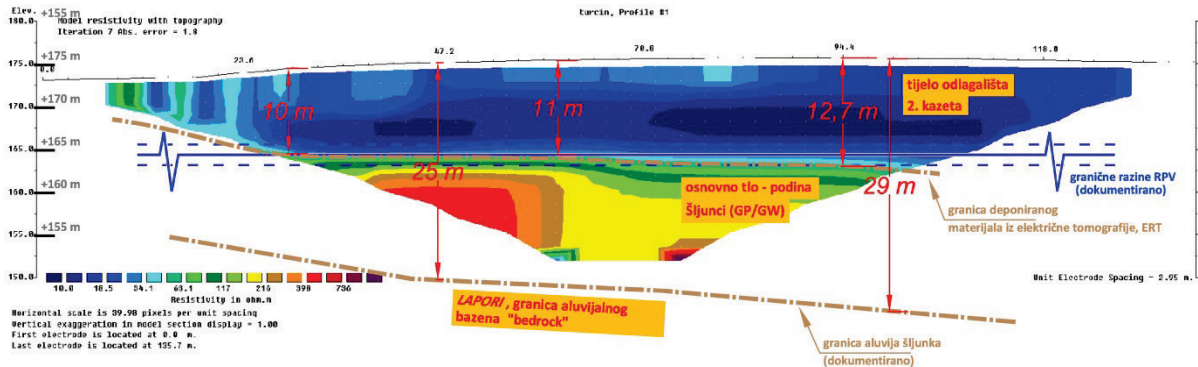
Interpretirani rezultati prikazuju se kao grafički prikaz profila otpornosti sa dubinom. Na Slici 3. prikazana je interpretacija snimljenog geoelektričnog profila. Trapezasti oblik grafičkog prikaza, u kojem se sa udaljenošću od središta profila smanjuje dubina interpretacije, posljedica je postepenog smanjivanja broja prikupljenih podataka kako se razmak strujnih i potencijalnih elektroda

povećava. Ako su potrebni i ovi rubni podaci, kompletan profil se može preseliti duž pravca istraživanja, te se grafički prikazi nastavljaju jedan na drugi.

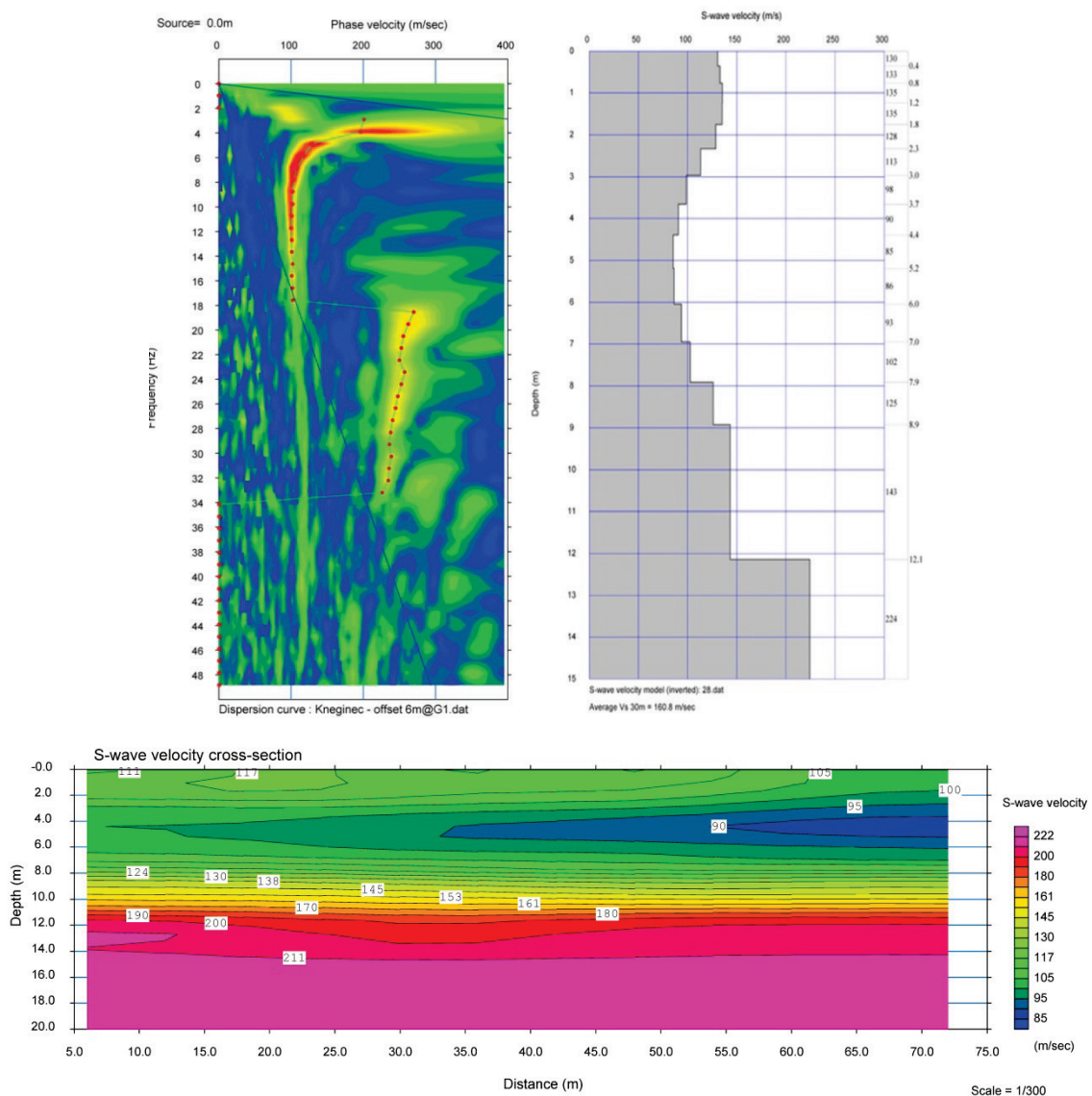
Geoelektrična tomografija sve se više koristi kao metoda za istraživanje složenih geoelektričnih sredina (zone kompleksne geologije ili odlagališta).

Tablica 1. Kategorije materijala prema električnim otpornostima.

ELEKTRIČNA OTPORNOST	KLASIFIKACIJA MATERIJALA
15 - 30 Ω m	Odlagališni materijal
120 - 400 Ω m	aluvijalni šljunci



Slika 3. Profil električne tomografije, ERT-1 – odlagalište otpada Kneginec Gornji.



Slika 4. Brzine posmičnih valova na odlagalištu Kneginec dobivene MASW metodom.

7. SEIZMIČKE METODE

Mehaničko ponašanje materijala ovisno je o veličini deformacija. Seizmičke metode u geofizici određuju parametre materijala pri malim posmičnim deformacijama ($\gamma_s < 10^{-5}$). Posmični modul se pri tim deformacijama često naziva dinamički modul posmika (Gdyn ili Gmax) (Puech et al., 2010). Razvoj seizmičkih metoda posljednjih desetljeća, osobito višekanalne analize površinskih valova (MASW - Multichannel Analysis of Surface Waves omogućava određivanje brzine posmičnih valova podpovršinskih materijala (Foti, 2000; Park et al., 1999).

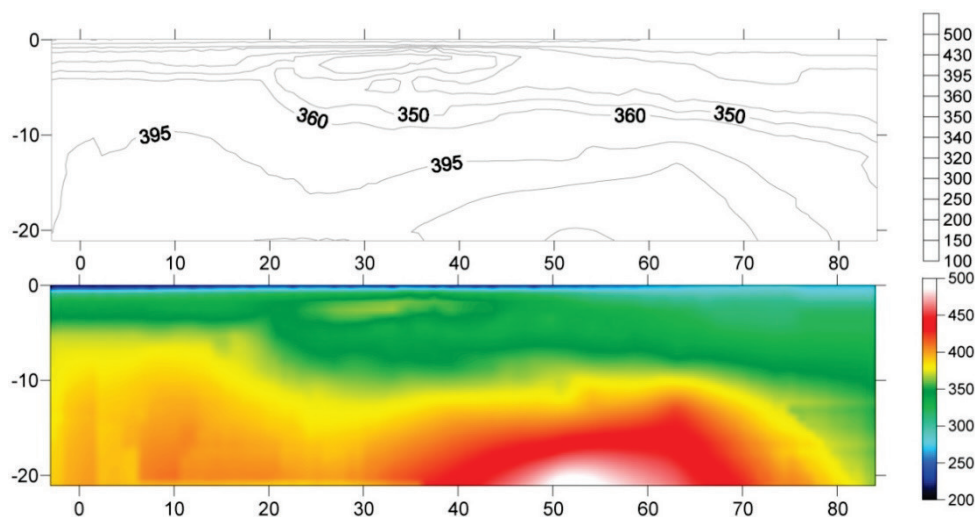
U ovome istraživanju, za procjenu dinamičkih svojstava materijala u tijelu odlagališta, preko brzine posmičnih seizmičkih valova (V_s), korištena je MASW metoda. Kako bi se pokrio širi spektar seizmičkih geofizičkih metoda provedeno je i istraživanje plitkom refrakcijskom seizmikom (RF).

Na Slici 4. prikazan je model materijala u tijelu odlagališta na temelju interpretiranih vrijednosti brzina širenja posmičnih seizmičkih valova po dubini. Promjena i dis-

tribucija brzina je iz rezultata inverzije snimljene krivulje disperzije MASW metodom.

Osim 1D interpretiran je i 2D profil na kojem se vide lateralne promjene unutar odlagališta. Nešto veća brzina V_s zamjetna je prema rubu odlagališne kazete $V_s=90-105$ m/s, dok u pravcu središta kazete brzine u tijelu odlagališta iznose $V_s=85-95$ m/s. Za dani seizmički presjek brzina širenja posmičnih valova, očekuje se intenzivnije slijeganje središnjeg dijela kazete, zbog čega se može pojaviti problem odvodnje oborinskih voda s pokrovnog sloja odlagališne kazete. Podina odlagališta jasno je indicirana s brzinama S valova $V_s=180-220$ m/s.

Kompresijski P valovi snimljeni refrakcijskom tomografijom prikazani su na Slici 5. Također je identificirana visina odlagališne kazete koja iznosi oko 10 m, s refraktorom u podini koji ima brzine $V_p > 360$ m/s. Rubni uvjeti čvršćeg materijala na granici kazete predstavljaju neku vrstu refraktora, te je identificirana debljina prividno manja. Obje metode (MASW i RF) potvrđuju da je odloženi materijal boljih karakteristika u rubnom dijelu kazete, a to odgovara navodima iz dokumentacije o sanaciji odlagališta s izvođenjem bočnih nasipa.



Slika 5. Profil brzina širenja seizmičkih P valova kroz odlagalište Knežinec ostvaren refrakcijskom tomografijom (RF).

8. MJERENJE MIKROSEIZMIČKOG NEMIRA

Metoda mjerenja mikrosezmičkog nemira, tzv. HVSR metoda (engl. Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio), u posljednja dva desetljeća pokazala se kao brza i jednostavna metoda za istraživanje odziva tla, tj. za određivanje rezonantne vlastite (osnovne) frekvencije tla i faktora amplifikacije. HVSR metoda pogodna je za procjenu odziva tla u seizmički neaktivnim područjima.

Mikroseizmički nemir može se definirati kao stalno podrhtavanje uzrokovano prirodnim (vjetar, oceanski valovi, daleki potresi, ciklone i anticiklone) i umjetnim (promet, industrijski strojevi) izvorima. Relativno niske frekvencije (0.1 do < 1 Hz) prirodnog su porijekla (engl. microseism) – tzv. daleki izvori, dok više frekvencije (0.5

do > 10 Hz) imaju svoje porijeklo od ljudske aktivnosti (engl. microtremor) – tzv. bliski izvori. Valno polje koje uzrokuje pojavu mikrosezmičkog nemira (prirodni ili umjetni) može se objasniti pomoću prostornih (P-longitudinalni i S-transverzalni) i površinskih (R-Rayleigh i L-Love) valova. Nakamura (1989) objašnjava mikrosezmički nemir rezonancijom prostornih valova S valova, dok Bard (1998) i Bonnefoy-Claudet et.al. (2006) objašnjavaju to pomoću površinskih valova, tj. da je frekventnom ovisnošću eliptičnosti Rayleighevih valova.

Nakamura (1989) definira rezonantni amplitudni HVSR vrh $A(f)$ kao spektralni omjera horizontalnih komponenti (NS i EW) i vertikalne komponente (V) kao:

$$A(f) = HVSR(f) = \frac{\sqrt{F_{NS}(f) \times F_{EW}(f)}}{F_V} \quad (5)$$

Amplituda $A(f)$ ovisna je o vlastitoj frekvenciji osciliranja sedimenata tla i pokazuje kolika je amplifikacija amplitude titranja površinskog sloja u odnosu na osnovnu stijenu. Amplituda je ovisna o impedanciji tla između osnovne stijene i površinskih sedimenata tla.

$$A_0 = C = \frac{V_{bedrock} \cdot \rho_{bedrock}}{V_{surface} \cdot \rho_{surface}} \quad (6)$$

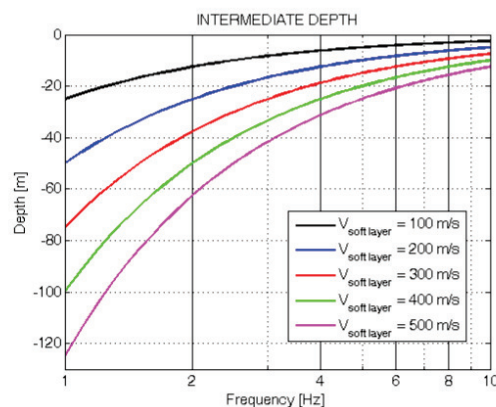
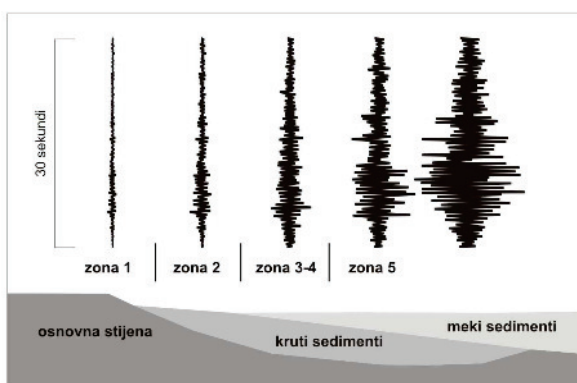
Impedancija tla je otpor titranju čestice tla ili stijene (Aki et al., 2009) i definira se kao umnožak gustoće tla i brzine širenja transverzalnih valova.

Pojava rezonancije događa se prilikom širenja seizmičkog vala u gornje slojeve tla ili stijena pri čemu dolazi do pojave reverberacije seizmičkog vala. Maksimum rezonancije događa za valove čije su valne duljine četiri puta debljine (h) sloja u kojem je seizmički val zarobljen. Za transverzalne valove (V_s), frekvencija koja je najviše amplificirana, tj. vlastita ili rezonantna frekvencija f_0 može se definirati:

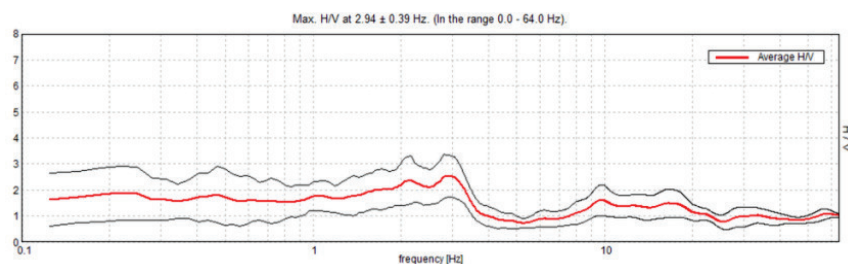
$$f_0 = \frac{V_s}{4h} \quad (7)$$

Osnovna priprema podataka i računanje HVSR – spektara napravljeni su računalnim programom Grilla (Micromed S.p.A., Mogliano veneto, Italija). Najprije su izmjereni vremenski nizovi brzine osciliranja tla razdijeljeni u prozore trajanja 20 sekundi, te su uklonjeni oni prozori koji su tijekom mjerenja bili kontaminirani jakim tranzijentima. Zatim su za svaki prozor izračunati HVSR spektri kao omjer srednjaka Fourierovih spektara dvije horizontalne komponente, te Fourierovog spektra vertikalne komponente. Ti su spektri usrednjeni, te naknadno izglađeni Konno-Ohmachi filtrom.

Spektralne karakteristike mikrosezmičkog nemira se mijenjaju blizu, uzduž i poprijeko rasjednih zona, lateralnih geoloških promjena, utjecaja šupljina i anomalija površinskih slojeva. Rezultati mjerenja prikazani su na Slikama 7. – 9.



Slika 6. Lijevo: amplifikacija seizmičke pobude od osnovne stijene do površinskih slojeva, vidi izraz (6), Desno: procjena dubine mekih sedimenata iznad osnovne stijene, izraz (7).

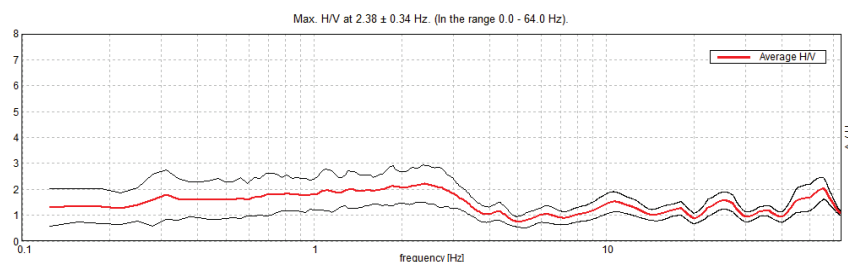


Slika 7. MT1 – mjerenje HVSR-a izvan tijela odlagališta (položaj MT-1)

$F_0 = 2.94$ Hz (osnovna frekvencija tla iznad laporovite podine aluvijalnog bazena, "bedrock")

$A_0 = 2.75$ (amplifikacija tla)

$H \approx 17 - 26$ m (dubina sedimenata iznad bedrocka) uz $V_s \approx 200 - 300$ m/s



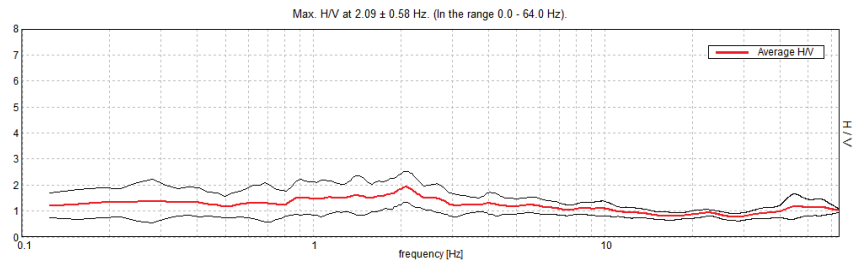
Slika 8. MT2 – mjerenje HVSR-a na tijelu odlagališta – (položaj MT-2)

$F_0 = 2.38$ Hz (osnovna frekvencija tijelo odlagališta + sedimenti iznad bedrocka)

$A_0 = 2.2$ (tijelo odlagališta deamplificira – prigušuje seizmički val)

$H \approx 21 - 32$ m (dubina do bedrocka – tijelo odlagališta + sedimenti) uz $V_s \approx 200 - 300$ m/s

Usporedbom sa MT-1, dubina do bedrocka je povećana za debljinu tijela odlagališta.

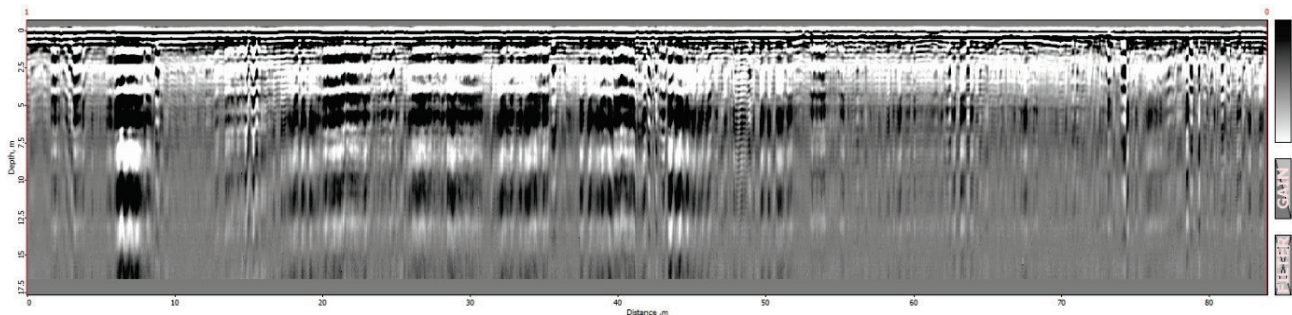


Slika 9. MT3 – mjerenje HVSR-a na tijelu odlagališta – (položaj MT-3)

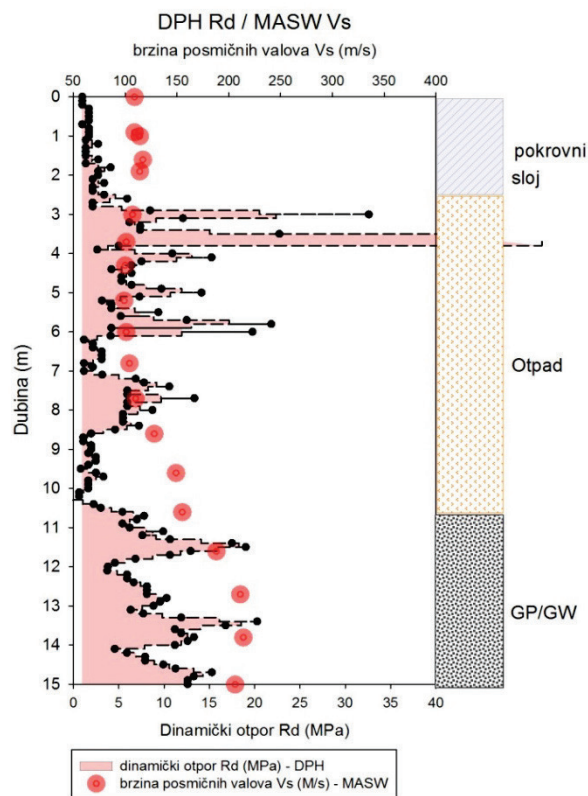
$F_0 = 2.09$ Hz (osnovna frekvencija tijelo odlagališta + sedimenti iznad bedrocka)

$A_0 = 2.0$ (tijelo odlagališta deamplificira – prigušuje seizmički val)

$H \approx 23 - 36$ m (dubina do bedrocka – tijelo odlagališta + sedimenti) uz $V_s \approx 200 - 300$ m/s



Slika 10. Georadarski radiogram snimljen usporedno s ostalim geofizičkim profilima.



Slika 11. Litološki profil ostvaren MASW i DPH ispitivanjem.

9. GEORADARSKO PROFILIRANJE

Osnovni princip georadarskog profiliranja je identificiranje geofizičkih anomalija, odnosno utvrđivanje prostora s promijenjenim fizikalnim svojstvima (različite vrste materijala). Pri tome anomalija može biti bilo kakvog oblika. I georadarska mjerena imaju problem višeznačnosti kao i druge geofizičke metode. Iz tog razloga se ponovo ističe potreba za iskustvom i poznavanjem mjerne opreme (Brezigar et al., 1994/95). Ukratko, metoda se temelji na penetraciji kratkih visoko frekventnih elektromagnetskih (radio, EM) valova frekvencije 10 do 1000 MHz koji se odašilju u tlo, šire do anomalije gdje se djelomično reflektiraju i vraćaju na prijemnu antenu. Način interpretacije i obrade podataka sličan je seizmičkoj refleksiji, s razlikom u izvoru, fizikalnoj prirodi i frekvenciji uzorkovanja. Reflektirani EM val na radiogramu se vidi kao refleks.

Iz priloženog radiograma na Slici 10. jasno je vidljivo da otpadni materijal izaziva jako prigušenje radiovalova, s nešto jasnije razlučivom granicom pokrovnog sloja i tijela odlagališta.

10. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

Ostvareni rezultati geofizičkih istraživanja na prostoru odlagališta podudarni su s dostupnom arhivskom dokumentacijom. Geofizičkim mjerenjima ostvaren je uvid u građu odlagališne kazete s visokom rezolucijom. Geoelektrični profil prikazan na Slici 3. izvrsno ocrta profil odlagališne kazete.

Slika 11. prikazuje 1D profil krutosti odlagališta, te služi za proračune slijeganja, a može se koristiti i u svrhu određivanja konsolidacije odlagališta ukoliko se mjerenja provode u vremenskim razmacima u kojim se mogu bilježiti konsolidacijske promjene (Counoulos et al., 1997; Edgers et al., 1992; Edil et al., 1990).

Određivanje deformacijskih modula iz podataka geofizičkih mjerenja i rezultata dinamičkog sondiranja zahtijeva posebnu elaboraciju i izvan je opsega ovog rada.

11. ZAKLJUČAK

Značaj primjene geofizičkih metoda usmjeren je određivanju fizikalno-mehaničkih parametara ispitivanih materijala. Ti su parametri vrlo važni za kvalitetno funkcioniranje građevina odlagališta. Izložena primjena istraživanja geofizičkim metodama u inženjerskoj praksi nastavak je serije stručnih i znanstvenih radova iz svijeta na temu istraživanja odlagališta otpada (Miller et al. 1999).

Rezultati ostvareni električnom tomografijom (ERT) daju uvid u geometriju odlagališta. Zaključuje se da se odlagališni materijal po otpornosti bitno razlikuje od prirodnih materijala u ležištu, a metoda ocjenjuje kao podesna za istraživanje odlagališta. Seizmičkim mjerenjima također su dobiveni rezultati koji odgovaraju dokumentiranim podacima o odlagalištu. Brzina širenja posmičnih seizmičkih valova izravna je slika deformacijskih karakteristika materijala. Izmjereni profil odgovara dubinskom zalijeganju tijela odlagališta. Zaključuje se da je MASW seizmička metoda podesna za istraživanja

odlagališta. Rezultati mjerenja mikrosezmičkog nemira relativno dobro ocrtavaju granice osnovne podloge, odnosno podinu aluvijalnog bazena koja se naglo produbljuje u smjeru sjevera.

Precizna predviđanja slijeganja odlagališta omogućuju upravi kontrolu i po potrebi prevenciju potencijalnih oštećenja na odlagališnim objektima i infrastrukturi, te karakterizaciju dugoročne namjene površina zatvorenog odlagališta. Kao nastavak istraživanja ističe se potreba za prikupljanjem što većeg broja prikazanih mjerenja sa što više dokumentiranih lokacija, a radi uspostave korelacijskih odnosa s mjerenjima stvarnih in-situ deformacijskih karakteristika deponiranog materijala.

12. LITERATURA

Aki, K., Richards, P.G., 2009. Quantitative Seismology. University Science Book, California.

Bard, P.-Y., 1998. Microtremor measurements: A tool for site effect estimation? Proceeding of the Second International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion. Yokohama, Japan, 3. pp. 1251-1279.

Bonnefoy-Claudet, S., Cornou, C., Bard, P.-Y., Cotton, F., Moczo, P., Kristek, J., Fäh, D., 2006. H/V ratio: a tool for site effects evaluation. Results from 1-D noise simulations, Geophysical Journal International., vol. 167, pp. 827-837

Brezigar, A., Tomšić, B., Štern, J., Georadar - visokoločljiva geofizikalna elektromagnetna naprava, Geologija 37, 38, Ljubljana (1994/95), 437-458.

Butcher, A. P., McElmeel, K., Powell J.J.M., Dynamic probing and its use in clay soils, Conference proceedings, Craig, C., "Advances in site investigation practice", Thomas Telford Publishing, London (1996), 383 - 393.

Cope, M., Dynamic probe theory revisited – effective interpretation of dynamic test results, Formerly of Geotek Services Limited, Auckland New Zeland (2011)

Counoulos, D.G., and Koryalos, T.P. (1997). Prediction of attenuation of landfill settlement rates with time. Proc. 14th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, ISSMFE, Hamburg, Vol. 3, 1807-1811.

Đorđević, R., Studija o utjecaju na okoliš odlagališta otpada u Knegincu Gornjem, Dvokut ECRO, Zagreb (2002).

Edgers, L., Noble, J.J., and Williams, E. (1992). A biologic model for long-term settlement in landfills. Environmental Geotechnology, M.A. Usman and Y.B. Acar, eds., Balkema, 177-184.

Edil, T.B., Ranguette, V.J., and Wuellner, W.W. (1990). Settlement of municipal refuse, Geotechnics of waste fills - Theory and practice. A. Landva and D. Knowles, eds., ASTM STP 1070, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 225-239.

Foti, S., 2000, Multistation methods for geotechnical characterization using surface waves: PhD thesis, Politecnico di Torino, Italy.

Grisolia, M., Napoleoni, Q. (1996). Geotechnical characterization of municipal solid waste: Choice of design parameters, Environmental Geotechnics, Kamon (ed.), Balkema, 641-646.

HRN EN ISO 22476-2:2008, Geotehničko istraživanje i ispitivanje - Terensko ispitivanje - 2. dio: Dinamička penetracija.

HRN EN ISO 22476-2:2005/A1:2011, Geotehničko istraživanje i ispitivanje - Terensko ispitivanje - 2. dio: Dinamička penetracija - amandman.

Kovačević, M.S., Maričić, D. Gazdek, M., Application of geophysical investigations in underground engineering, Tehnički vjesnik 20, 6(2013), 1111-1117.

Loke, M.H., Barker, R.D., Least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi Newton method, Geophysical Prospecting. 44, (1996) 131-152.

McDowell, P. W. et al. Geophysics in engineering investigation. CIRIA C562, Westminster, London, 2002.

Miller, R.D., Xia, J., Park, C.B., and Ivanov, J., Multichannel analysis of surface waves to map bedrock: The Leading Edge, v. 18, no. 12, 1999.

Nakamura, Y., 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. Quarterly Report Railway Tech. Res. Inst., vol. 30-1, pp. 25-30.

Park, C.B.; Miller, R.D.; Xia, J.: Multichannel analysis of surface waves, Geophysics 64 (1999) 3, 800-808.

Puech, A.; Rivoallan, X.; Cherel, L.: The use of surface waves in the characterisation of seabed sediments: development of a MASW system for offshore applications, Brest, France.
>http://www.ifremer.fr/dtmsi/colloques/seatech04/xlurton/B3_Geotechnics/Puech_2.pdf>, 30.08.2010.

Sowers, G.F. (1968)., Foundation problems in sanitary land fills, Journal of Sanitary Engineering Division, Proc. ASCE, Vol. 94. SA1, 103-116.

Terzaghi, K., Peck, R.B., Soil Mechanics in Engineering Practice, 1st Edition, John Wiley and Sons, New York, 1948.

The Council of the European Union, Council directive 99/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste.