

PROCJENA FAKTORA POBOLJŠANJA TLA PRIMJENOM MASW-A

ASSESSMENT OF SOIL IMPROVEMENT FACTOR USING MASW

Filip Dodigović^{1*}, Kristijan Grabar², Krešo Ivandić¹, Stjepan Strelec¹

¹ Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, 42 000 Varaždin, Republika Hrvatska

² SPP d.o.o., Trstenjakova 3, 42 000 Varaždin, Republika Hrvatska

*E-mail adresa osobe za kontakt / e-mail of corresponding author: fdodigov@gfv.hr

Sažetak: U slučajevima temeljenja, u kojima vrijednosti slijeganja i računске otpornosti tla ne zadovoljavaju tražene kriterije, potrebno je poduzeti mjere kako bi se iste dovele unutar prihvatljivih granica. Jedna od metoda koje se primjenjuju u takvim slučajevima je poboljšanje tla izvedbom šljunčanih pilota. Njihovom izvedbom stvara se kompozitni sustav sastavljen od tla i šljunčanih stupnjaka, čija su geotehnička svojstva povoljnija u odnosu na netretirano tlo. U fazi projektiranja procjenjuje se vrijednost stupnja poboljšanja tla ostvarenog njihovom ugradnjom. Jedna od dostupnih teorijskih metoda koja se primjenjuje u izračunavanju stupnja poboljšanja tla je Priebe-ova metoda. Parametar dobiven upotrebom navedene metode, iz kojeg se ocjenjuje rezultira li ugradnja stupnjaka zadovoljavajućim poboljšanjem je konačni stupanj poboljšanja tla „n₂“, koji se aplicira na geotehničke parametre čvrstoće i stišljivosti tla. Stupanj poboljšanja tla može se procijeniti i iz rezultata seizmičkih istražnih radova, koji su provedeni prije i nakon izvedenog poboljšanja. U ovom radu analiziran je slučaj temeljenja, u kojem je tlo poboljšano ugradnjom šljunčanih pilota. U svrhu analize njihovog međusobnog odnosa, stupanj poboljšanja određen je za sve slojeve tla primjenom Priebe-ovog postupka, te iz provedenog seizmičkog istraživanja. Glavni cilj ovog rada je istraživanje potencijalne korelacije između stupnja poboljšanja tla dobivenog primjenom teorijskog modela i onog dobivenog iz in-situ istraživanja.

Ključne riječi: poboljšanje tla, šljunčani piloti, MASW, Priebe-ova metoda

Abstract: In cases of foundation design, when values of allowable settlement and soil resistance to failure do not meet the design criteria, measures must be taken in order to bring them within the acceptable limits. A method that can be applied to the ground in such cases is stone columns installation. By doing so, a composite system with improved geotechnical properties is formed in the ground. In the design stage, it is necessary to estimate a factor of improvement that will be achieved after the ground is treated. A commonly used method that is used in the estimation is developed by Heinz J. Priebe. A final parameter obtained in the calculation according to the method, which evaluates an improvement of a single soil layer is denoted as a final improvement factor “n₂”. The improvement factor can be estimated from seismic In-situ investigations, which are carried out before and after the ground treatment. In this paper, a case in which the ground was treated by stone columns is analyzed. The improvement factor is estimated for all soil layers both from Priebe's method and from seismic MASW survey. Then, a comparison between these values has been made. The main goal of this paper is to explore a potential correlation between improvement factor calculated using theoretical model and one measured In-situ, based on the available information from a specific case.

Keywords: soil improvement, stone columns, MASW, Priebe's method

Received: 01.10.2018. / Accepted: 27.11.2018.

Published online: 17.12.2018.

Stručni rad / Technical paper

1. UVOD

Geotehničke karakteristike temeljnog tla, djelovanja koja se s građevina prenose na tlo i vrsta konstrukcije, u većini zadaća temeljenja najrelevantniji su podaci na osnovu kojih se donose odluke o vrsti i načinu temeljenja. U pojedinim slučajevima, za koje je dokazano da proračunate vrijednosti pojedinih djelovanja ili učinaka djelovanja ne zadovoljavaju projektne kriterije, poduzimaju se radnje kako bi se iste svele unutar željenih granica. Zadovoljavanje projektних kriterija odnosi se na kontrolu graničnih stanja kojima se provjerava ima li projektirana konstrukcija odgovarajuću konstrukcijsku otpornost, uporabljivost i trajnost (HRN EN 1990:2011, 2011).

U ovom radu dan je primjer u kojem temeljno tlo nije zadovoljavalo kriterije u pogledu otpornosti na slom i dozvoljenog slijeganja. Radi navedenog, pristupilo se analizi odabira načina temeljenja u danim uvjetima. Uzimajući u obzir tehničke i ekonomske čimbenike, odabrana je metoda poboljšanja tla izvedbom šljunčanih pilota. U daljnjem tekstu istražuje se mogućnost upotrebe MASW-a u procjeni stupnja poboljšanja tla ostvarenog izvedbom šljunčanih pilota.

2. DEFINIRANJE PROBLEMA

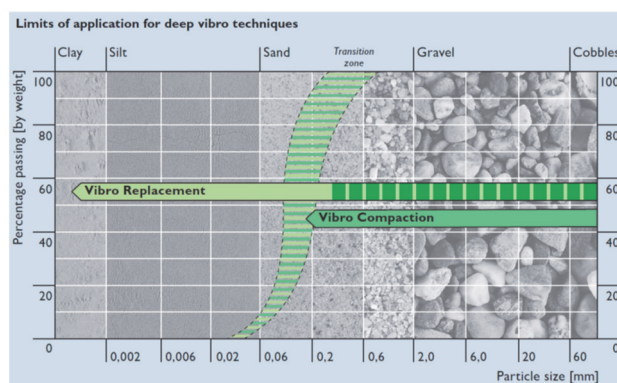
Poboljšanjem tla metodom šljunčanih pilota, određeni volumen tla zamjenjuje se šljunčanim vertikalnim stupnjacima približno kružnog poprečnog presjeka. Njihovom ugradnjom nastaje kompozitni sustav, prosječno veće gustoće, čvrstoće, i stišljivosti, u odnosu na netretirano tlo. Osim navedenog, u materijalima niske vodopropusnosti, izvedba šljunčanih pilota dovodi do ubrzanja procesa konsolidacije.

U izradi geotehničkog projekta poboljšanja tla, primjenom teorijskih modela procjenjuje se stupanj poboljšanja za dani projektni zadatak. Uzimajući u obzir pretpostavke koje stvarno stanje u tlu zamjenjuju idealiziranim modelima, nameće se pitanje razlike u vrijednostima stupnja poboljšanja dobivenog na taj način i stvarno postignutog.

Glavni cilj ovog rada je istraživanje odnosa između ta dva stupnja poboljšanja, teorijskog i izmjerenog *in-situ*. Teorijski stupanj poboljšanja izračunat je primjenom Priebe-ove metode, temeljem geotehničkih istražnih radova. Za procjenu stvarnog stupnja poboljšanja odabrana je MASW (*višekanalna analiza površinskih valova*) metoda. Rezultat te metode, prikaz je raspodjele brzine širenja posmičnih valova (v_s) u tlu po dubini. Istražni radovi provedeni su prije i nakon ugradnje šljunčanih pilota, te je na osnovu promijene brzine širenja posmičnih valova donesena ocjena o stupnju poboljšanja.

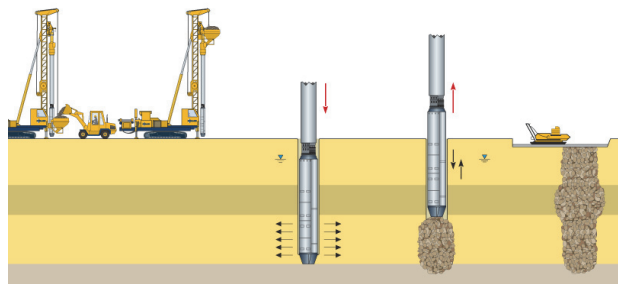
3. IZVEDBA ŠLJUNČANIH PILOTA

Postupak poboljšanja tla šljunčanim pilotima (eng. Vibro Replacement) pogodan je za primjenu u koherentnim materijalima te u nekoherentnim materijalima s visokim udjelom finih čestica (**Slika 1**). Za poboljšanje nekoherentnih materijala sa zanemarivim udjelom finih čestica udjelom primjereniji je postupak vibracijskog zbijanja (eng. Vibro Compaction).



Slika 1. Primjena metoda poboljšanja tla šljunčanim pilotima (eng. Vibro Replacement) i vibracijskog zbijanja (eng. Vibro Compaction) s obzirom na granulometrijski sastav tla (preuzeto s www.kellerholding.com)

Izvedba se provodi spuštanjem vibratora do projektom predviđene dubine, nakon čega se on podiže uz nasipavanje šljunčanog materijala. Dostizanjem željene visine, nasipani materijal se zbjija upotrebom vibratora, uslijed čega se utiskuje u okolno tlo. Kada je postignuta tražena zbijenost, postupak se ponavlja do dostizanja visine projektiranog vrha stupnjaka. Dubinski vibrator je u obliku cilindra, promjera 30 do 50 cm, dužine 3 do 4 m, ovisno o tipu, te mase cca 2 tone. U donjem dijelu vibratora, odmah iza šiljka, nalazi se ekscentrična masa s okretnim pogonom od elektromotora (snage 150 kW). Na taj način se proizvodi rotacijski udar velike energije. Dubinski vibrator spušta se pomoću produžnih cijevi do proizvoljne dubine, a vođenje osigurava posebni uređaj (Vitković i Ivandić, 2016). Na **Slici 2** prikazan je način ugradnje šljunčanih pilota.



Slika 2. Shematski prikaz izvedbe šljunčanih pilota (preuzeto s www.kellerholding.com)

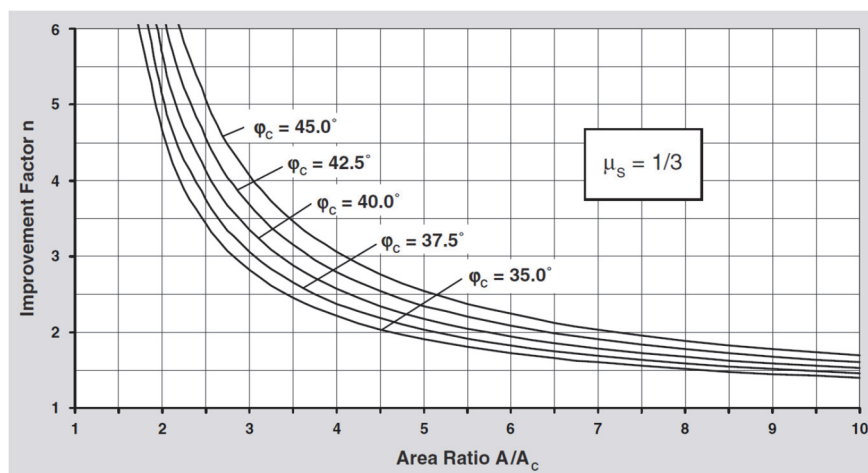
4. ODREĐIVANJE STUPNJA POBOLJŠANJA TLA PRIEBE-OVOM METODOM

Metodu procijene slijeganja i nosivosti tla poboljšanog izvedbom šljunčanih pilota, razvio i publicirao je Heinz J. Priebe 1976. godine, a od tada je nad njom izvršeno nekoliko prilagodbi, proširenja i nadopuna. U daljnjem tekstu dan je pregled izračuna stupnja poboljšanja tom metodom (Priebe 1995).

Ugradnjom šljunčanih stupnjaka u tlo, nastaje kompozitni sustav geotehničkih svojstava različitih od svojstava tla prije provedbe poboljšanja. U proračunu, teoretski se razmatra neograničena opterećena površina na neograničenom rasteru stupnjaka. Jediničnu ćeliju rastera površine A_c čini jedan stupnjak površine A i tlo koje ga okružuje.

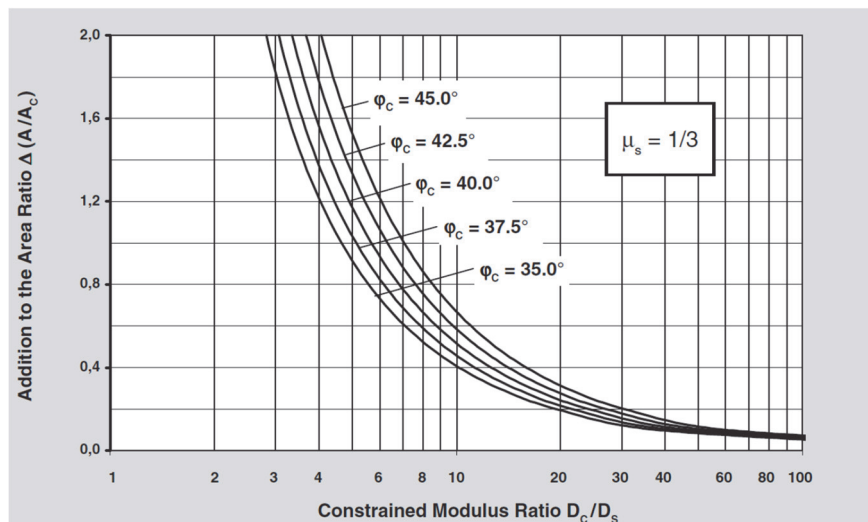
U prvom koraku proračuna, određuje se stupanj poboljšanja tla radi ugradnje i efekata ugradnje šljunčanih stupnjaka. Provedenim proračunom dobiva se osnovni stupanj poboljšanja, koji je izražen faktorom n_0 (Slika 3). Za potrebe njegovog proračuna uvedene su sljedeće pretpostavke:

- Stupnjak je temeljen u krutom materijalu
- Materijal stupnjaka je nestišljiv
- Zanemarena je gustoća stupnjaka i tla



Slika 3. Stupanj poboljšanja tla n_0 , u ovisnosti o omjeru površina A/A_c i kutu trenja materijala stupnjaka (preuzeto iz Priebe 1995)

U drugom koraku proračuna, u obzir se uzima stišljivost materijala stupnjaka. Traži se odnos površina presjeka stupnjaka i veličine rastera $(A/A_c)_1$ koji odgovara omjeru modula stišljivosti stupnjaka i tla D_c/D_s pri osnovnom faktoru poboljšanja n_0 . Stišljivost materijala stupnjaka aproksimira se upotrebom reduciranog faktora poboljšanja, n_1 . Navedeno se dobiva upotrebom formulacija za izračun osnovnog stupnja poboljšanja n_0 , kada je omjer površina A/A_c uvećan za iznos $\Delta(A/A_c)$ (Slika 4).



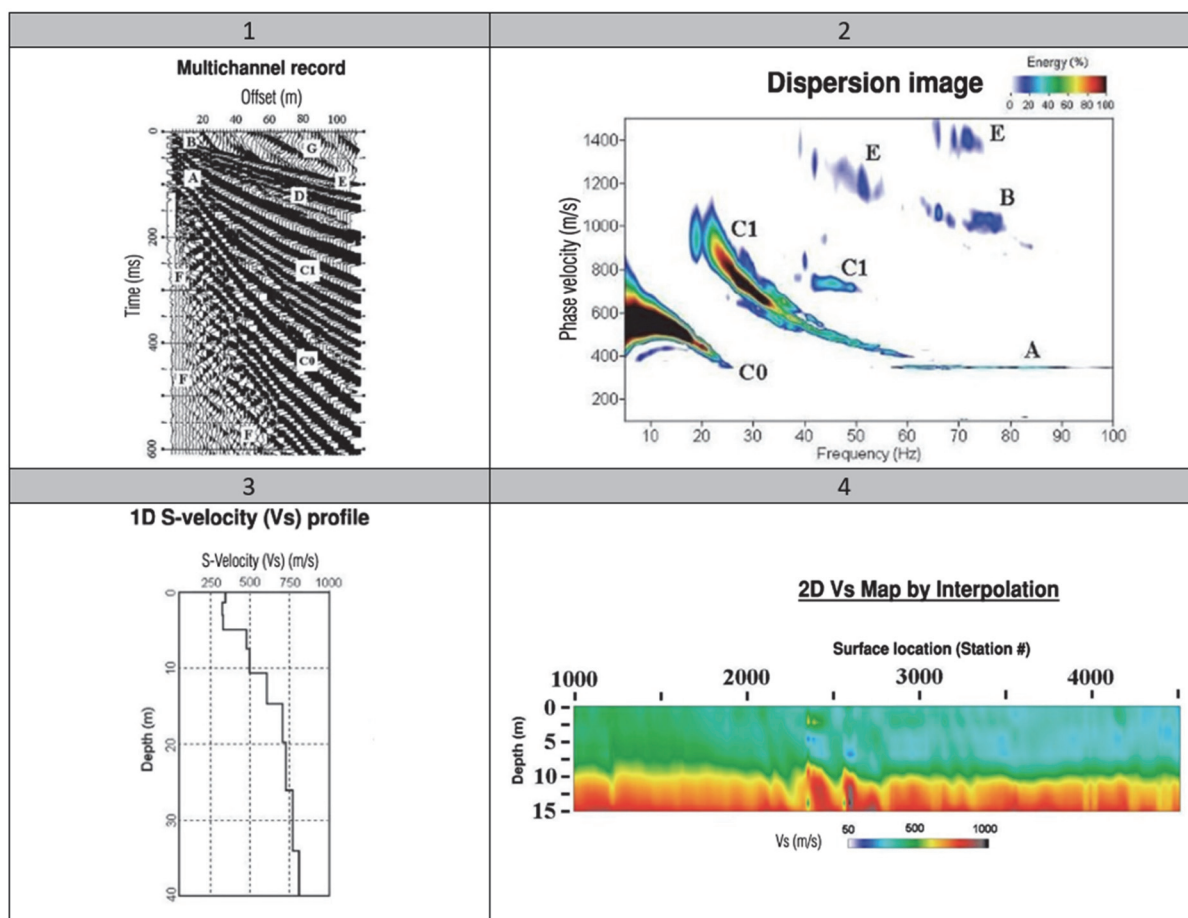
Slika 4. Stupanj poboljšanja tla n_1 , u ovisnosti o omjeru površina $\Delta(A/A_c)$ i omjeru stišljivosti materijala stupnjaka i tla D_c/D_s (preuzeto iz Priebe 1995)

U sljedećem proračunskom koraku, u proračun se uvodi gustoća tla i materijala stupnjaka. Zanimarivanje gustoće tla i materijala stupnjaka znači da razlika horizontalnih pritisaka između tla i stupnjaka ovisi samo o raspodjelu vanjskog opterećenja na stupnjak i tlo, te da je ona konstantna po čitavoj dužini stupnjaka. Osnovni motiv uvođenja gustoće je uzimanje u obzir stvarne raspodjele horizontalnih pritisaka između stupnjaka i tla. Budući da se ona linearno mijenja s dubinom, uvodi se faktor dubine f_d , koji povećava faktor n_1 dobiven u prethodnom koraku. Množenjem faktora f_d i n_1 dobiva se konačni faktor poboljšanja tla n_2 .

5. VIŠEKANALNA ANALIZA POVRŠINSKIH VALOVA, MASW

Višekanalna analiza površinskih valova (MASW, eng. Multi-channel Spectral Analysis of Surface Waves) ubraja se u seizmičke geofizičke metode. Konvencionalni pristupi seizmičkih površinskih istraživanja obično su ili seizmička refleksija visoke rezolucije ili refrakcija, kojima se postižu dubine u rasponu od nekoliko desetaka do nekoliko stotina metara. Seizmički signali iz tako provedenih istraživanja sastoje se od valova frekvencija većih od 50 Hz. U MASW metodi analiziraju se površinski valovi nižih frekvencija (npr. 1-30 Hz), te se dostižu mnogo manji rasponi dubina (npr. nekoliko metara do nekoliko desetaka metara) (Park i dr. 2007).

U odnosu na druge seizmičke metode, prednost MASW-a proizlazi iz činjenice da uzima u obzir složenu prirodu seizmičkih valova. U njihovom zapisu sadržane su smetnje i šumovi, kao i površinski valovi iz osnovnog moda. Ti valovi mogu često utjecati jedni na druge prilikom analize njihovih disperzijskih svojstava, ako nisu pravilno uzeti u obzir. Višekanalnim pristupom disperzijska svojstva svih vrsta valova su snimljena pomoću metode transformacije valnog polja, koja izravno pretvara višekanalnu snimku u sliku (Slika 5, 1), u kojoj se može prepoznati specifičan raspršeni uzorak u transformiranoj distribuciji energije. Zatim se neophodno disperzijsko svojstvo (poput onoga iz osnovnog moda) izvlači iz identificiranog uzorka (Slika 5, 2). Svi drugi reflektirani/rasuti valovi obično se automatski uklanjaju tijekom transformacije. Inverzijom disperzijskih krivulja dobiju se 2D profili brzina širenja posmičnih valova po dubini (Slika 5, 3). Primjenom odgovarajuće interpolacije, iz dobivenih profila konstruira se 2D prikaz širenja brzina posmičnih valova po dubini (Slika 5, 4).



Slika 5. Redoslijed obrade podataka u primjeni MASW metode

6. ANALIZA SLUČAJA PROIZVODNOG POGONA JEDINSTVO - KARTONAŽA U IVANCU

Na lokaciji proizvodnog pogona tvrtke „Jedinstvo - Kartonaža d.o.o.“ u Ivanču planirana je izgradnja nadstrešnice za potrebe obavljanje djelatnosti tvrtke. Tlocrtne dimenzije nadstrešnice iznose cca $51,5 \times 64,0$ m. Njena konstrukcija je montažna, armiranobetonska, a sastoji se od predgotovljenih greda i stupova, koji se polažu u „čšašice“ prethodno izvedenih temeljnih stopa. Izvedeni su geotehnički istražni radovi na osnovu kojih su identificirani slojevi tla i određene im pripadne vrijednosti relevantnih svojstava. Usvojen je model tla sastavljen od četiri geotehničke sredine (Tablica 1). U svrhu temeljenja, provedena je analiza slijeganja temeljne konstrukcije. Radi različitih djelovanja koja se sa stupova prenose na temeljne stope, one su podijeljene u 5 pozicija (T1-T5). Dobivene vrijednosti slijeganja za različite pozicije temeljnih stopa nalaze se u rasponu od cca 4 - 10 cm (Nadstrešnica za utovar i istovar kamenog materijala kartonske ambalaže - Ivanec, Izvedbeni projekt poboljšanja temeljnog tla, Izradio: GK Grupa d.o.o., travanj 2016.).

Tablica 1. Usvojeni model tla na lokaciji Kartonaža Ivanec

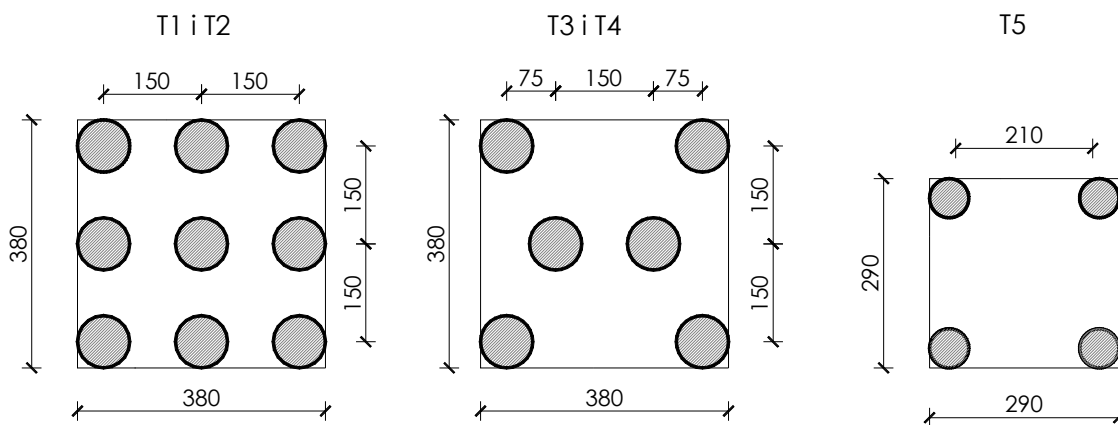
	Opis	Dubina [m]	γ [kN/m ³]	c' [kN/m ²]	ϕ' [°]	Mv [MN/m ²]
Geotehnička sredina 1	Nasip	1,0	20,0	0,0	30,0	10,0
Geotehnička sredina 2	Organsko tlo, treset, ugljen	3,5	12,0	2,0	22,0	2,0
Geotehnička sredina 3	Prah srednje / visoke plastičnosti	4,3	18,0	2,0	25,0	3,5
Geotehnička sredina 4	Glina srednje / visoke plastičnosti	>4,3	18,0	2,0	23,0	4,0

6.1 PROCJENA STUPNJA POBOLJŠANJA TLA PRIEBE-OVOM METODOM

Radi neprihvatljivih proračunskih vrijednosti slijeganja temelja, donesena je odluka o poboljšanju temeljnog tla izvedbom šljunčanih pilota. Oni se izvode ispod temeljnih stopa, a međusobni razmak, raspored i njihova geometrija (Slika 6) odabrani su s obzirom na značajke tla te veličinu djelovanja koje konstrukcija prenosi na tlo (Tablica 2).

Tablica 2. Podaci o stupnjacima u ovisnosti o poziciji temeljne stope

poz .	Tlocrtne dimenzije temelja	Dubina temeljenja	Kontaktno naprezanje	Broj stupnjaka ispod stope	Promjer stupnjaka	Duljina stupnjaka	Efektivni kut trenja	Modul stižljivosti
	[m]	[m]	[kN/m ²]	[kom]	[cm]	[m]	[°]	[MN/m ²]
T1 i T2	3,8 × 3,8	1,8	100,0	9	70	6,0	40,0	100,0
T3	3,8 × 3,8		71,0	6	70			
T4	3,8 × 3,8		66,0	6	70			
T5	2,9 × 2,9		50,0	4	60			



Slika 6. Dispozicija stupnjaka po pojedinim pozicijama temeljnih stopa

Prema metodologiji opisanoj u poglavlju 4, proveden je proračun stupnja poboljšanja tla nakon ugradnje šljunčanih pilota. Ulazni parametri korišteni u proračunu prikazani su u **Tablicama 1 i 2**. Proračun je proveden u programu „StoneC“ tvrtke „GeoLogismiki“. Za ocjenu stupnja poboljšanja koristi se parametar n_2 . Dani su rezultati proračuna za temeljne stope T2 i T4 (**Tablice 3 i 4**).

Tablica 3. Rezultat proračuna stupnja poboljšanja tla na mjestu temeljnih stopa T1 i T2 (ispis iz programa „StoneC“)

Footing name: T1 i T2

.: Calculation of soil improvement due to vibroreplacement .:												
No	Bottom depth (m)	n_0	Delta (A/A _c)	n_1	m_1	ϕ_{i1} (degrees)	c_1 (kPa)	f_d	n_2	m_2	ϕ_{i2} (degrees)	c_2 (kPa)
1	** Current layer has no stone columns ***											
2	** Current layer has no stone columns ***											
3	3.50	2.49	0.09	2.45	0.59	33.48	0.82	1.10	2.69	0.63	34.12	0.74
4	4.30	2.49	0.17	2.42	0.59	34.40	0.83	1.10	2.65	0.62	34.93	0.75
5	7.80	2.49	0.19	2.41	0.58	33.69	0.83	1.20	2.89	0.65	34.82	0.69

n_0 : Basic improvement factor
 Delta(A/A_c) : Value added to area ratio (due to column compressibility)
 n_1 : Soil improvement factor (due to column compressibility)
 f_d : Depth factor (due to overburden constraint)
 : (***) means f_d does not meet compatibility controls
 n_2 : Improvement factor (with overburden constraint)
 $m_{1,2}$: Proportional loads on columns (for n_1 and n_2 respectively)
 $\phi_{i1,2}$: Improved effective soil friction angle (for n_1 and n_2 respectively)
 $c_{1,2}$: Improved effective soil cohesion (for n_1 and n_2 respectively)

Tablica 4. Rezultat proračuna stupnja poboljšanja tla na mjestu temeljnih stopa T4 (ispis iz programa „StoneC“)

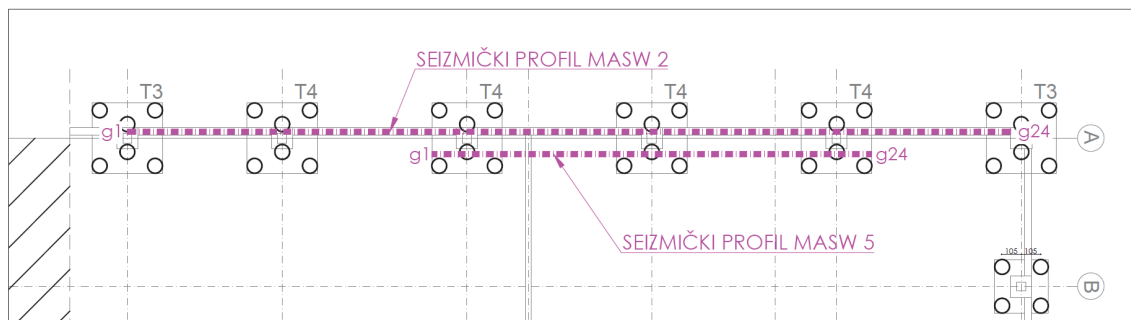
Footing name: T4

.: Calculation of soil improvement due to vibroreplacement .:												
No	Bottom depth (m)	n_0	Delta (A/A _c)	n_1	m_1	ϕ_{i1} (degrees)	c_1 (kPa)	f_d	n_2	m_2	ϕ_{i2} (degrees)	c_2 (kPa)
1	** Current layer has no stone columns ***											
2	** Current layer has no stone columns ***											
3	3.50	1.90	0.09	1.89	0.47	31.32	1.06	1.08	2.04	0.51	32.05	0.98
4	4.30	1.90	0.17	1.87	0.47	32.63	1.07	1.08	2.02	0.51	33.22	0.99
5	7.80	1.90	0.19	1.87	0.47	31.69	1.07	1.16	2.18	0.54	32.96	0.92

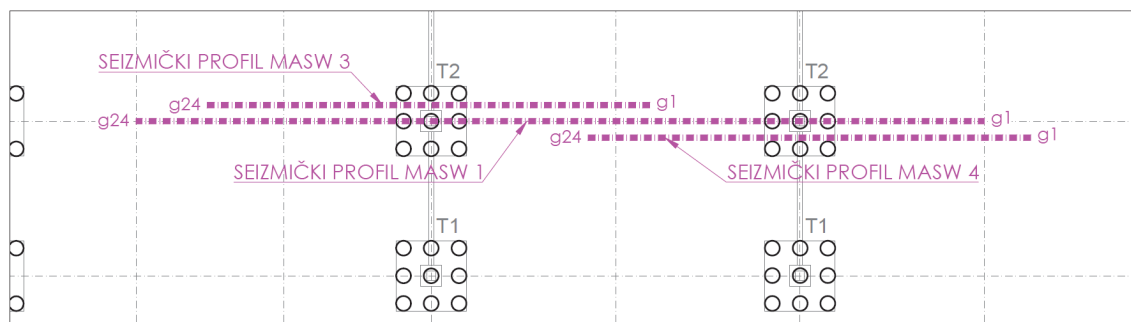
n_0 : Basic improvement factor
 Delta(A/A_c) : Value added to area ratio (due to column compressibility)
 n_1 : Soil improvement factor (due to column compressibility)
 f_d : Depth factor (due to overburden constraint)
 : (***) means f_d does not meet compatibility controls
 n_2 : Improvement factor (with overburden constraint)
 $m_{1,2}$: Proportional loads on columns (for n_1 and n_2 respectively)
 $\phi_{i1,2}$: Improved effective soil friction angle (for n_1 and n_2 respectively)
 $c_{1,2}$: Improved effective soil cohesion (for n_1 and n_2 respectively)

6.2 PROCJENA STUPNJA POBOLJŠANJA IZ REZULTATA MASW-A

Na predmetnoj lokaciji izvedeno je 5 MASW profila. Za potrebe procjene stupnja poboljšanja tla, 2 seizmička profila izvedena su prije izvedbe šljunčanih pilota (14.04.2016.), a tri profila nakon njihove izvedbe (22.04.2016.). Lokacije seizmičkih profila odabrane su na način da se njihovom interpretacijom što pouzdanije može odrediti razlika u brzini širenja posmičnih valova prije i nakon izvedenog poboljšanja tla. MASW dispozitiv sastojao se od 24 vertikalna geofona frekvencije 4.5 Hz, postavljena na međusobnom razmaku od 1,0 m, 2,0 m ili 3.0 m, i istovjetan je dispozitivu za snimanje plitke refrakcijske seizmike. Pri interpretaciji MASW mjerenja koristi se fundamentalni ili osnovni mod. Tlocrtna dispozicija svih seizmičkih profila prikazana je na **Slikama 7 i 8**.

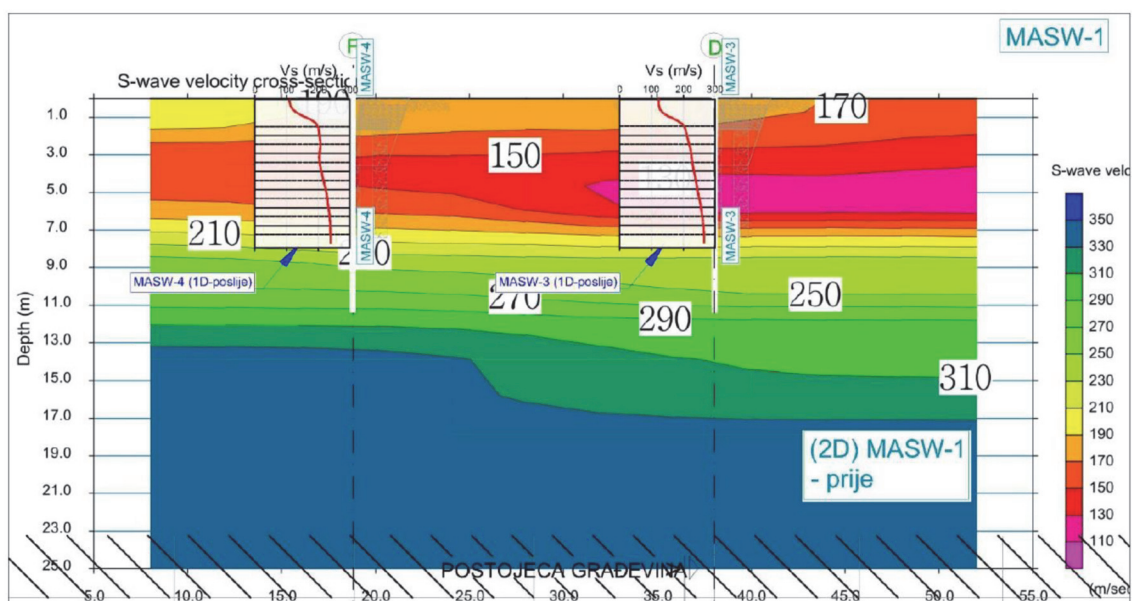


Slika 7. Tlocrtna dispozicija seizmičkih profila MASW 2 i 5

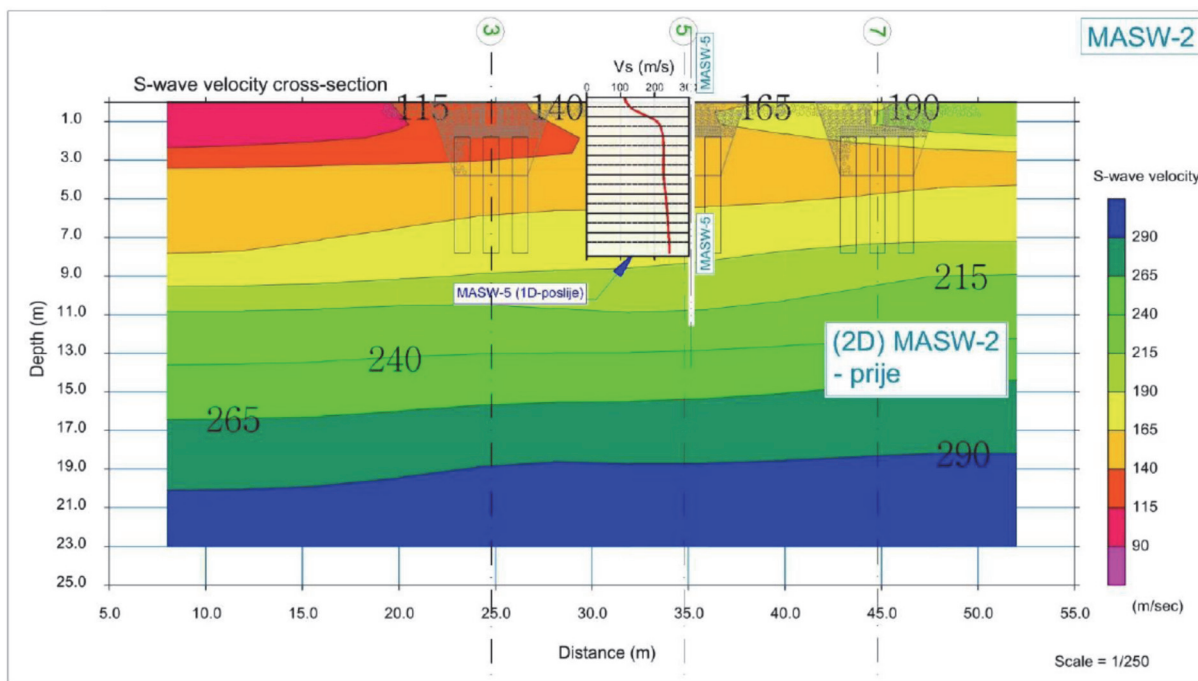


Slika 8. Tlocrtna dispozicija seizmičkih profila MASW 1, 3 i 4

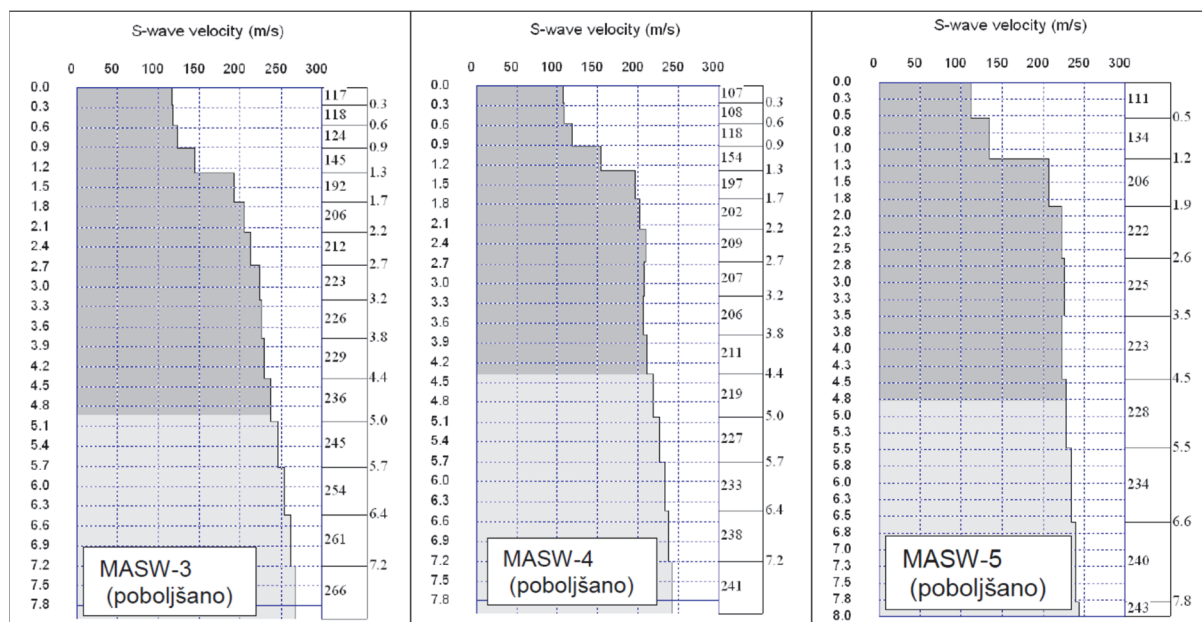
Interpretacija mjerene krivulje disperzije na lokaciji dispozitiva MASW profila provedena je koristeći računalni program SeisImager, OYO Corporation v. 4.0.1.6. Na **Slikama 9 i 10** daje se prikaz rezultata interpretacije MASW-a, odnosno brzina širenja posmičnih valova po dubini sondiranog tla.



Slika 9. Prikaz brzine širenja posmičnih valova po dubini duž profila MASW 1, izmjereno prije izvedenog poboljšanja (Izveštaj o mjerjenju posmičnih valova za potrebe utvrđivanja stupnja poboljšanja tla, 2016)



Slika 10. Prikaz brzine širenja posmičnih valova po dubini duž profila MASW 2, izmjereno prije izvedenog poboljšanja (Izvještaj o mjerjenju posmičnih valova za potrebe utvrđivanja stupnja poboljšanja tla, 2016)



Slika 11. Prikaz brzine širenja posmičnih valova po dubini u sredini profila MASW 3, 4 i 5, izmjereno nakon izvedenog poboljšanja (Izvještaj o mjerjenju posmičnih valova za potrebe utvrđivanja stupnja poboljšanja tla, 2016)

Temeljem Slika 9, 10 i 11 određene su prosječne vrijednosti brzina širenja posmičnih valova za svaki sloj tla, prije i nakon izvedenog poboljšanja tla. Na Slici 11 dan je prikaz promjena brzina širenja posmičnih valova u tlu po dubini (1D prikaz), koje su izmjerene nakon poboljšanja tla. Prikazane vrijednosti dobivene su interpretacijom iz inverzije pripadajućih disperzijskih krivulja.

Stupanj poboljšanja tla određen iz provedenih seizmičkih istražnih radova definiran je sljedećim izrazom:

$$K = \frac{G_{0,1}}{G_{0,0}} \quad (1)$$

gdje su:

- $G_{0,1}$ posmični modul tla kod malih deformacija nakon izvedenog poboljšanja
- $G_{0,0}$ posmični modul tla kod malih deformacija prije izvedenog poboljšanja

Posmični modul tla kod malih deformacije u direktnoj je vezi s brzinom širenja posmičnih valova, što je prikazano u **Jednadžbi (2)**:

$$G_0 = \rho \cdot v_s^2 \quad (2)$$

gdje su:

ρ gustoća tla
 v_s brzina širenja posmičnih valova u tlu

Gustoća slojeva tla prije izvedenih šljunčanih pilota određena je temeljem provedenih laboratorijskih ispitivanja uzoraka tla. Ugradnjom šljunčanih pilota, gustoća tla se mijenja u odnosu na prvobitno stanje. Za potrebe određivanja posmičnog modula tla kod malih deformacija, gustoća tla nakon izvedenog poboljšanja određena je kao prosječna gustoća kompozita sastavljenog od pripadajućih volumena tla i šljunčanih pilota. U **Tablici 5** dan je zbirni rezultat proračuna određivanja posmičnog modula i stupnja poboljšanja tla određenih upotrebom formula (1) i (2).

Tablica 5. Određivanje stupnja poboljšanja tla ($G_{0,1}/G_{0,0}$) iz seizmičkih profila MASW 3, 4 i 5

MASW 3 - TEMELJ POZICIJA T2							
dubina [m]	prije poboljšanja tla			nakon poboljšanja tla			$G_{0,1}/G_{0,0}$
	v_s [m/s]	ρ_0 [kg/m ³]	$G_{0,0}$ [Mpa]	v_s [m/s]	ρ_1 [kg/m ³]	$G_{0,1}$ [Mpa]	
1,8-3,5	150	1200	27	220	1368	66,2047	2,45
3,5-4,3	150	1800	27	228	1824	94,8178	3,51
4,3-7,8	150	1800	27	250	1824	113,999	4,22
MASW 4 - TEMELJ POZICIJA T2							
dubina [m]	prije poboljšanja tla			nakon poboljšanja tla			$G_{0,1}/G_{0,0}$
	v_s [m/s]	ρ_0 [kg/m ³]	$G_{0,0}$ [Mpa]	v_s [m/s]	ρ_1 [kg/m ³]	$G_{0,1}$ [Mpa]	
1,8-3,5	150	1200	27	205	1368	57,4846	2,13
3,5-4,3	150	1800	27	210	1824	80,4376	2,98
4,3-7,8	170	1800	34,68	230	1824	96,4886	2,78
MASW 5 - TEMELJ POZICIJA T4							
dubina [m]	prije poboljšanja tla			nakon poboljšanja tla			$G_{0,1}/G_{0,0}$
	v_s [m/s]	ρ_0 [kg/m ³]	$G_{0,0}$ [Mpa]	v_s [m/s]	ρ_1 [kg/m ³]	$G_{0,1}$ [Mpa]	
1,8-3,5	165	1200	32,67	222	1312	64,6606	1,98
3,5-4,3	165	1800	32,67	223	1816	90,3079	2,76
4,3-7,8	185	1800	41,07	230	1816	96,0664	2,34

7. ANALIZA REZULTATA

U **Tablici 6** i na **Slici 12** prikazan je zbirni prikaz rezultata proračuna stupnja poboljšanja tla prije i nakon izvedbe šljunčanih pilota, za pozicije temeljnih stopa T2 i T4. Stupanj poboljšanja proračunat je na dva načina, primjenom Priebe-ove metode te iz interpretacije rezultata MASW metode. Za potrebe analize rezultata definira se parametar R (3) koji predstavlja razliku vrijednosti stupnja poboljšanja dobivenog upotrebom navedenih metoda.

$$R = |\text{stupanj poboljšanja Priebe} - \text{stupanj poboljšanja MASW}| \quad (3)$$

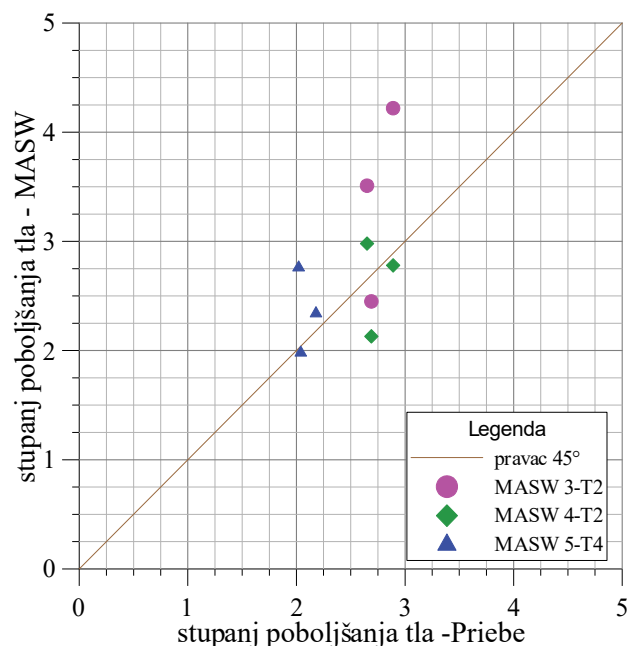
Veće vrijednosti parametra R (0.86 i 1.33) dobivene su na lokaciji seizmičkog profila MASW 3, na dubinama od 3.5 - 7.8 m. Ta činjenica objašnjava se anomalijom u brzini širenja posmičnih valova uočenoj u tom dijelu terena, koja je jasno vidljiva na **Slici 9**. Generalno, prema profilima MASW 1 i MASW 2, brzina širenja posmičnih valova raste s dubinom. Na lokaciji gdje je uočena anomalija, na dubini od cca 3.5 m, vrijednost v_s smanji se sa 150 na 130 m/s. Ta vrijednost konstantna je do dubine od cca 6.0 m, nakon koje vrijednost v_s ponovno raste s dubinom.

Iz preostalih vrijednosti danih u **Tablici 6** izračunate su vrijednosti parametra R . Njihovom statističkom analizom utvrđeno je da se vrijednosti R nalaze unutar granica 0,03 - 0,56. Srednja vrijednost iznosi 0.24, a standardna devijacija 0.19, što rezultira koeficijentom varijacije iznosa 0.79.

Tablica 6. Zbirni prikaz stupnja poboljšanja tla ispod temelja pozicija T2 i T4

dubina [m]	STUPANJ POBOLJŠANJA TLA								
	Temelj T2			Temelj T2			Temelj T4		
	Priebe	MASW 3	R*	Priebe	MASW 4	R*	Priebe	MASW 5	R*
1,8-3,5	2,69	2,45	0,24	2,69	2,13	0,56	2,04	1,98	0,03
3,5-4,3	2,65	3,51	0,86	2,65	2,98	0,33	2,02	2,76	0,37
4,3-7,8	2,89	4,22	1,33	2,89	2,78	0,11	2,18	2,34	0,07

* Formula (3)



Slika 12. Prikaz odnosa stupnja poboljšanja određenog Priebe-ovom i MASW metodom

8. ZAKLJUČAK

U provedenim analizama uspoređivani su rezultati proračuna stupnjeva poboljšanja tla dobiveni primjenom teoretskog modela (Priebe-ova metoda) s rezultatima dobivenim mjerenjem *in-situ* (MASW). Dobiveni rezultati analizirani su i prikazani u međusobnom odnosu. U tu svrhu izrađen je dvodimenzionalni Kartezijev koordinatni sustav u kojem se na apscisu nanosi stupanj poboljšanja tla dobiven primjenom Priebe-ove metode, a na ordinatu stupanj poboljšanja tla proračunat iz MASW-a.

Ukoliko se iz razmatranja izostave točke iz profila MASW3 (s dubina većih od 3.5 m radi uočene anomalije u tlu), u koordinatnom sustavu sa **Slike 12** uočava se grupiranje podataka oko pravca nagiba 45°. Navedeno ukazuje na mogućnost postojanja linearne korelacijske veze između tih grupa podataka. S obzirom na relativno mali broj dostupnih rezultata, u ovom radu nisu moguće statističke analize koje bi rezultirale kvantifikacijom tog korelacijskog odnosa.

Predlaže se daljnje istraživanje odnosa između stupnjeva poboljšanja tla dobivenih primjenom teoretskih modela i onog dobivenog iz *in-situ* istraživanja, a koje bi obuhvaćalo statistički značajan broj podataka.

9. LITERATURA

- HRN EN 1990:2011, Eurokod: Osnove projektiranja konstrukcija (2011)
- 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.
- Priebe, H.J. (1995): The design of vibro replacement. *Ground Engineering* 28, December, 31-37
- Vitković, V.; Ivandić, K. (2016) Primjeri uporabe šljunčanih pilota za ubrzanje konsolidacije i ojačanje tla. *INŽENJERSTVO OKOLIŠA*, Vol.3 / No.2, 73-78
- <http://www.kellerholding.com/deep-vibro-techniques.html>