

PROCJENA KRUTOSTI TLA IN-SITU ISPITIVANJIMA I KORELACIJE IZMEĐU v_s , N_{SPT} I N_{10H}

SOIL STIFFNESS EVALUATION BASED ON IN-SITU TESTS AND CORRELATIONS BETWEEN v_s , N_{SPT} AND N_{10H}

Stjepan Strelec¹, Mario Gazdek², Boris Jedud³

¹ Geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, Varaždin, HRVATSKA, sstrelec@gfv.hr

² Geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, Varaždin, HRVATSKA, mgazdek@gfv.hr

³ Geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, Varaždin, HRVATSKA, boris.jedud@yahoo.com

Sažetak: U ovome radu su prikazani rezultati istraživanja tla geofizičkim metodama koje se baziraju na spektralnoj analizi, odnosno disperziji brzine površinskih valova ovisno o frekvenciji. Seizmički presjeci višekanalne analize površinskih valova (Multichannel Analysis of Surface Waves, MASW), odnosno seizmičke sonde spektralne analize površinskih valova (Spectral Analysis of Surface Waves, SASW) uspoređeni su s rezultatima ne-disperzivnih metoda refrakcijske seizmike i bušotinske downhole metode. Radi analize procjene krutosnih svojstava tla izvedenih iz brzine posmičnih valova, provedeni su i standardni geotehnički penetracijski pokusi (Standard Penetration Test, SPT i Dynamic Probe Heavy, DPH). Korelacije brzine posmičnih valova v_s i vrijednosti SPT-N i DPH-N pokusa su pokazale visoku pouzdanost procjene krutosti tla iz spektralnih metoda površinskih valova, prema kategorijama Eurokoda 8 (EC8).

Cljučne riječi: $v_{s,30}$, MASW, SPT, DPH, Eurokod 8

Abstract: In this paper, the results of geophysical surveying methods based on the surface waves are presented. Surface wave velocity dispersion depending on the frequency or spectral analysis was used for subsurface soil properties evaluation. Multichannel analysis of surface waves (MASW) seismic cross sections and spectral analysis of surface waves (SASW) seismic soundings were compared with results of non-dispersive seismic refraction and down-hole methods. In order to analyse the estimated value of soil stiffness derived from the shear wave velocity, geotechnical penetration tests (Standard Penetration Test, SPT and Dynamic Probe Heavy, DPH) were conducted. Statistical correlations of shear wave velocity (v_s) and dynamic penetration test blow counts (SPT-N and DPH-N) have revealed high confidence of the estimated soil stiffness based on the surface wave velocity for Eurocode 8 (EC8) ground types.

Keywords: $v_{s,30}$, MASW, SPT, DPH, Eurocode 8

Received: 30.01.2014 / Accepted: 06.05.2014

Prethodno priopćenje

1. UVOD

Ponašanje tla ovisi o veličini deformacija. U geotehnici je naročito zanimljivo parametriziranje tla pri malim i vrlo malim posmičnim deformacijama ($\gamma_s < 10^{-5}$) kod kojih se modul posmika G može smatrati relativno neovisnim od dimenzije posmičnih deformacija. Modul posmika pri takvim vrlo malim deformacijama se često, zapravo tradicijski, naziva dinamički modul posmika (G_{dyn} ili G_{max}) (Puech, 2004). Klasična podjela na „dinamičke i statičke“ veličine obzirom na brzinu nanošenja opterećenja je u tom smislu suvišna, budući da se te veličine mogu jasno odrediti obzirom na dimenziju relativne deformacije.

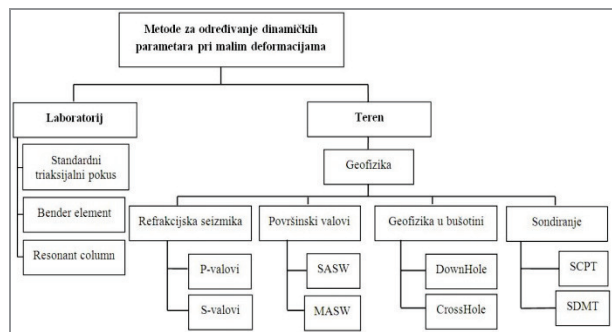
Primjena seizmičkih metoda posljednjih desetljeća, osobito višekanalne analize površinskih valova (Multi-Channel Analysis of Surface Waves, MASW) (Park, 1999), omogućava mjerenje i određivanje brzine posmičnih valova v_s koja se smatra bitnom fizikalnom veličinom za procjenu dinamičkih svojstava tla.

U ovom su radu prikazani rezultati istraživanja MASW metodom, a dinamička svojstava tla se procjenjuju iz vrijednosti v_s brzina posmičnih S valova, odnosno iz srednjih brzina $v_{s,30}$ do 30 metara dubine. Radi potvrde MASW rezultata, provedena su istraživanja i drugim seizmičkim metodama s površine odnosno iz bušotina. Spektar seizmičkih metoda uz MASW su činile površinske metode refrakcijske tomografije (Seismic Refraction Tomography, SRT) i spektralne analize površinskih valova (Spectral Analysis of Surface Waves, SASW), odnosno metoda niz-bušotinu (Down-hole, DH), Slika 1.

Osim geofizičkih metoda, provedeni su i geotehnički penetracijski pokusi: standardni penetracijski test (Standard Penetration Test, SPT) i pokus s teškom udarnom sondom (Dynamic Probing Heavy, DPH). Iz podataka geotehničkih proba izvedene su korelacije između brzine posmičnih valova i broja udaraca SPT i DPH pokusa ($v_s - N_{SPT}$, $v_s - N_{10H}$), kao i korelacije između SPT i DPH mjerenja ($N_{SPT} - N_{10H}$).

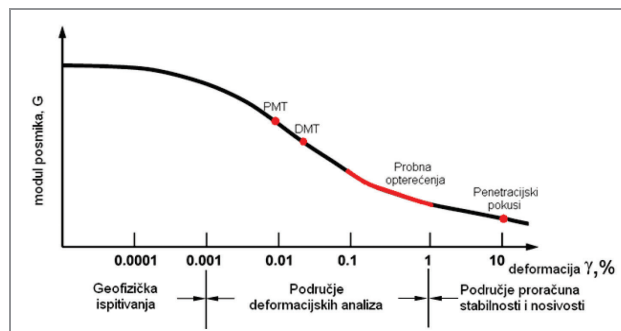
Sva mjerenja su izvedena na području grada Varaždina, u šljunkovitim aluvijalnim slojevima.

Odnos krutosti, odnosno modula posmika i pripadnih relativnih deformacija $\gamma - G$, obzirom na vrstu primijenjenih ispitivanja u geotehničkoj praksi prikazuje Slika 2.



Slika 1. Metode koje se najčešće primjenjuju za određivanje dinamičkih svojstava tla pri malim deformacijama

Brzina v_s se osim u geotehnici za određivanje mehaničkih svojstava tla, koristi i radi seizmičkog mikrozoniranja. U Republici Hrvatskoj prihvaćen je Eurokod 8 (EC8) – Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija (HRN EN 1998-1:2011), a u tom standardu tlo se klasificira u sedam tipova koji su opisani stratigrafskim profilom s tri parametra: srednjom brzinom posmičnih valova do 30 metara dubine $v_{s,30}$, brojem udara standardnog penetracijskog pokusa N_{SPT} i nedreniranom posmičnom čvrstoćom c_u .



Slika 2. Raspodjela krutosti tla u ovisnosti o veličini deformacija i metodi ispitivanja (Luna, R., Jadi, H., 2000.)

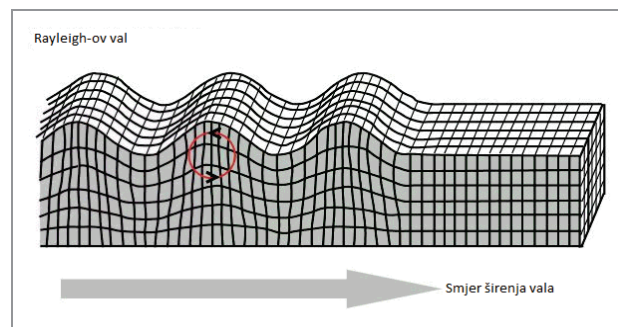
2. SVOJSTVA I METODE SNIMANJA POVRŠINSKIH VALOVA

2.1. Svojstva površinskih valova

Seizmički valovi se u beskonačnom, homogenom i izotropnom mediju šire kao tlačni/uzdužni P i posmični/transverzalni S prostorni valovi. S približavanjem granici poluprostora ti se valovi transformiraju u površinske valove. Kada se za generiranje seizmičkih valova na površini terena koriste vertikalni izvori poput čekića ili pada utega (drop-

weight), onda neposredno nastaju površinski Rayleighevi (R) valovi koji u najvećoj mjeri preuzimaju seizmičku energiju izvora. Distribucija energije prema vrsti valova: R valovi nose 67%, dok S i P valovi preuzimaju 26%, odnosno 7% seizmičke energije (Telford, 1990).

Složeni oblik Rayleighevih valova se sastoji od longitudinalnog i transverznog gibanja s međusobnim pomakom u fazi. Materijalna supstanca prelazi eliptičku putanju kojoj je velika poluos vertikalna kada je val blizu površine, Slika 3. Rayleighevi valovi često se nazivaju i valjanje tla (Ground Roll, GR).



Slika 3. Širenje Rayleighevog vala

Prostorni P i S valovi ne pokazuju značajnije rasipanje energije po frekvencijama, međutim najvažnije svojstvo R valova je upravo disperzija energije koju nosi po frekvencijama. Tako se valovi niže frekvencije, odnosno veće valne duljine šire dublje u medij, dok valovi visoke frekvencije i male valne duljine prodiru vrlo plitko. Brzina širenja vala pri pojedinoj frekvenciji f se naziva fazna brzina $v_{R\phi}$, a krivulja koja prikazuje faznu brzinu u ovisnosti o frekvenciji naziva se krivulja fazne brzine ili disperzijska krivulja, $v_{R\phi} = v_R(f)$.

Pojava više faznih brzina na određenoj frekvenciji naziva se višemodalna disperzija (Park, 1998). Dakle, energija se pri određenoj frekvenciji može prenositi različitim brzinama, pa se u tom slučaju najsporiji mod naziva osnovni M_0 mod, a sljedeći s većom brzinom je prvi viši M_1 mod. Sukcesivno slijede drugi, treći i ostali viši modovi. Fazna brzina širenja Rayleighevih valova prvenstveno ovisi o brzini posmičnih valova. Izraz koji pokazuje odnos između brzine posmičnih valova v_s i brzine Rayleighevih valova v_R je sljedeći:

$$v_s = P v_R \quad (1)$$

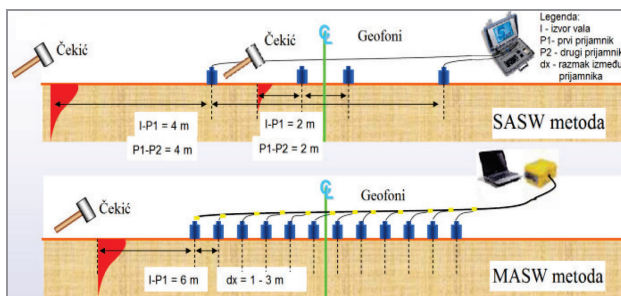
U tom izrazu je P konstanta ovisna o Poissonovom koeficijentu ν (primjerice $P = 1.09$ za $\nu = 0.25$, Stokoe, 1994).

2.2. SASW i MASW

SASW metoda se bazira na spektralnoj analizi površinskih valova te kao rezultat daje sondažni 1D profil brzine posmičnih valova v_s po dubini (Heisey, 1982). U standardnoj SASW metodi se koriste samo dva geofona, a početni geofonski razmak i razmak

između prvog geofona i izvora se postupno povećava da bi se postigla ciljana dubina istraživanja, Slika 4.

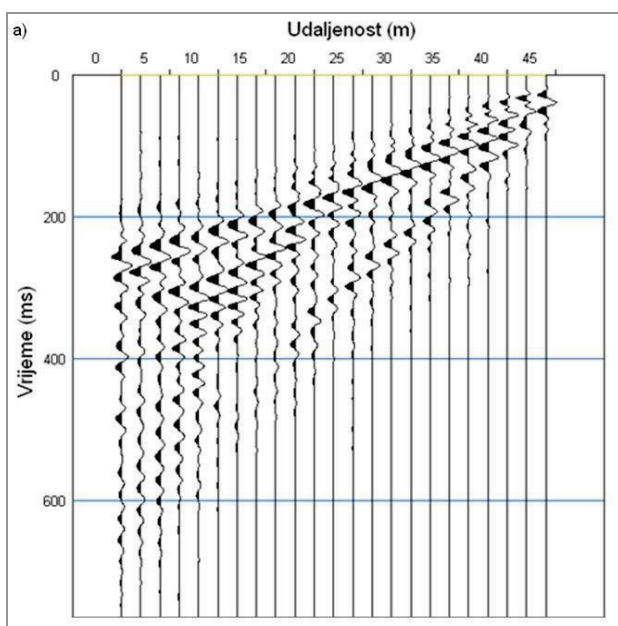
Višekanalni pristup, kod kojega nije potrebno mijenjati raspored i pozicije geofona, koristi MASW metoda. Za 1D ili 2D seizmički profil brzine posmičnih valova v_s s dubinom, potrebno je promijeniti samo pozicije izvora seizmičkih valova. Na višekanalnoj snimci mogu se prepoznati osnovni i viši modovi površinskih valova, ali i smetnje kao što su zračni, direktni i prostorni valovi (Park, 2007). Princip višekanalnog snimanja osigurava veći broj i višu kvalitetu podataka tijekom snimanja, a to onda izravno omogućava korektniju i pouzdaniju interpretaciju (Park, 1999).



Slika 4. SASW i MASW metode snimanja površinskih valova

Postupak primjene MASW metode sastoji se od tri osnovna koraka:

1. Snimanje površinskih valova i prikupljanje terenskih podataka, Slika 5.a,
2. Konstrukcija disperzijske slike na kojoj se određuje disperzijska krivulja, Slika 5.b (lijevo),
3. Inverzija ili izračun brzine širenja posmičnih valova s dubinom, Slika 5.b (desno).

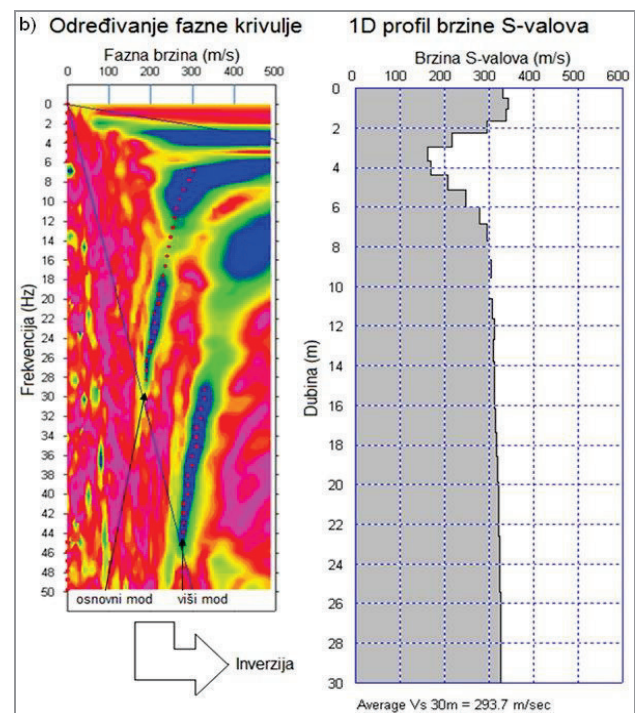


Slika 5a. Snimka Rayleighevih valova

3. IN-SITU ISPITIVANJA DINAMIČKIH SVOJSTAVA TLA

3.1. Ispitivanje dinamičkim prodiranjem

Dinamički penetracijski pokusi najčešće se koriste kao geotehnička in-situ ispitivanja radi određivanja mehaničkih svojstava tla. Postoji veliki broj inačica sonde za dinamičko prodiranje. U ovome istraživanju su se koristile dvije vrste pokusa: SPT prema normi EN ISO 22476-3 te DPH prema normi EN ISO 22476-2 (HRN EN 1997-2, 2008). Brojni autori predlažu različite korelacije broja SPT i DPH udaraca, a u ovom su radu predstavljene korelacije za šljunkovite formacije koje su dominantne u istraživanom području. Prednost ispitivanja penetracijskim pokusima je relativno jednostavna interpretacija rezultata mjerenja. Međutim, rezultati predstavljaju samo točkasti, odnosno 1D podatak za promatrane lokaciju-sondu.



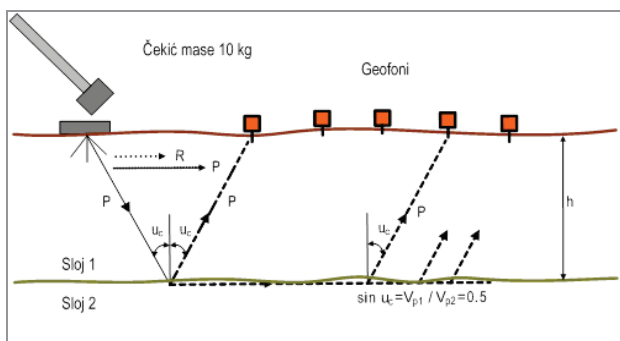
Slika 5b. Određivanje disperzijske krivulje i rezultat inverzije

3.2. Refrakcijska seizmika

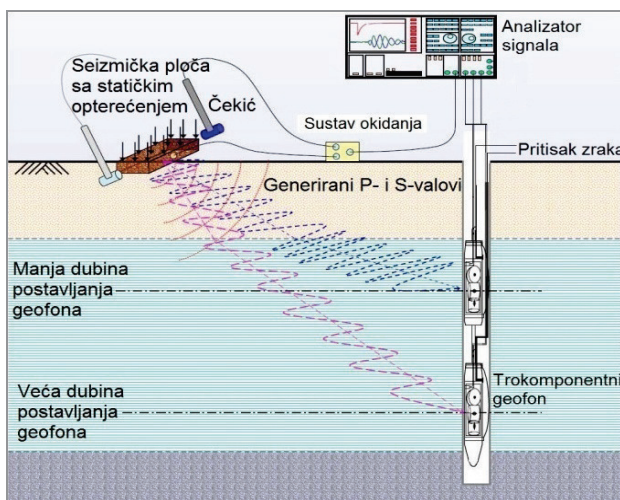
Ovom metodom se mjere vremena prvih nailazaka seizmičkih valova na geofone postavljene u nizu, Slika 6. Vremena se očitavaju sa snimljenih seizmograma, a prvi nailasci se odnose na prostorne P ili S valove što već ovisi o načinu generiranja seizmičkog poremećaja. Pikiranje i korespondencija vremena s odgovarajućim refraktorima najosjetljiviji je dio prilikom interpretacije. Princip CAD (Computer Aided Tomography) daje korektnu sliku kad god se uvažavaju relevantni podaci geotehničkog profila, a time se ujedno umanjuje moguća višeznačnost zbog inverzije brzina po dubini.

3.3. Down-hole metoda

Down-hole je bušotinska seizmička metoda koja se koristi za određivanje vrsta i mehaničkih svojstava tla i stijena u neposrednoj okolini bušotine. Iz izmjerenih vremena nailaska prostornih P i S valova do trokomponentnog geofona smještenog u bušotini, te poznate udaljenosti izvor-geofon, mogu se odrediti intervalne brzine za različite dubine, Slika 7. Budući da trokomponentni bušotinski geofon ima jedan vertikalni i dva horizontalno postavljena geofona, mogu se registrirati nailasci uzdužnog P vala, ali i vertikalno odnosno horizontalno polariziranih posmičnih valova SV i SH. Pojedinom tipu vala odgovaraju odrediti intervalne brzine v_P , v_{SP} i v_{SH} .



Slika 6. Metoda refrakcijske seizmike



Slika 7. Down-hole metoda

4. ODREĐIVANJE DINAMIČKIH KONSTANTI ELASTIČNOSTI

Primjena seizmičkih metoda u istraživanju i određivanju mehaničkih svojstava tla i stijena nalazi uporište u ključnoj činjenici da je brzina poprečnog vala v_s ovisna o posmičnoj čvrstoći, dok brzina uzdužnog vala v_p ovisi o tlačnoj čvrstoći.

Osnovne dinamičke konstante (ili moduli) elastičnosti geomedija su: Youngov modul E_{dyn} , obujamski modul K_{dyn} , modul posmika G_{dyn} i modul kompresijskih valova M_{dyn} . Ti se moduli elastičnosti pri vrlo malim

deformacijama mogu izračunati iz v_p i v_s brzina određenih in-situ seizmičkim mjerenjima. Osim njih, može se odrediti i Poissonov koeficijent ν_{dyn} . Odnos konstanti i brzina je određen sljedećim izrazima (ABEM, 1989):

$$\begin{aligned} V_p &= ((K_{dyn} + 4/3 G_{dyn}) \rho^{-1})^{1/2} = \\ &= ((1 - \nu_{dyn}) G_{dyn} (0.5 - \nu_{dyn})^{-1} \rho^{-1})^{1/2} \\ v_p &= \sqrt{\frac{K_{dyn} + G_{dyn} \cdot 4/3}{\rho}} = \sqrt{\frac{(1 - \nu) \cdot G_{dyn}}{(0.5 - \nu) \cdot \rho}} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} V_s &= (E_{dyn} (2 \rho)^{-1} (1 + \nu_{dyn})^{-1})^{1/2} = (G_{dyn} \rho^{-1})^{1/2} \\ v_s &= \sqrt{\frac{E_{din}}{2 \cdot \rho \cdot (1 + \nu)}} = \sqrt{\frac{G_{dyn}}{\rho}} \end{aligned} \quad (3)$$

Seizmičkom interpretacijom istovremeno se određuju i brzine i debljine pojedinih formacija. Poznavanjem gustoće ρ geomedija i brzina elastičnih valova, mogu se odrediti vrijednosti dinamičkih konstanti: E_{dyn} , K_{dyn} , G_{dyn} i M_{dyn} . Ako se omjer brzina v_p/v_s označi s α , može se pojedinačno izraziti svaka konstanta:

$$\begin{aligned} \nu_{dyn} &= 0.5 (\alpha^2 - 2) (\alpha^2 - 1)^{-1} \\ \nu &= \frac{\alpha^2 - 2}{2 \cdot (\alpha^2 - 1)} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} E_{dyn} &= \rho v_p^2 (1 - 2\nu_{dyn}) (1 + \nu_{dyn}) (1 - \nu_{dyn})^{-1} \\ E_{dyn} &= \rho \cdot v_p^2 \frac{(1 - 2 \cdot \nu) \cdot (1 + \nu)}{1 - \nu} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} G_{dyn} &= \rho v_s^2, \quad M_{dyn} = \rho v_p^2 \\ G_{dyn} &= \rho \cdot v_s^2, \quad M_{dyn} = \rho \cdot v_p^2 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} K_{dyn} &= E_{dyn} (3 - 6\nu_{dyn})^{-1} \\ K_{dyn} &= \frac{E_{dyn}}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \nu)} \end{aligned} \quad (7)$$

Tla općenito imaju manje brzine u odnosu na stijene. Međutim, prisutnost podzemne vode u nekoherentnim tlima može uzrokovati znatan porast brzine v_p koja tada nerijetko prelazi vrijednost 1500 m/s. Prisutnost podzemne vode ili pak stupanj saturacije ne utječe na promjenu brzine v_s . Zbog toga vrijednost Poissonovog koeficijenta može biti vrlo blizu maksimuma, odnosno može iznositi 0.48 ili 0.49 (Zonge Int. Inc., 2014). Iako je to seizmički realan događaj, ipak se te vrijednosti bez prethodne korekcije brzine P vala u samom geomediju, ne bi smjele koristiti za proračun elastičnih konstanti.

Izraz $v_p/v_s = ((1 - \nu_{dyn}) / (0.5 - \nu_{dyn}))^{1/2}$ prikazuje odnos između seizmičkih brzina i Poissonovog koeficijenta, Slika 8.

5. TIPOVI TLA PREMA EUROKODU 8

Eurokod 8 razlikuje sedam tipova tla u odnosu na seizmičku osjetljivost: A, B, C, D, E, S1 i S2, Tablica 1.

Prema tom standardu, tipovi tla su opisani stratigrafskim profilom i s tri parametra ($v_{s,30}$, N , c_u): $v_{s,30}$ je srednja brzina posmičnih valova do 30 metara dubine, N je srednji broj udaraca dinamičke probe, a c_u je srednja nedrenirana posmična čvrstoća.

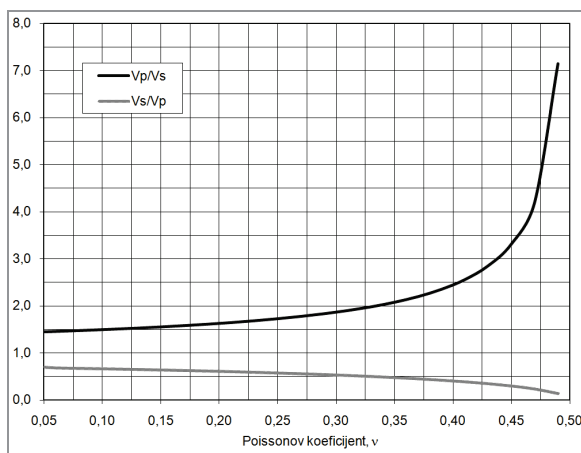
Tablica 1. Tipovi tla prema Eurokodu 8 (HRN-EN 1998, 2008)

TIP TLA	OPIS STRATIGRAFSKOG PROFILA	$v_{s,30}$ (m/s)	N_{SPT} (udarci/30 cm)	c_u (kPa)
A	Stijena ili njoj slične geološke formacije, uključujući najviše 5 m slabijeg materijala na površini	> 800	-	-
B	Slojevi vrlo zbijenog pijeska, šljunka ili vrlo čvrste gline, debljine najmanje nekoliko desetina metara, karakterizirani stupnjevitim povećanjem mehaničkih svojstava s dubinom	360÷800	> 50	> 250
C	Slojevi zbijenog ili srednje zbijenog pijeska, šljunka ili čvrste gline, debljine od nekoliko desetina do više stotina metara	180÷360	15÷50	70÷250
D	Rastresiti do srednje zbijeni nevezani sedimenti (s ili bez mekih kohezivnih slojeva) ili predominantno mekano do čvrsto kohezivno tlo	< 180	< 15	< 70
E	Tlo se na površini sastoji od aluvijalnih nanosa sa vrijednosti $v_{s,30}$ prema tipu C ili D i debljinom između 5 i 20 m, ispod kojeg je krući materijal sa $v_{s,30} > 800$ m/s			
S ₁	Tlo sadrži najmanje 10 m debeo sloj mekane gline s visokim plastičnim indeksom ($PI > 40$) i viskom sadržajem vode	< 100 (indikativno)	-	10÷20
S ₂	Tlo podložno likvefakciji s osjetljivim glinama ili bilo koji drugi profil tla koji nije uključen u kategorije A-E ili S ₁			

$v_{s,30}$ – srednja vrijednost brzine poprečnih površinskih valova do dubine 30 m u profil tla

N_{SPT} – standardni penetracijski test (broj udaraca)

c_u – nedrenirana posmična čvrstoća tla



Slika 8. Odnos seizmičkih brzina i Poissonovog koeficijenta

Srednje vrijednosti tih parametara se računaju obzirom na debljine h_i pojedinog od ukupno n slojeva tla, prema sljedećem izrazu u kojem meta varijabla X predstavlja bilo koji od tri navedena parametra ($X = v_{s,30}$ ili N ili c_u):

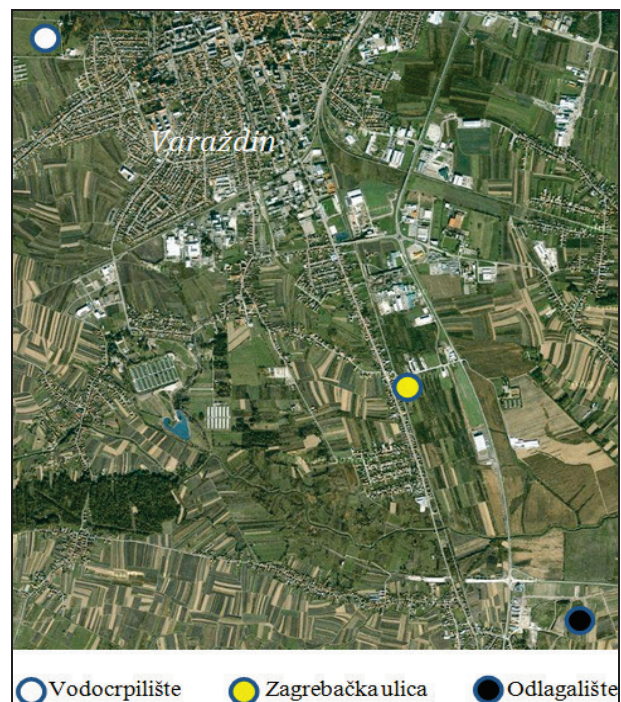
$$X = \frac{\sum h_i}{\left(\sum \left(\frac{h_i}{X}\right)\right)} \quad (8)$$

ili

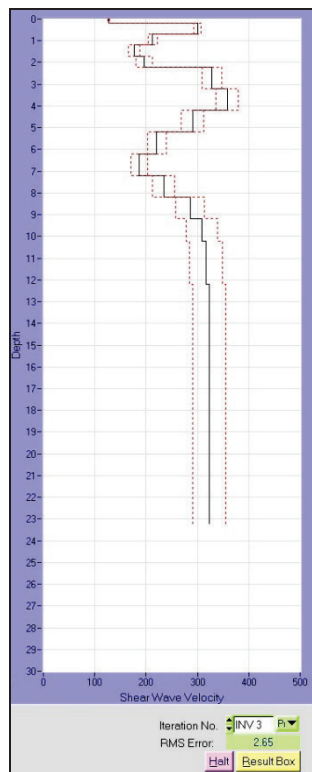
$$v_{s,30} = \frac{\sum h_i}{\left(\sum \left(\frac{h_i}{v_{s,30}}\right)\right)} \quad (8)$$

$$v_{s,30} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{h_i}{v_{s,i}}\right)}$$

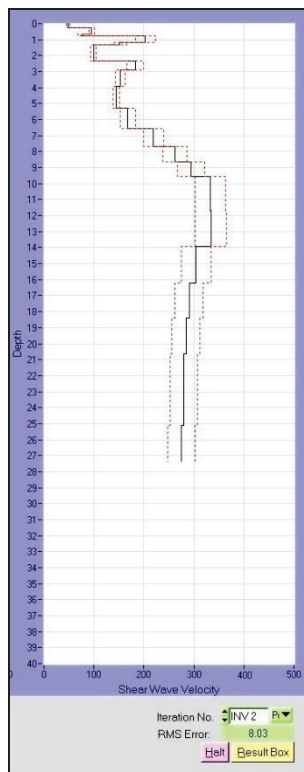
6. MJERENJA I REZULTATI PROVEDENIH ISTRAŽIVANJA



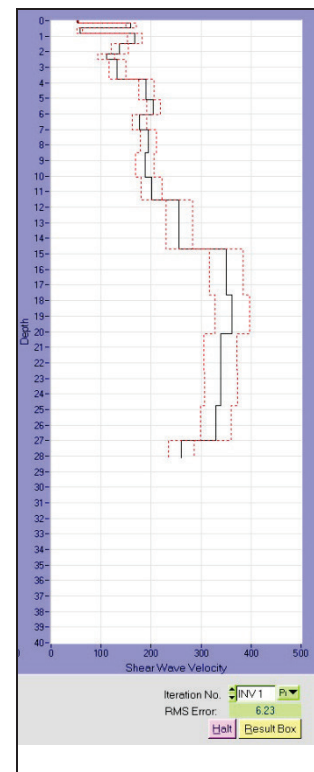
Slika 9. Situacijska karta istraživanja



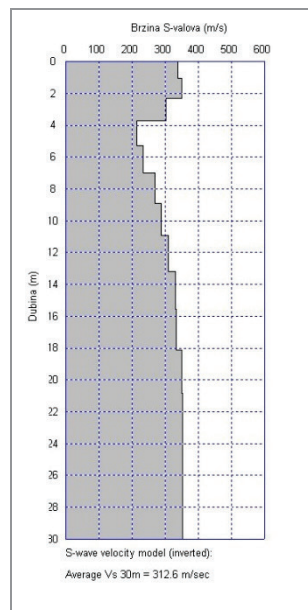
a. SASW - Vodocrpilište



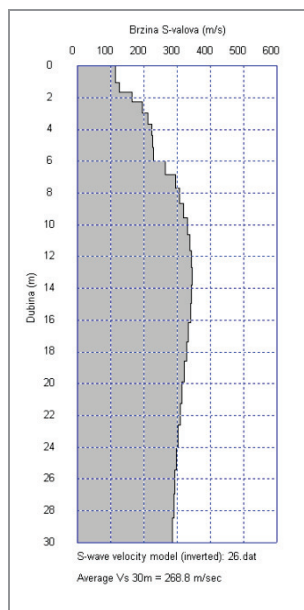
c. SASW – Zagrebačka ulica



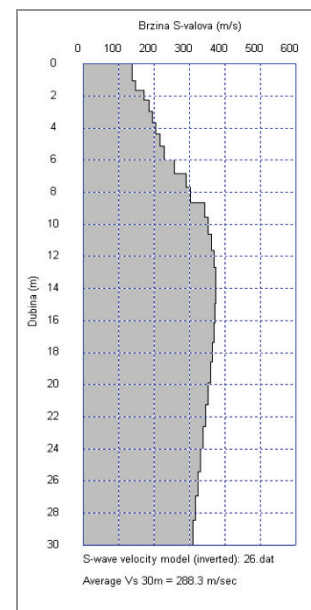
e. SASW – Odlagalište



b. MASW - Vodocrpilište



d. MASW - Zagrebačka ulica



f. MASW – Odlagalište

Slika 10. Interpretacije SASW i MASW metodama za istraživana područja

Istraživanja su provedena na tri lokacije unutar šireg područja grada Varaždina, Slika 9, koje leži na šljunkovitim nanosima znatne debljine (aluvij rijeke Drave). Na sve tri istražne lokacije (vodocrpilište Varaždin, poslovni objekt u Zagrebačkoj ulici i odlagalište otpada Knežinec), provedena su sljedeća mjerenja i ispitivanja: određivanje seizmičkih brzina SASW, MASW i refrakcijskom metodom, te određivanje

broja udaraca SPT i DPH pokusima. Dodatno su na lokaciji uz odlagalište izvedena i down-hole mjerenja u postojećem piezometru P-7 do dubine 20 m (Premur, 2004).

Osnovna značajka geološke građe aluvijalne dravske ravnice je prisutnost isključivo sedimentnih naslaga kvartarne starosti. Debljina istaloženih šljunkovito - pjeskovitih naslaga rijeke Drave raste od zapada prema

istoku, tako da se debljina sedimentnog kompleksa na području Varaždina procjenjuje na preko 60 m. Osnovno obilježje formacija je visoka vodopropusnost šljunka, a razina podzemne vode relativno je visoka (2÷6 m ispod razine terena).

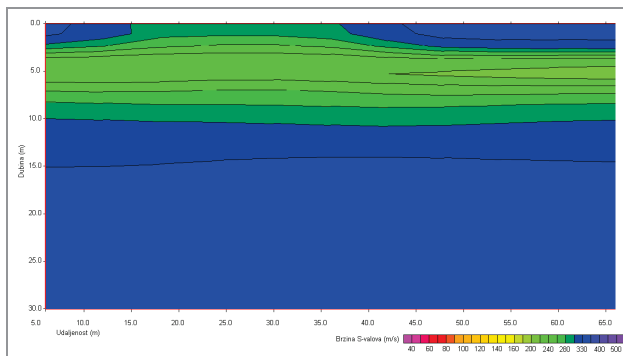
6.1. MASW i SASW mjerenja

MASW profil ili dispozitiv se sastojao od 24 vertikalna geofona frekvencije 4.5 Hz, koji su bili postavljeni na međusobnom jednakom razmaku od 3 m.

Takav razmak je osigurao dovoljnu razlučivost površinskih slojeva. Najmanja dubina istraživanja Z_{min} uvjetovana je geofonskim razmakom dx i to prema relaciji $Z_{min} = k dx$ ($0.3 \leq k \leq 1.0$) (Park, 2014). Duljina geofonskog rasporeda, odnosno dispozitiva D direktno utječe na najveću dubinu istraživanja Z_{max} , jer vrijedi odnos: $D = m Z_{max}$ ($1 \leq m \leq 3$).

Preporuka je da udaljenost od izvora do prvog geofona x_1 u dispozitivu bude u rasponu $0.2 \div 1.0 D$. Za interpretaciju snimljenih podataka koristilo se programski paket SeisImager.

Slika 10 prikazuje rezultate ispitivanja SASW i MASW metodama na svim lokacijama. Naročito zanimljivu 2D interpretaciju dala su MASW mjerenja na lokaciji vodocrpilišta Varaždin, Slika 11. Uočeno je da površinski slojevi do dubine 4 m imaju brzine v_s od približno 300 m/s, odnosno neočekivano veće od brzina koje imaju dublji slojevi. Takav je odnos potvrđen i SASW mjerenjima i interpretacijom. Dodatno su i rezultati penetracijskih pokusa ukazali na ovu inverziju, jer je broj udaraca u toj površinskoj zoni bio znatno veći nego na većim dubinama.



Slika 11. MASW 2D interpretacija prikazuje brzine posmičnih valova na lokaciji vodocrpilišta Varaždin

Za ovakve se inverzije pri interpretaciji MASW mjerenja koristi fundamentalni ili osnovni mod. Obzirom da inverzija ukazuje na složeniji, odnosno inverzno disperzivni profil krutosti, u interpretacijama se u obzir uzeo i utjecaj viših modova (Xia, 2000). U ovom specifičnom slučaju, tek na dubini od 7 m brzine S valova pokazuju blagi trend porasta s dubinom. Prosječna brzina na toj lokaciji do dubine 30 m je $v_{s,30} = 312$ m/s. Na preostale dvije lokacije, u Zagrebačkoj ulici i na odlagalištu, brzine v_s pokazuju sličan trend konstantnog i blagog porasta brzine s dubinom. Prosječne brzine $v_{s,30}$ su u rasponu od 270 do 290 m/s. Zona veće brzine se nalazi

na dubinama 9÷14 m u Zagrebačkoj ulici, dok je na odlagalištu takva zona pomaknuta dublje na 15÷20 m.

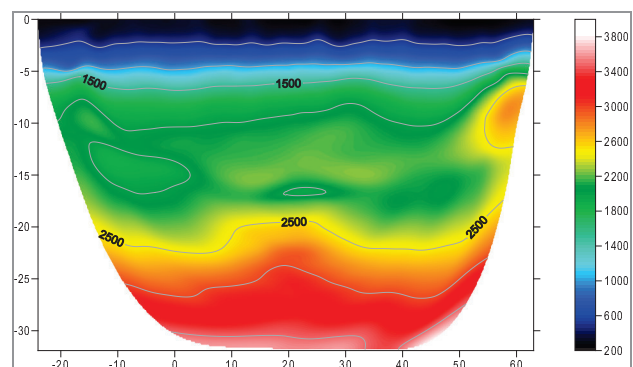
Tijekom SASW mjerenja početni razmak geofona je iznosio 1 m i udvostručavao se za veće dubinske zahvate. Za interpretaciju se koristio programski paket Win SASW 2.4.0.

6.2. Refrakcijska seizmika

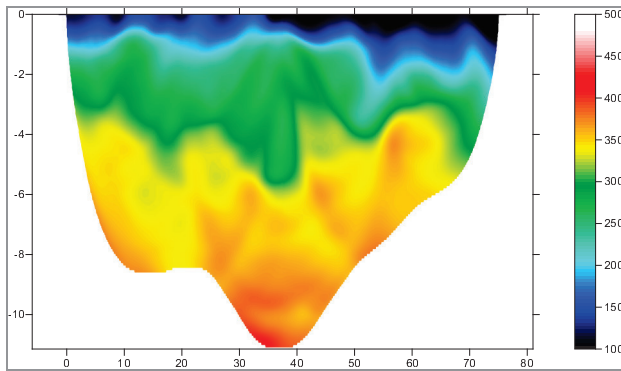
Plitka seizmička refrakcija, odnosno refrakcijska tomografija provedena je s P i S valovima. Seizmički dispozitiv se sastojao od 24 vertikalna geofona frekvencije 4.5 Hz za snimanje P valova i isto toliko horizontalnih geofona frekvencije 10 Hz za snimanje S valova. Geofonski razmak iznosio je 3 m. S valovi generirali su se s obje strane metalne konstrukcije tako su se njihovi seizmogrami razlikovali za π pomak u fazama. Iz tako dobivenih snimaka bilo je moguće precizno i nedvosmisleno određivanje vremena prvih nailazaka S valova. Podaci mjerenja su interpretirani WET metodom iz paketa Rayfract 2.63 (Intelligent Resources Inc.).

Ograničenje refrakcijske metode je očekivanje porasta brzine seizmičkih valova s dubinom. Zbog toga nije moguća interpretacija sloja manje brzine ispod sloja veće brzine. To se najčešće rješava dovoljno velikim offsetom ili pomakom rubnih izvora tako da se dosegne temeljna stijena ili osnovni sloj najveće brzine.

Tomografski prikaz brzina P valova omogućuje određivanje položaja vodonosnog horizonta na dubini od 4÷5 m. Pogodan primjer za takvu interpretaciju je lokacija vodocrpilišta Varaždin, Slika 12. Ovisno o zbijenosti, brzine v_p u suhom pijesku i šljunku mogu imati vrijednosti u intervalu 300÷1000 m/s, dok vodom saturirani šljunak može imati brzine 1500÷2700 m/s. Podzemna voda predstavlja problem u interpretaciji, jer čini barijeru koja sprečava detekciju nailazaka P valova s dubljih refraktiranih slojeva. Na S valove podzemna voda nema utjecaj te time omogućava bolju razlučivost različitih geoloških slojeva, a time i njihovu krutost. Zanimljivo je da u navedenom primjeru na vodocrpilištu, dubinski zahvat S valova nije veći od dosega P valova koji nose manje energije. Dapače, znatno je manji, ali je razlučivost gornje zone do dubine 10 m znatno veća, odnosno bolja. Izravnim mjerenjem brzina S valova, brzine od 300 m/s se dostižu već na dubinama od 4 m i rastu s dubinom.

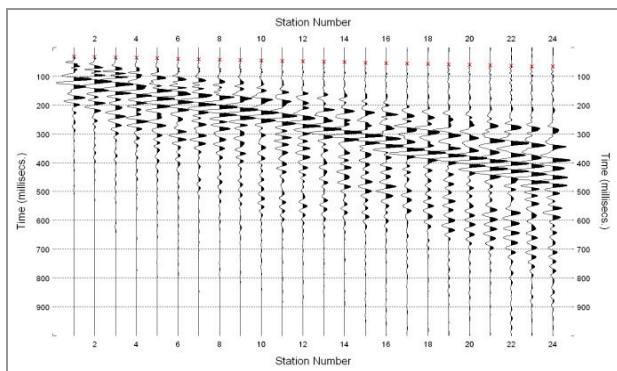


Slika 12. 2D prikaz brzina P valova na lokaciji vodocrpilišta Varaždin



Slika 13. 2D prikaz brzina S valova na lokaciji vodocrpilišta Varaždin

Amplitude prvih nailazaka P valova, označene crvenim markerima na seizmogramu, pokazuju da uzdužni P valovi nose znatno manji dio energije izvora, za razliku od kasnijih površinskih R valova koji imaju osjetno veće amplitude, Slika 14. To svojstvo značajno otežava njihovo pikiranje, naročito ako se mjerenja izvode u okolini opterećenoj seizmičkim smetnjama.



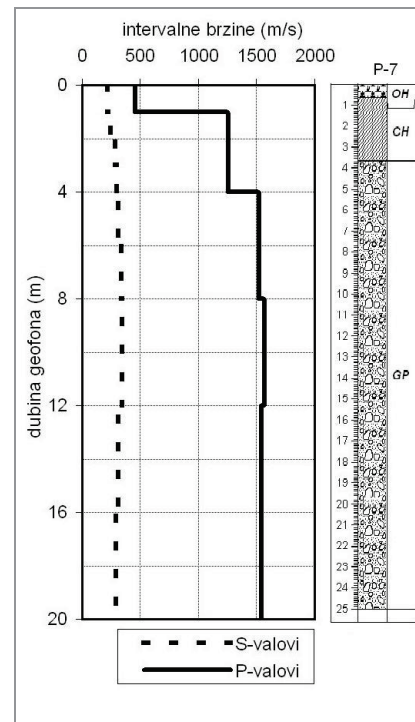
Slika 14. Seizmogram prostornih P valova i površinskih R valova

6.3. Down-hole metoda

Down-hole bušotinska seizmička metoda se primijenila samo na odlagalištu, jer je na toj lokaciji već postojao piezometar pogodan za mjerene brzine P i S valova. Koristio se tro-komponentni Borehole Pick M3049 geofon (OYO Instruments). Rezultati tog mjerenja su trebali potvrditi odnos brzina P i S valova u potpuno saturiranim šljuncima, odnosno u suhim šljuncima. Vrijednosti intervalnih brzina P i S valova uspoređene su s vrijednostima P i S refrakcijskih interpretacija, a pokazuju slične vrijednosti i trendove promjena kao i brzine određene SASW i MASW metodama. Sondažni profil istražnog bušenja se razmjerno dobro poklapa s down-hole profilom brzina, Slika 15.

Ispod sloja humusa zaliježe glina do 3.8 m, a dublje je nabušen slabo graduirani šljunak. Za vrijeme ispitivanja razina podzemne vode je bila na 3.92 m ispod razine površine terena. Utjecaj podzemne vode na brzinu P valova uočen je i u mjerenjima down-hole metodom. Zbog toga su se vrijednosti dinamičkih konstanti

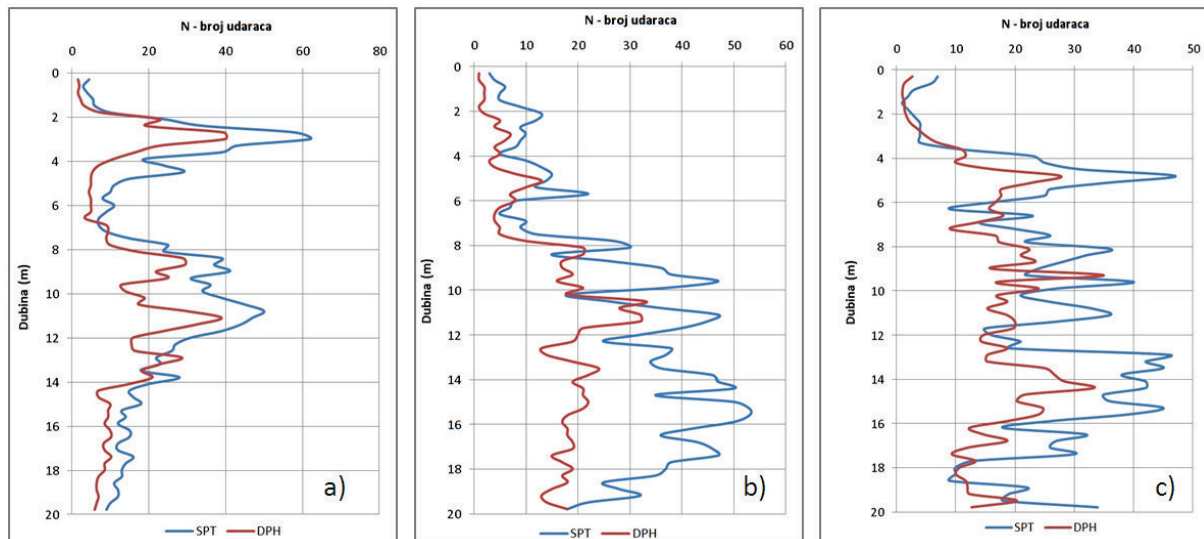
elastičnosti korigirale prema empirijskom odnosu $v_p/v_s=1.8$ u šljunkovitim materijalima (Castagna, 1985). Iz takvog se empirijskog omjera može odrediti korigirana vrijednost Poissonovog koeficijenta ≈ 0.31 , kao što prikazuje Tablica 2. Dinamičke intervalne konstante elastičnosti se proračunavaju iz intervalnih brzina, odnosno brzina koje se određuju za pojedini interval dubine omeđen dvama uzastopnim pozicijama geofona u bušotini.



Slika 15. Intervalne brzine određene down-hole metodom i usporedba sa sondažnim profilom

Tablica 2. Dinamičke intervalne konstante elastičnosti

Dubina geofona (m)	Dinamičke intervalne konstante elastičnosti				
	Poissonov koeficijent		Youngov modul	Modul posmika	Mod. obj. elastičn.
	$\nu_{dyn. (-)}$	$\nu_{dyn. (-)}$ korigiran	$E_{dyn. (MPa)}$	$G_{dyn. (MPa)}$	$K_{dyn. (MPa)}$
1	0,353	0,353	237	88	269
2	0,481	0,308	282	108	245
3	0,474	0,308	384	147	334
4	0,471	0,308	430	164	374
6	0,479	0,308	457	174	397
8	0,475	0,308	552	211	481
12	0,475	0,308	571	218	497
16	0,479	0,308	471	180	410
20	0,482	0,308	406	155	353



Slika 16. Dijagrami broja udaraca N_{SPT} i N_{DPH} na lokacijama: a) vodocrpilište, b) Zagrebačka ulica, c) odlagalište

SPT i DPH dinamički penetracijski pokusi su izvedeni na svim lokacijama. Kroz pozicije dinamičkih sonde kasnije su postavljeni MASW i SASW dispozitivi radi analize promjena otpora prodoru šiljka u odnosu na brzine S vala. Istovremeno su zanimljive i SPT – DPH korelacije, odnosno korelacije diskretnog SPT pokusa u kojem se broje udarci za penetraciju sonde od 30 cm pri padu utega od 63 kg s visine 76 cm u određenim točkama sondažnog profila i kontinuiranog DPH pokusa u kojem se broje udarci za penetraciju sonde od 10 cm pri padu utega od 50 kg s visine 50 cm. Iz usporednih dijagrama odnosa broja udaraca po dubini na istražnim lokacijama, Slika 16, izražen je korelacijski odnos SPT – DPH za svaku lokaciju, Slika 17, 18 i 19.

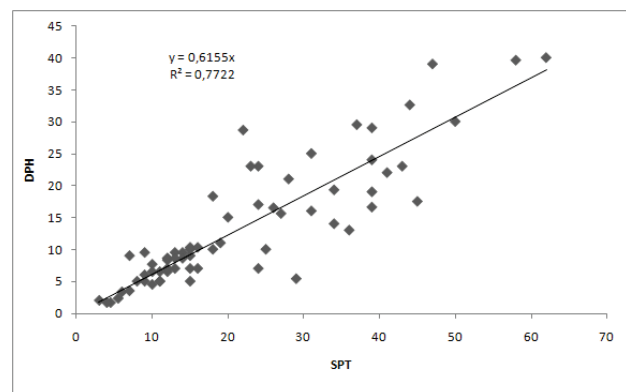
Uočeni odnos može se izraziti relacijom:

$$N_{DPH} = C N_{SPT} \quad (0.5 \leq C \leq 0.6). \quad (9)$$

Budući da su mjerenja i korelacije izvedene samo za krupnozrne šljunkove i šljunkovite materijale, ustanovljena diskrepancija brojeva N_{SPT} i N_{DPH} kao i osjetno rasipanje podataka nije iznenađujuće. Korelacija SPT i DPH broja udaraca koju navodi Spagnoli (2008) ima isti oblik, a $C = 0.5$ (u izvornim oznakama: $N_{10H} = 0.5 N$). Autor navodi utjecaje raznih faktora koji doprinose znatnoj disperziji rezultata SPT i DPH proba.

Pokazalo se da su bolje korelacije u pjeskovito prašinastim materijalima. Uzrok značajnijih odstupanja u broju SPT i DPH udaraca je pojava valutica šljunka većih dimenzija u odnosu na promjer sonde, zbog čega se otpor prodoru znatno poveća. Krivulja sondiranja u takvim sredinama ima primjetne skokove vrijednosti broja udaraca pa naizgled ne prati očekivani trend blagog porasta s dubinom. Očito je da u nevezanim sedimentima granulometrijski sastav može biti jedan od glavnih uzroka značajnoj disperziji podataka i značajnijim odstupanjima po dubini.

7. ODNOS v_s - N_{SPT} i v_s - N_{10H}



Slika 17. Korelacija $N_{10H} = f(N)$ za lokaciju Vodocrpilište

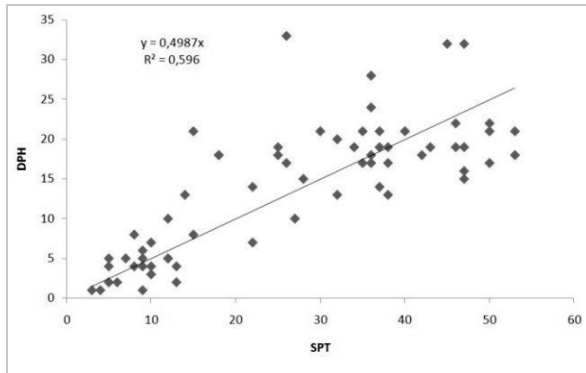
Brzina v_s posmičnih valova i broj udaraca penetracijskih pokusa N_{SPT} ili N_{10H} ukazuju na isto važno svojstvo geomedija, a to je krutost. Prema tome bi korelacija između ova dva parametra trebala biti opravdana. U literaturi postoji velik broj korelacija eksperimentalnih mjerenja, a opći oblik funkcijske ovisnosti je uglavnom eksponencijalni (Hanumantharao, 2008):

$$v_s = AN^B \quad (10)$$

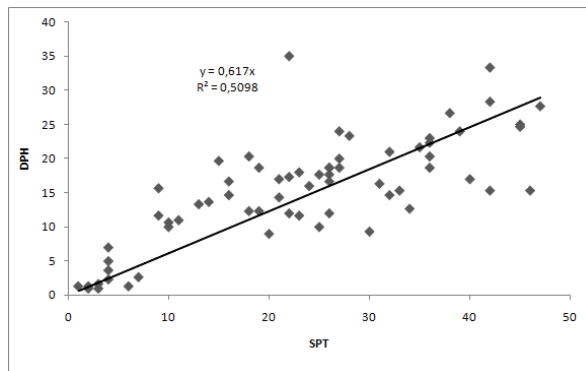
Prilikom interpretacije regresijske analize, osim regresijskog koeficijenta r , vrlo je značajan i koeficijent determinacije $R = r^2$. Po definiciji, koeficijent determinacije je varijanca procjene kriterijske varijable, a može se interpretirati kao mjera efikasnosti regresije, odnosno uspješnosti prognoze.

U obliku korelacije prema izrazu 10, A i B su konstantne vrijednosti koje se određuju eksperimentalno, a često su lokalno specifične pa se uz njih prikazuje i

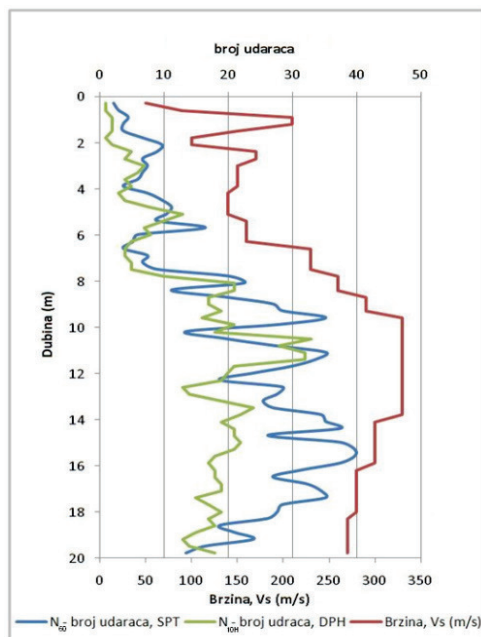
kvadratno odstupanje R^2 . U ovom radu je također primijenjen eksponencijalni oblik odnosa, a primjer dijagrama brzine v_s posmičnih valova i broja udaraca penetracijskih pokusa prikazuje Slika 20. Broj SPT udaraca se radi usporedbe s DPH vrijednostima korigirao na broj N_{60} .



Slika 18. Korelacija $N_{10H} = f(N)$ za lokaciju Zagrebačka ulica



Slika 19. Korelacija $N_{10H} = f(N)$ za lokaciju Odlagalište

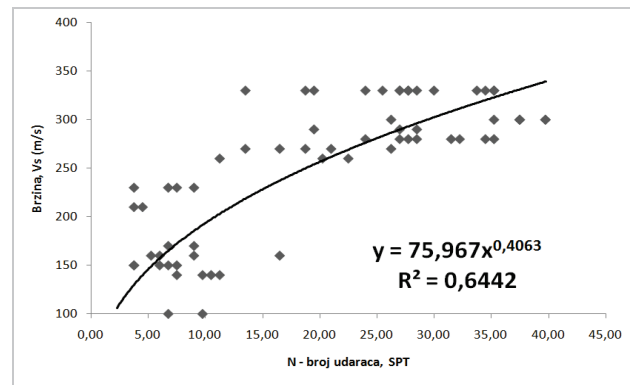


Slika 20. Dijagram odnosa brzine v_s i broja udaraca N_{60SPT} i N_{10H} (lokacija b) Zagrebačka ulica

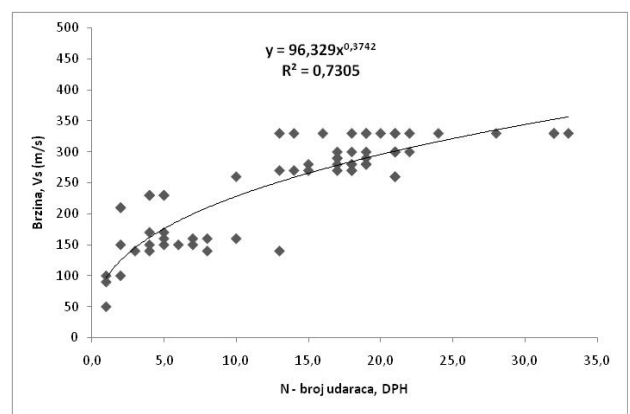
Prikazani dijagram je bio model za analizu rezultata mjerenja na svim lokacijama i izdvajanje korelacija v_s - N_{60SPT} , odnosno v_s - N_{10H} . Slika 21 prikazuje korelaciju v_s - N_{60SPT} , dok Slika 22 prikazuje korelaciju v_s - N_{10H} za krupnozrne šljunkovite materijale:

$$v_s = 76 N_{60SPT}^{0.4} \quad (R^2 = 0.64) \quad (11)$$

$$v_s = 96 N_{10H}^{0.37} \quad (R^2 = 0.73) \quad (12)$$



Slika 21. Korelacija $v_s = f(N_{60SPT})$ za istraživane krupnozrne šljunke



Slika 22. Korelacija $v_s = f(N_{10H})$ za istraživane krupnozrne šljunke

Ustanovljeno je da promjene DPH udaraca u krupnozrnim šljunkovitim materijalima bolje prate promjene brzine v_s po dubini.

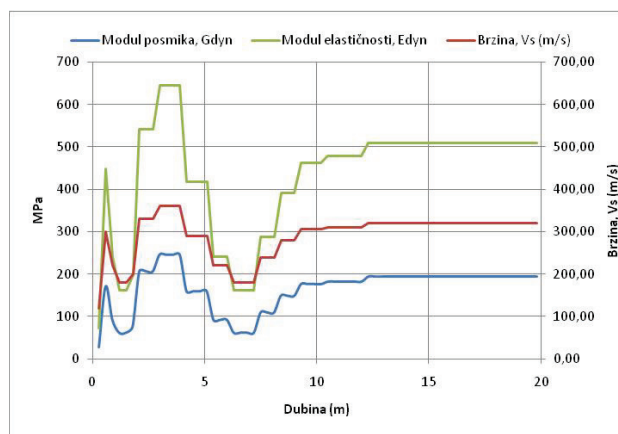
Dinamičke konstante elastičnosti G_{dyn} i E_{dyn} se mogu izračunati iz poznate brzine posmičnih valova V_s i gustoće ρ prema izrazima iz teorije elastičnosti (5) i (6). Model tla definiran kao model seizmičke sredine poznatih vrijednosti brzina v_s se može zbog toga transformirati u model dinamičkih modula elastičnosti i posmika koji se u tlu mijenjaju po dubini. Slika 23 prikazuje primjer takvog modela tla.

8. ZAKLJUČAK

Površinski Rayleighovi valovi generiraju se na isti način kao i P valovi, a budući da prenose najveći dio energije izvora ($\approx 70\%$), lako se detektiraju.

Tablica 3. Usporedba različitih metoda klasifikacije tla (modificirano prema Anbazhagan, 2014)

OPIS	GEOLOGIJA I GEOMORFOLOGIJA	PENETRACIJA		GEOFIZIČKE METODE		
		SPT	DPH	DOWN-HOLE	SASW	MASW
Utrošeni napor	-	veliki/srednji		veliki	mali	mali
Bušenje	-	nužno/ne		nužno	ne	ne
Cijena	mala	velika/umjerena		velika	mala	umjerena
Trajanje	dugo	dugo/srednje		srednje	kratko	kratko
Kvaliteta podataka	slaba	dobra		vrlo dobra	dovoljna	vrlo dobra
Otkrivanje promjena u sedimentima	slabo	dobro		vrlo dobro	dobro	vrlo dobro
Pogodne vrste tla	sva	nekoherentna		sva	sva	sva
Dubina za mikrozoniranje	slaba	dobra		dobra	dobra	vrlo dobra
Mjerenje dinamičkih svojstava	slabo	dovoljno		dobro	dobro	vrlo dobro
Uspješno izvedenih slučajeva	malo	mnogo		mnogo	mnogo	vrlo mnogo



Slika 23. Funkcijska ovisnost modula posmika i modula elastičnosti o brzinama posmičnih valova

Rezultat interpretacije je brzina širenja posmičnih valova v_s . Ovaj parametar je iznimno važan u geotehnici i inženjerskoj seizmologiji. Vrlo se teško određuje pomoću klasičnih seizmičkih metoda, jer posmične valove nije lako generirati, a zbog seizmičkih smetnji otežano je i pikiranje prvih nailazaka.

Uslojenost tla i debljine slojeva mogu se korektno odrediti SASW i MASW metodama koje se baziraju na analizi površinskih valova. Razlika ovih metoda je u načinu prikupljanja podataka na terenu i načinu njihove obrade. MASW je brža i jednostavnija metoda zbog višekanalnog pristupa kod kojeg nije potrebno mijenjati raspored geofona. Iz istog je skupa mjernih podataka moguća interpretacija brzina P i S valova te 1D, 2D ili

čak 3D profiliranje. MASW interpretacije dubina i debljina slojeva tla ili stijena se uglavnom dobro poklapaju s podacima istražnog bušenja kao i s podacima penetracijskog sondiranja.

Istraživanja opisana u ovom radu su potvrdila da se MASW metoda može jednako uspješno primijeniti za stratificiranje kao i za određivanje dinamičkih svojstava pojedinih slojeva tla u vrlo kratkom vremenu uz minimalne troškove. Zbog svojih prednosti, primjena ove neinvazivne metode posebno je pogodna za geotehnička istraživanja velikog opsega kao što su odlagališta otpada, hidrotehničke građevine, eksploatacijska polja i slično.

Istraživanjem je potvrđena i redefinirana relacija između brzine širenja posmičnih valova i broja udaraca standardnog penetracijskog pokusa u krupnozrnim šljuncima. Na korelaciju u takvim formacijama u znatnoj mjeri utječe postotak valutica većeg promjera. Pojava takvih valutica zamjetno povećava broj udaraca kod svih vrsta dinamičkih sondiranja.

Vrijednosti prosječnih brzina $v_{s,30}$ posmičnih valova u krupnozrnim šljuncima istraživanog područja su bile u intervalu 260÷320 m/s. Prema tome istraživano se područje po Eurokodu 8 klasificira u C kategoriju tla što je u skladu s rezultatima ostalih istraživanja i geološkim opisom lokacija.

Uspješnost primjene penetracijskih i geofizičkih metoda u geotehničkoj praksi prikazuje Tablica 3. MASW metoda ima brojne prednosti u određivanju dinamičkih svojstava tla u odnosu na klasične metode.

9. LITERATURA

ABEM Instruction Manual (1989), Atlas Copco ABEM AB, Švedska.

Anbazhagan P, Probabilistic Approach for Seismic Microzonation - Geotechnical Issues, <<http://www.civil.iisc.ernet.in/~anbazhagan/J-8.pdf>>, 25.12.2009.

Castagna J P, Batzle M L, Eastwood R L (1985) Relationship between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks. *Geophysics* 50 4, 571-581

Crosshole Seismic Methods Per ASTM Standard, <http://www.microgeo.com/detailed_discussions/dm7.html>, 21.04.2010.

Hanumantharao C, Ramana G V (2008) Dynamic soil properties for microzonation of Delhi, India. *Journal of Earth System Science* 117 S2, 719-730

Heisey J S, Stokoe II K H, Meyer A H (1982) Moduli of pavement systems from Spectral Analysis of Surface Waves. *Transp. Res. Rec.* 852, 22-31

HRN EN 1997-2:2008, Eurokod 7: Geotehničko projektiranje - 2.dio. Istraživanje i ispitivanje temeljnoga tla (EN 1997-2:2007).

HRN EN 1998-1:2011, Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija – 1. dio. Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade (EN 1998-1:2004).

Luna, R., H. Jadi (2000) Determination of Dynamic Soil Properties Using Geophysical Methods, Proceedings of the First International Conference on the Application of Geophysical and NDT Methodologies to Transportation Facilities and Infrastructure, St. Louis, MO

Park C B, Multichannel analysis of surface waves (MASW), <www.masw.com>, 21.04.2010.

Park, C B, Miller R D, Ryden N, Xia J, Ivanov J (2007) Multichannel analysis of surface waves (MASW) - active and passive methods. *The Leading Edge* 26 1, 60-64

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

Park C B, Miller R D, Xia J (1998) Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record. *Soc. Explor. Geophys.*, 1377-1380

Premur V, Đurin M, Kaniški M (2004) Izvješće o izradi pijezometara P-7, P-8, P-9 i P-10 pored deponija u Knegincu. Premur d.o.o., Varaždin

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.

Szavits-Nossan, V., Kovačević, M.S., Szavits-Nossan, A. (1999) Posmična krutost i deformacije tla: novi pogledi, *Građevinar* 51, 12; 783-792.

Spagnoli G (2008) An empirical correlation between different dynamic penetrometers. *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering* 13 C, 1-11

Stokoe K H II, Wright S G, Bay J A, Roesset JM (1994) Characterization of geotechnical sites by SASW method, in *Geophysical characterization of sites*. Oxford Publishers, New Delhi.

Telford W M, Geldart L P, Sheriff R E, Keys D A (1990) *Applied Geophysics*, 2nd edition, Cambridge Univ. Press., Cambridge.

Zonge International, Inc.: Crosshole Seismic Methods per ASTM Standard, <http://www.microgeo.com/detailed_discussions/dm7.html>, 24.01.2014.

Xia J, Miller R D, Park C B (2000) Advantages of calculating shear-wave velocity from surface waves with higher modes. *Soc. Expl. Geophys.*, 1295-1298