



Primjena spektralne analize površinskih valova (MASW i SASW) za procjenu krutosti tla

Kostolanović, Matej

Master's thesis / Diplomski rad

2016

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:995178>

Rights / Prava: [In copyright](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2020-11-19**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

MATEJ KOSTOLANOVIĆ

Primjena spektralne analize površinskih valova (MASW i
SASW) za procjenu krutosti tla

DIPLOMSKI RAD

VARAŽDIN, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

DIPLOMSKI RAD

Primjena spektralne analize površinskih valova (MASW i
SASW) za procjenu krutosti tla

KANDIDAT:

Matej Kostolanović

MENTOR:

Izv. prof. dr. sc. Stjepan Strelec

NEPOSREDNI VODITELJ:

doc.dr.sc. Mario Gazdek

VARAŽDIN, 2016.

Sažetak

Ime i prezime autora: Matej Kostolanović

Naslov rada: Primjena spektralne analize površinskih valova (MASW i SASW) za procjenu krutosti tla

U svrhu izrade geotehničkog elaborata potrebno je poznavati karakteristike geomedija. Jedan od najvažnijih parametara geomedija je krutost, odnosno nosivost tla. Određivanje krutosti može se provesti refrakcijskom seizmikom, mjerenjem nailaska S valova. Međutim, S - valove nije lako generirati na terenu, a zbog učestalih smetnji (vjetar, promet i sl.), otežano je kvalitetno odrediti prve nailaske širenja posmičnih valova (V_s).

MASW i SASW su geofizičke metode koje pomoću spektralne analize površinskih valova uspješno i pouzdano otkrivaju situaciju u tlu. Za ispitivanje MASW metodom su potrebni: geofoni, čekić i pločica te seizmograf. Dobivene podatke iz ispitivanja zatim obrađujemo i računamo parametre krutosti (Youngov modul i modul posmika).

U ovome radu su prikazana dva slučaja korištenja MASW metode na lokaciji Ivanec i lokaciji Luka Ploče. U oba slučaja se vršila kontrola poboljšanja temeljnog tla.

Ključne riječi: krutost tla, SASW, MASW, brzina posmičnih valova, geotehnički elaborat

Sadržaj:

1.	Uvod.....	1
2.	Krutost tla.....	3
2.1.	Deformacije i naprezanja.....	3
2.2.	Modeli tla.....	3
2.2.1.	Linearno elastičan model→ elastičan model.....	4
2.2.2.	Mohr- Coulombov model → plastičan model.....	5
3.	Seizmički valovi.....	7
3.1.	Površinski valovi.....	9
4.	SASW i MASW.....	11
4.1.	SASW- spektralna analiza površinskih valova.....	11
4.2.	MASW- višekanalna analiza površinskih valova.....	13
4.3.	Postupak izrade V_s profila.....	15
4.3.1.	Prikupljanje podataka površinskih valova na terenu.....	16
4.3.2.	Izvor seizmičkog vala.....	17
4.3.3.	Geofoni- prijamnici.....	18
4.3.4.	Geometrija snimanja.....	19
4.3.5.	Postavke snimanja.....	20
4.4.	Disperzijska analiza.....	21
4.4.1.	Disperzijska krivulja.....	21
4.5.	Inverzija.....	24
5.	Primjena MASW metode na terenu.....	26
5.1.	Primjer Ivanec.....	26
5.1.1.	Rezultati seizmičkih ispitivanja tla.....	28
5.2.	Primjer Luka Ploče.....	33
5.2.1.	Rezultati seizmičkih ispitivanja tla.....	35
6.	Zaključak.....	40
	Literatura.....	41
	Popis slika.....	42
	Popis Tablica.....	44
	Prilozi.....	45

1. Uvod

Prilikom temeljenja ili izvedbe nekog drugog geotehničkog zahvata, izrađuje se geotehnički elaborat tog zahvata. Za izradu geotehničkog elaborata potrebno je poznavati određene parametre tla ili stijena na lokaciji ili u blizini lokacije na kojoj se izvodi geotehnički zahvat. Parametre tla moguće je prikupiti na više načina: klasičnom metodom i geofizičkim istraživanjima.

Klasična metoda se sastoji od bušenja sondažnih bušotina i laboratorijskih ispitivanja izbušenih uzoraka. Laboratorijskim ispitivanjem određuju se mehanička svojstva i klasifikacija tla. Raznim penetracijskim pokusima (SPT, DPH i dr.) mogu se odrediti mehanička svojstva. Za ove metode potrebno je vozilo za bušače garniture i stroj, opremljeni geotehnički laboratorij (edometar, aparat za direktno smicanje i dr.), te iskusni i visokoobrazovani stručnjaci koji znaju koristiti busaču opremu.

Osim klasične metode prikupljanja podataka postoji nekoliko geofizičkih metoda. One se razlikuju po tome što svaka mjeri različita svojstva tla (elastična, električna, magnetska, radioaktivna). Najzastupljenije geofizičke metode su seizmičke geofizičke metode. Njihovom primjenom i istraživanjem se bavi najveći broj geofizičara. Seizmičke metode: refrakcija i refleksija koriste longitudinalne (P) valove jer ih je najlakše generirati, a pošto su i najbrži, i najlakše registrirati. Kod geotehničkih i seizmičkih istraživanja potrebno je poznavati brzinu kretanja posmičnih (S) valova V_s jer o njoj najviše ovise modul smicanja (G) i Young-ov modul (E) (Prilog 1.) koji se koriste pri projektiranju konstrukcija. Prema tome, brzina posmičnih valova (V_s) predstavlja osnovni geomehanički parametar.

U posljednjih dvadesetak godina su se razvile dvije metode: spektralna analiza površinskih valova (SASW – *Spectral Analysis of Surface Waves*) i višekanalna analiza površinskih valova (MASW – *Multi-Channel Analysis of Surface Waves*). U ovome radu opisane su tehnike spektralne analize površinskih valova (SASW i MASW) te njihova povezanost s procjenom krutosti tla. Ove dvije metode su bazirane na mjerenju brzine prolaza valova kroz tlo. Rezultati mjerenja su interpretirani kroz empirijsku formulaciju da je brzina širenja valova ovisna o odnosu posmičnog modula (G) i gustoće tla (ρ).

Cilj rada je opisati metode spektralne analize, valove, krutost tla, korišćenje MASW na terenu, te interpretaciju rezultata terenskih snimanja.

2. Krutost tla

2.1. Deformacije i naprezanja

Tlo je rahli dio zemljine površine, a može se sastojati od sljedećih materijala: šljunka, pijeska, gline i praha. Glavna karakteristika tla je postojanost u prirodnom obliku, a ista predstavlja najveći problem u određivanju, odnosno opisivanju ponašanja tla u određenim uvjetima. Kako se svaki geotehnički zahvat ili temeljenje odvija na ili u tlu izučavanje ponašanja tla je od velike važnosti za geotehničku i građevinsku struku.

Prognoza ponašanja tla tako predstavlja osnovni zadatak u projektiranju svih geomehaničkih zahvata, u smislu procjene odnosa deformacija i naprezanja za promjenu polja naprezanja ili deformacija. Postoje brojni primjeri neuspjelih građevina čije ponašanje ne odgovara projektiranome zbog toga što nisu pravilno proračunati utjecaji opterećenja na tlo. Kako bi spriječila ne očekivane deformacije i naprezanja, geotehnička praksa zahtijeva što bolju procjenu deformacija u tlu, a posebno što bolju procjenu slijeganja tla [1].

Za pouzdano poznavanje ponašanja tla potrebno je poznavati osnovne parametre (karakteristike) tla s kojima će se ući u proračun za odabrani model. Jedan od važnih parametara je i *krutost tla*. Obično se krutost tla izražava preko modula posmika G , odnosno preko modula stišljivosti M_v i preko Young-ovog modula elastičnosti E . U određivanju krutosti i deformacija tla (pa tako i naprezanja), geotehnička praksa razvila je niz laboratorijskih i terenskih, direktnih i indirektnih postupaka kojima se određuju određeni aspekti mehaničkog ponašanja tla primjereni pojedinim vrstama problema [1].

2.2. Modeli tla

Model tla je pokušaj da se tlo u prirodnom obliku prikaže tako da bi se moglo predvidjeti njegovo ponašanje. U mehanici tla se pokazuje potreba za izradom modela koji će opisati ponašanje tla pri promjeni stanja naprezanja [2]. Kako sigurnost građevine ovisi o deformacijama koje se javljaju tijekom njene izgradnje i

trajanja, proračun deformacija koje nastaju pod utjecajem vanjskog opterećenja ili djelovanjem unutrašnjih sila je značajan zadatak koji treba riješiti.

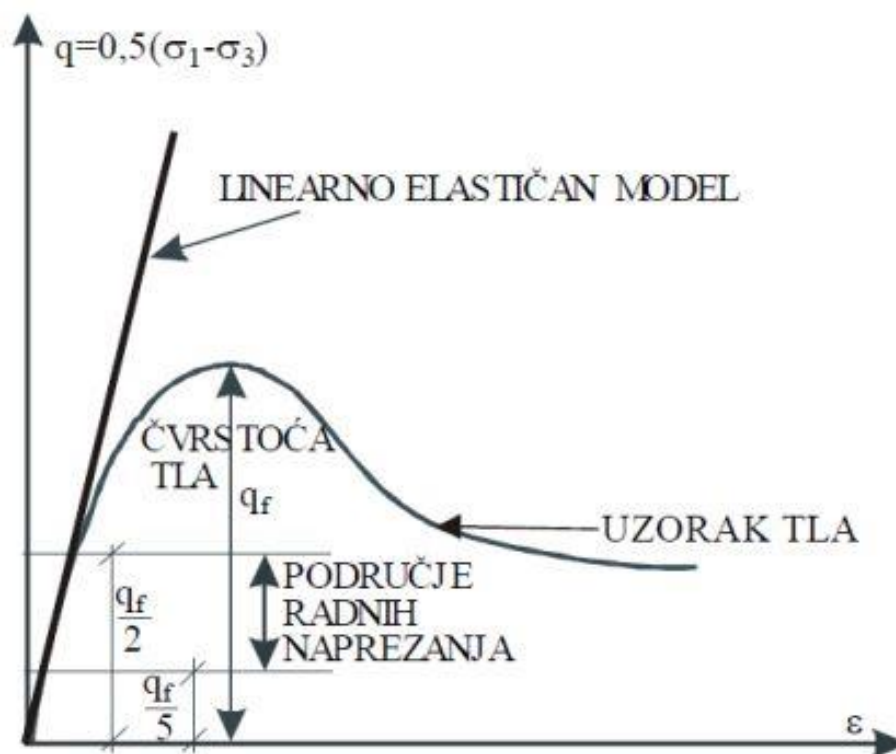
Mehanika tla razlikuje dva odvojena stanja ponašanja tla pod opterećenjem:

- Stanje malih deformacija → ne izazivaju slom tla
- Stanje velikih deformacija → izazivaju plastifikaciju tla, naprezanja u tlu takva da njihovo malo povećanje izaziva velike deformacije

Stvarno ponašanje tla je nelinearno, vrlo složeno i promjenjivo, a ovisi i o uvjetima kojima je izloženo. Zbog mnogobrojnih varijacija u ponašanju tla, ponašanje tla se ne može potpuno opisati jednim matematičkim modelom, te se određeni modeli prilagođavaju, tako da se sa zadovoljavajućom točnošću primjenjuju za određena rješenja u mehanici tla [2]. Plastični model tla se primjenjuje za stanje sloma tla, dok se za stanje daleko ispod razine sloma tla primjenjuje elastičan model.

2.2.1. Linearno elastičan model → elastičan model

Linearno elastičan model tla je jedan od najjednostavnijih modela (slika 1). Kod njega su naprezanja direktno proporcionalna deformacijama. U mehanici tla se koristi za proračun slijeganja jer odgovara pretpostavci da se tlo pri malim deformacijama ponaša linearno elastično.



Slika 1. Linearno elastični model

Ovaj model je temeljen na Hooke-ovom zakonu koji kaže da postoje četiri parametra materijala, pri čemu su dva nezavisna, za jedan elastični model: Young-ov modul elastičnosti E , Poissonov koeficijent ν , koeficijent zapremninske deformacije K i modul smicanja G . Za puni opis ponašanja materijala potrebna su samo dva parametra.

2.2.2. Mohr- Coulombov model → plastičan model

Mohr- Coulombov kriterij sloma je jedan od najčešće primjenjivanih kriterija, koji se temelji na tome da će do sloma doći uslijed kritične kombinacije normalnog i posmičnog naprezanja.

Mohr- Coulombov kriterij sloma glasi:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (1)$$

gdje je:

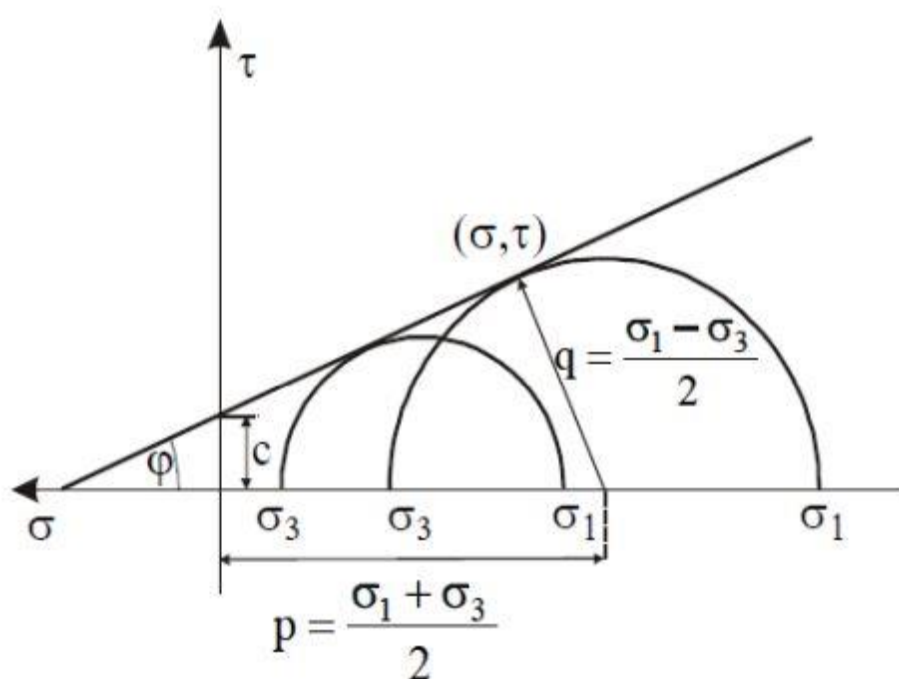
τ - posmično naprezanje

c - kohezija

σ_n - normalno naprezanje

φ - kut unutrašnjeg trenja

Osnovni parametri čvrstoće tla na smicanje jesu: kohezija i kut unutrašnjeg trenja. Kohezija predstavlja odsječak na osi posmičnog naprezanja, a kut unutrašnjeg trenja predstavlja kut koji zatvara pravac čvrstoće sa osi koja predstavlja normalno naprezanje. Stanje naprezanja za bilo koju kombinaciju glavnih naprezanja σ_1 i σ_3 se može prikazati Mohrovom kružnicom. Ukoliko se usvoji bočno naprezanje σ_3 kao konstantno, pri različitim vertikalnim naprezanjima σ_1 dobije se stanje naprezanja predstavljeno serijom krugova. Pri nekoj graničnoj vrijednosti σ_1 , dolazi do sloma tla i tom stanju naprezanja odgovara granična Mohrova kružnica, koja tangira pravac kriterija loma, anvelopu loma (slika 2). Mohrove kružnice ispod anvelope predstavljaju stanje napona kod kojih slom tla još nije nastupio [2].



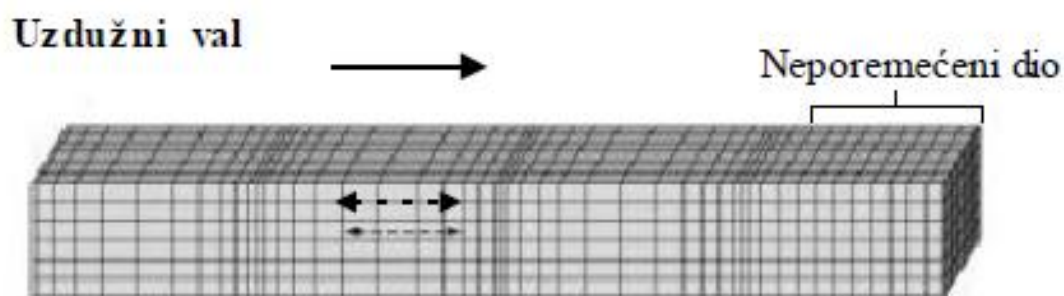
Slika 2. Mohr- Coulombova anvelopa sloma

3. Seizmički valovi

Seizmički valovi nastaju kao posljedica nekog dinamičkog opterećenja na površini ili u unutrašnjosti geomedija. Mogu biti posljedica prirodnih pojava: potresa ili klizanja kosine, te ljudskih djelovanja: miniranje ili zabijanje pilota. Također seizmički val može nastati namjerno pomoću udarca čekića. Nastanak i širenje seizmičkih valova se tumači teorijom elastičnosti. Seizmičke valove se smatra harmonijskim valovima, pa se stoga uzimaju kao sume osnovne frekvencije i viših harmonika.

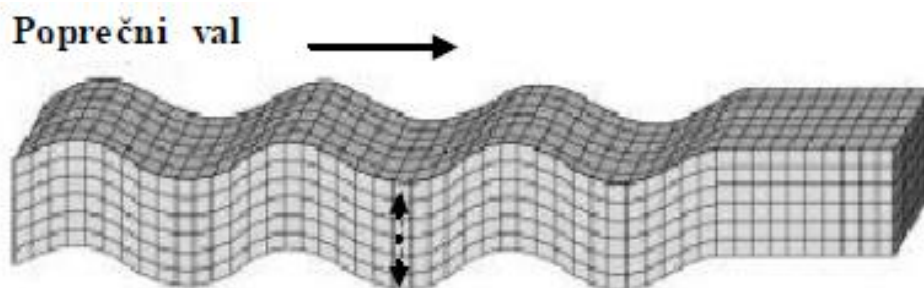
Valovi se mogu definirati i kao poremećaji koji putuju kroz medij i prenose energiju tog poremećaja. S obzirom na granične uvjete, mogu se promatrati i analizirati seizmički valovi u neograničenoj elastičnoj sredini i valovi u blizini granice elastičnog poluprostora (površinski valovi). Po svojoj prirodi seizmički valovi u neograničenoj elastičnoj sredini mogu biti dvojaki: uzdužni kompresijski (dilatacijski; kontrakcijski) i poprečni distorzijski (posmični), a označavaju se slovima P i S . Površinski se valovi mogu eliptički i retrogradno kretati okomito na smjer širenja u horizontalnoj ravnini (L -Loweovi valovi), odnosno u smjeru širenja u horizontalnoj i vertikalnoj ravnini istodobno (R -Rayleighovi valovi). Uzdužni P valovi su longitudinalni kao valovi zvuka, dok su S valovi transverzalni i polarizirani kao elektromagnetski valovi [3].

Uzdužni P valovi se očituju kao promjena volumena medija. Uzdužni valovi se mogu širiti kroz medije svih agregatnih stanja, jer čvrsta tijela, tekućine i plinovi mogu mijenjati svoj volumen. P valovi izazivaju progresivna i regresivna gibanja čestica na pravcu širenja, imaju najveću brzinu širenja i značajni su za seizmička istraživanja (slika 3).



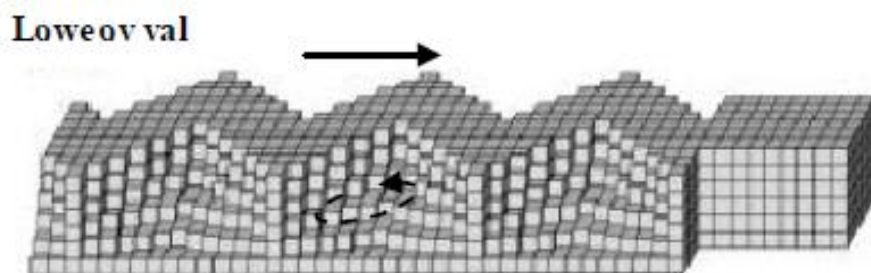
Slika 3. Smjer širenja uzdužnog vala i smjer oscilacija čestica geomedija

Poprečni S valovi pokušavaju promijeniti oblik strukture medija kroz koji se šire, a na medij djeluju posmično. Važni su za čvrste geomedije, koji imaju posmičnu čvrstoću, pa su značajni za seizmička istraživanja i primjenu u geotehnici (slika 4).



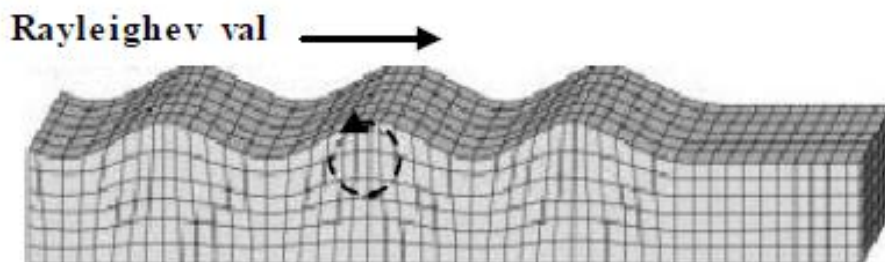
Slika 4. Smjer širenja poprečnog vala i smjer oscilacija čestica geomedija

Loweovi valovi (L) se javljaju pri površini ispitivanja kao transverzalni valovi. Pojavljuju se u situacijama kada medij manje brzine prekriva medij u kojem elastični valovi imaju veće brzine. Pobuda gibanja čestica je u horizontalnoj ravnini (slika 5).



Slika 5 . Smjer širenja Loweov-og vala i smjer oscilacija čestica geomedija

Rayleighevi valovi (L) se šire uz granicu elastičnog poluprostora, pri čemu pobuđuju čestice u vertikalnoj ravnini na eliptično gibanje. S dubinom medija ispod površine ispitivanja se brzo smanjuje amplituda vala. Gibanje čestica je jednako združenom djelovanju P i S valova (slika 6).

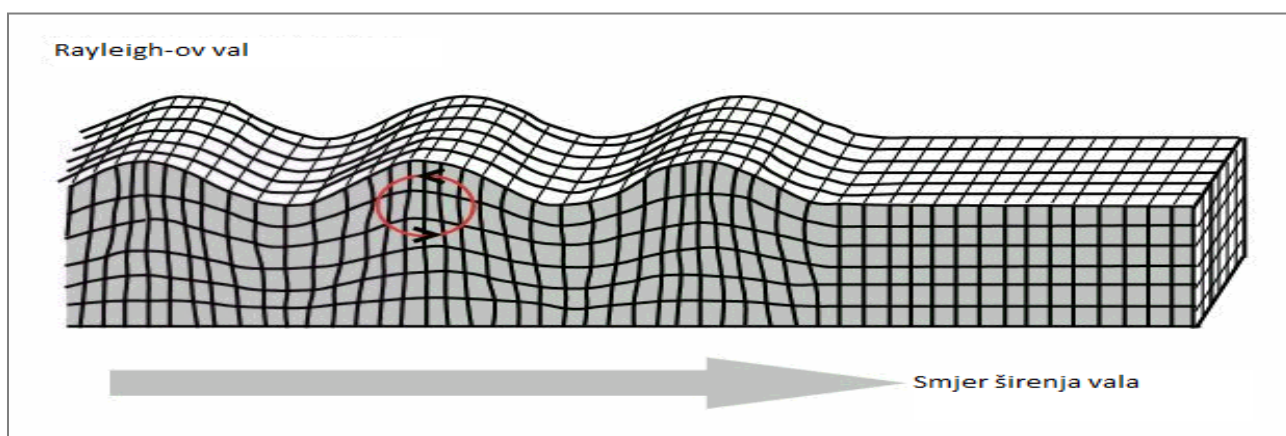


Slika 6. Smjer širenja Rayleighev-og vala i smjer oscilacija čestica geomedija

3.1. Površinski valovi

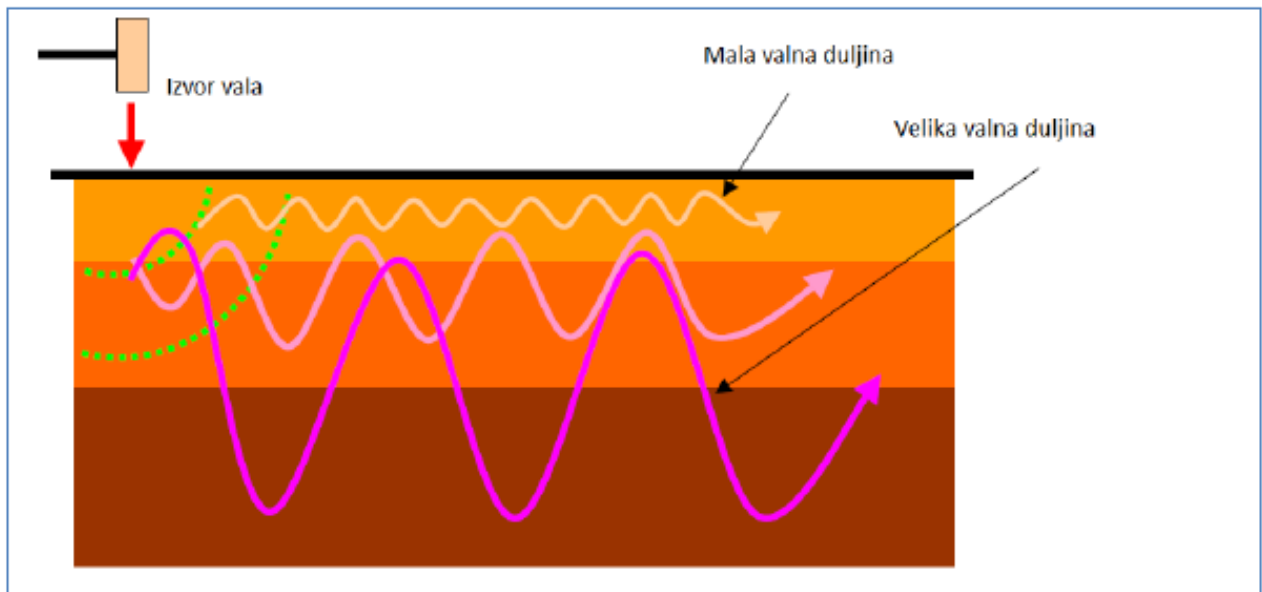
U beskonačnom, homogenom i izotropnom mediju seizmički se valovi šire kao P i S prostorni valovi. Kako se prostorni valovi približavaju granici beskonačnog prostora transformiraju se u površinske valove. Kada se za stvaranje površinskih valova koriste vertikalni izvori poput čekića ili pada utega (drop-weight), nastaju površinski Rayleighevi (R) valovi koji u najvećoj mjeri preuzimaju seizmičku energiju izvora (R valovi: 67%; S valovi: 26%; P valovi: 7%) [4].

Složeni oblik Rayleighevih valova se sastoji od longitudinalnog i transversalnog gibanja s međusobnim pomakom u fazi. Materijalna čestica prelazi eliptičku putanju kojoj je velika poluos vertikalna kada je val blizu površine. R valovi se često nazivaju i valjanje tla (*ground roll*) [4].



Slika 7. Širenje Rayleigh-ovog vala

Prostorni P i S valovi ne pokazuju značajnije rasipanje energije po frekvencijama, međutim najvažnije svojstvo R valova je upravo njihovo rasipanje, to jest disperzija. Tako se valovi niže frekvencije, a prema tome veće valne duljine, šire dublje u medij nego valovi visoke frekvencije i male valne duljine. Brzina širenja vala pri pojedinoj frekvenciji naziva se fazna brzina, a krivulja koja prikazuje faznu brzinu u ovisnosti o frekvenciji naziva se krivulja fazne brzine ili disperzijska krivulja [3].



Slika 8. Disperzija površinskih valova

Fazna brzina širenja Rayleigh-ovih valova (v_r) prije svega ovisi o brzini posmičnih valova (v_s). Izraz koji pokazuje odnos između brzine posmičnih valova (v_s) i brzine Rayleigh-ovih valova (v_r) je sljedeći:

$$v_s = P v_r \quad (2)$$

Gdje je: P -konstanta ovisna o Poisson-ovom koeficijentu(ν) (primjerice $P=1.09$ za $\nu=0.25$)

Karakteristike Rayleighovih valova:

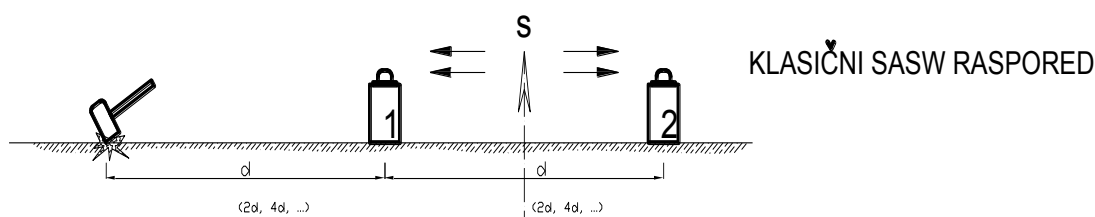
- Fazna brzina je ovisna o brzini S valova ($0,88 - 0,95$ brzine S valova);
- Povećana učinkovitost energije izvora (Površinski valovi: 67%, S valovi: 26%, P valovi: 7%);
- Razlika u valnoj duljini uzrokuje različitu dubinu promatranja;
- Laki su za promatranje;
- Moguće je promatrati sloj manje brzine ispod sloja veće brzine [3].

4. SASW i MASW

4.1. SASW- spektralna analiza površinskih valova

Ova metoda je razvijena od strane istraživačkog tima Sveučilišta u Texasu, u ranim 80-tim godinama prošlog stoljeća. Bazira se na analizi faznog spektra površinskih valova pomoću Fourierove transformacije. Valovi se generiraju pomoću čekića, a bilježe se pomoću dva geofona (slika 9). Početna istraživanja SASW metode imala su za cilj povećanje točnosti osnovnog moda (M0) disperzijske krivulje Rayleighovih valova kroz različite procedure prikupljanja podataka na terenu i njihove obrade.

U današnje vrijeme SASW se koristi ponajviše za in-situ ispitivanja. Najviše se primjenjuje na prirodnom tlu, ali zbog svoje prilagodljivosti i neinvazivne tehnologije može se još primjenjivati na kolničkim sustavima i odlagalištima otpada.



Slika 9. Terenski postav SASW geofonskog rasporeda

Oblik disperzijske krivulje ovisi o promjeni krutosti tla s dubinom (slika 10). Eksperimentalna, odnosno mjerena krivulja disperzije fazne brzine i valne duljine određuje se iz podataka o fazi kod određene frekvencije, a za koje je zadovoljen uvjet koherencije (funkcije usklađenosti). Vrijeme koje je potrebno R valu da stigne od jednog geofona do drugog, računa se za svaku pojedinu frekvenciju, a kako je razmak geofona d poznat slijedi:

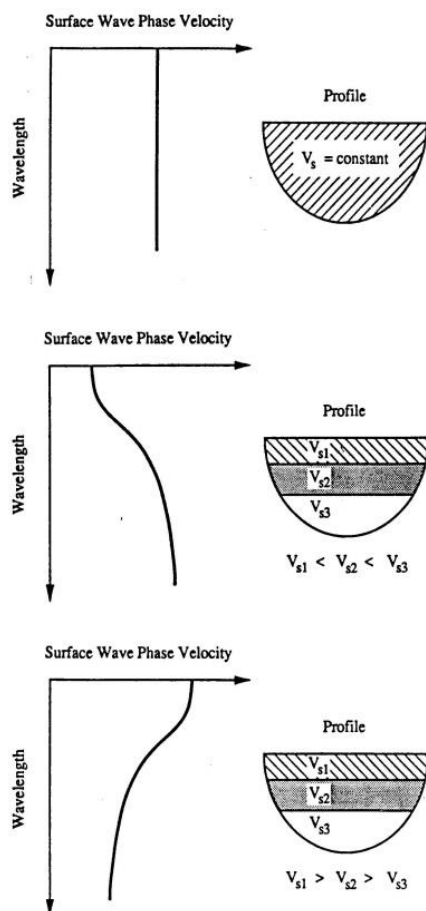
$$V_R = \frac{d}{t(f)} \quad (3)$$

gdje je:

V_R - valna duljina Rayleig-ovog vala

d - razmak geofona

t - vrijeme potrebno R valu od jednog geofona do drugog [5].

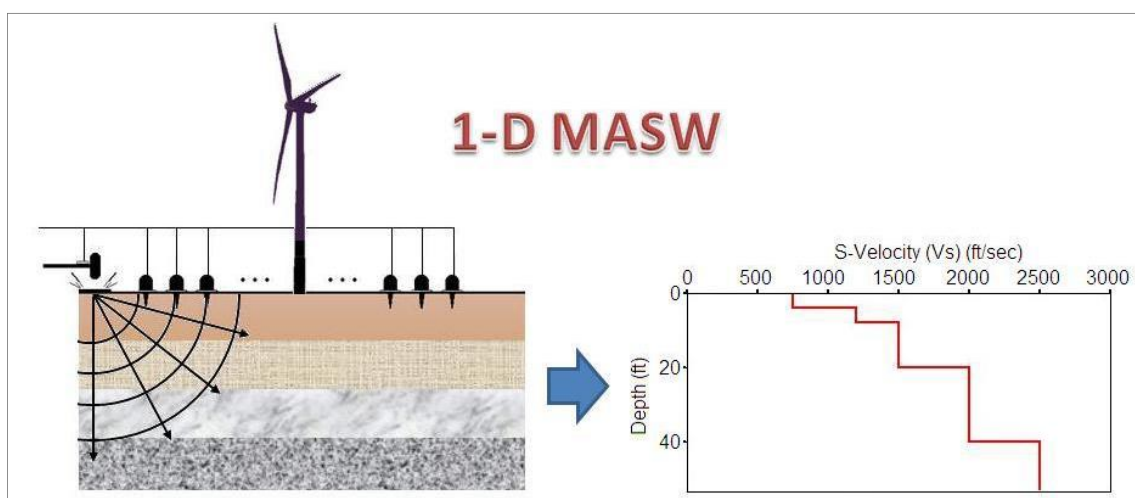


Slika 10. Normalno disperzni i obrnuto disperzni profili.

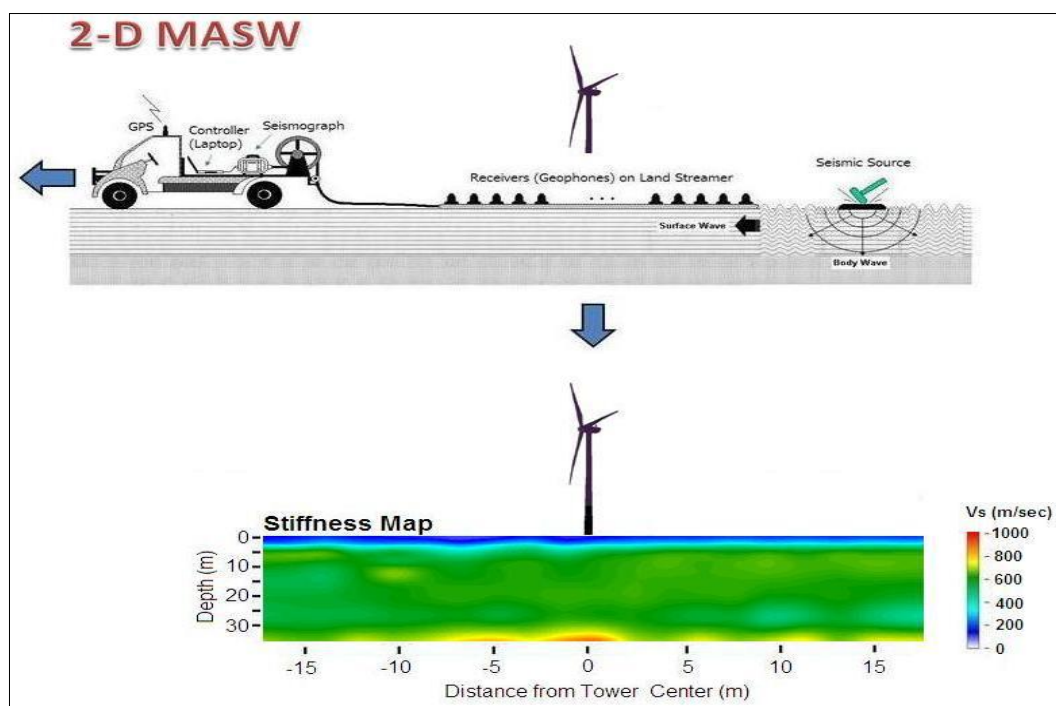
Određivanje serije razmaka geofona neophodan je da bi se obuhvatio potreban raspon valnih duljina za ispitivanje tla. Početni razmak se određuje metodom pokušaja, temeljen na prethodnim informacijama o tlu i brzini posmičnih valova. Za najkraću valnu duljinu, razmak geofona se postavlja na jedno do tri puta minimalne valne duljine. Za najdužu valnu duljinu, razmak geofona se postavlja na polovinu ili na trećinu tražene valne duljine. Kada se jednom odredi minimalni razmak između geofona, sljedeći razmak se udvostručuje. To se ponavlja tako dugo dok se ne dostigne maksimalni razmak geofona. Mjerenjima je utvrđeno da udvostručenje prethodnog razmaka daje dovoljno preklapanja valnih duljina da se dobije kvalitetna krivulja disperzije.

4.2. MASW- višekanalna analiza površinskih valova

MASW (*Multi-Channel Analysis of Surface Waves*) je seizmička geofizička metoda koja se bavi procjenom krutosti tla. Počela se koristiti među geofizičarima početkom ovoga stoljeća. Htjeli su upotrijebiti metodu seizmičke refleksije u inženjerske svrhe. Ovisno o geotehničkom problemu MASW se može koristiti u raznim oblicima: jednoj dimenziji (1D) ili sondiranje (slika 11); dvije dimenzije (2D) ili tomografija (slika 12) i u tri dimenzije (3D) ili modeliranje stvarnosti (slika 13).

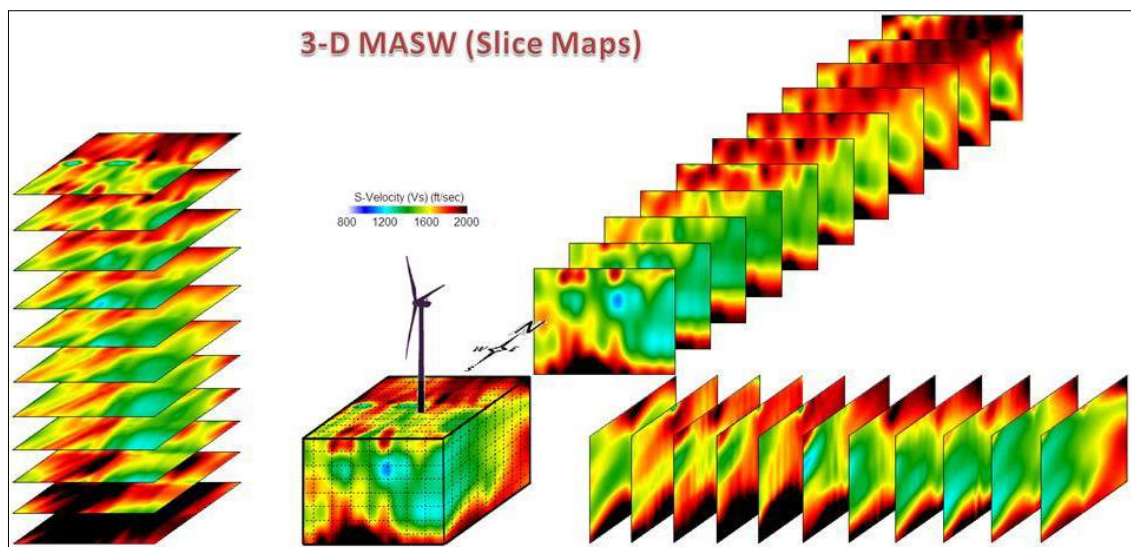


Slika 11. 1D MASW ili sondiranje



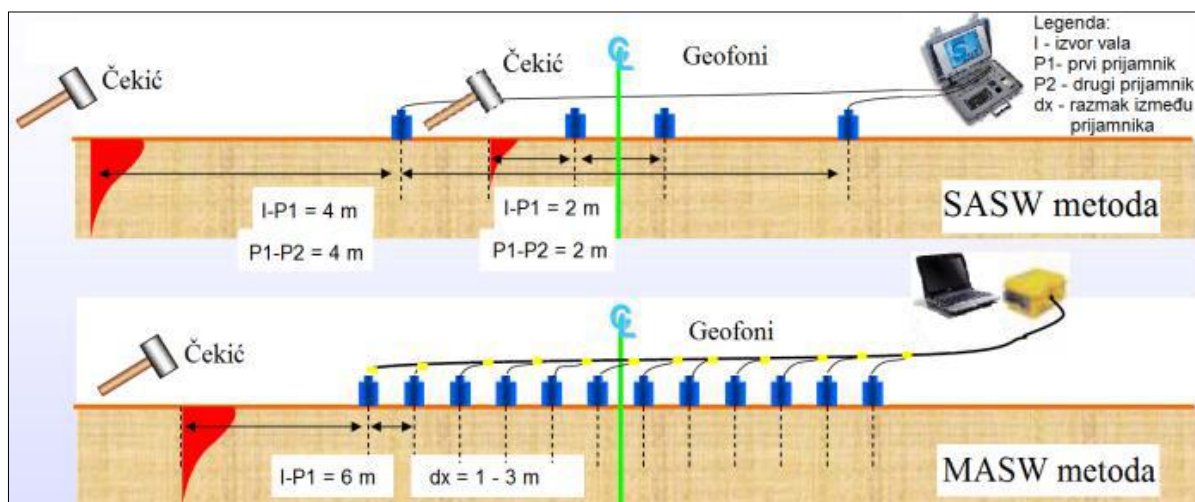
Slika 12 . 2D MASW ili tomografija

Gledajući kroz povijest, većina primjene površinskih valova se sastojala od tri osnovna koraka: prikupljanje podataka – disperzijska analiza – modeliranje profila s različitim parametrima (v_s , v_p , h ,...). Ova tri koraka su i danas aktualni model analize površinskih valova. Svaki od njih predstavlja zasebni problem u analizi i svaki od njih je aktualna tema istraživanja mnogih znanstvenika. Osim modeliranja profila tla (uglavnom brzinom širenja posmičnih valova v_s), površinski valovi su našli i primjenu u otkrivanju ispod površinskih anomalija [3].



Slika 13 . 3D MASW ili modeliranje stvarnosti

MASW se razvio na već razvijenoj metodi SASW. Dok SASW metoda koristi dva geofona, MASW metoda je preuzela pristup refleksijske i refrakcijske seizmike s više prijemnika (24 ili više) (slika 14).

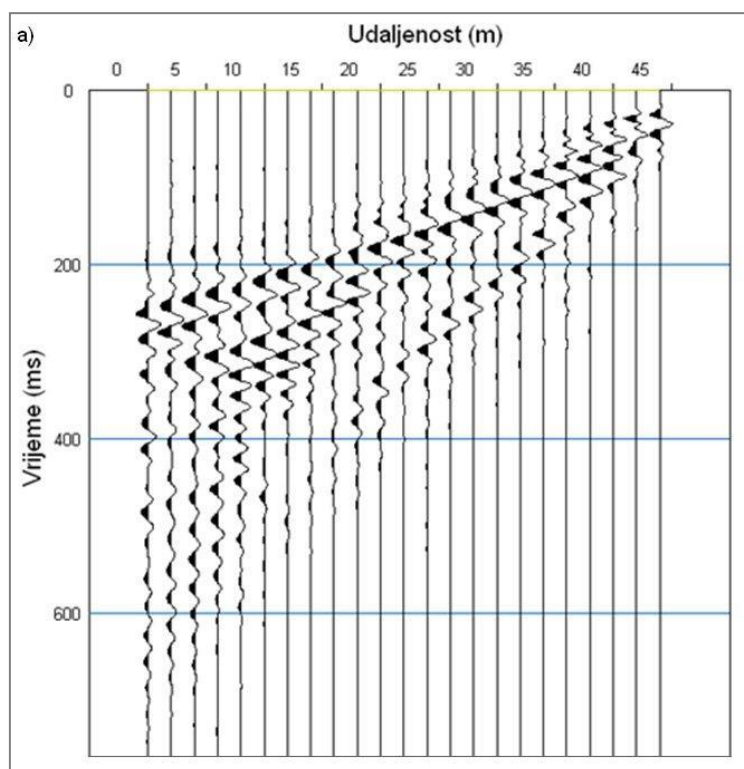


Slika 14 . Usporedba SASW i MASW metoda

4.3. Postupak izrade V_s profila

Proces generiranja profila brzina posmičnih valova (V_s) se sastoji od tri glavna koraka (prilog 2):

- Prikupljanje podataka površinskih valova na terenu.
- Obrada podataka da se dobije disperzijska krivulja (dijagram odnosa frekvencije i fazne brzine).
- Inverzija ili izračun brzine širenja posmičnih valova iz Rayleigh-ovih valova (slika 15)

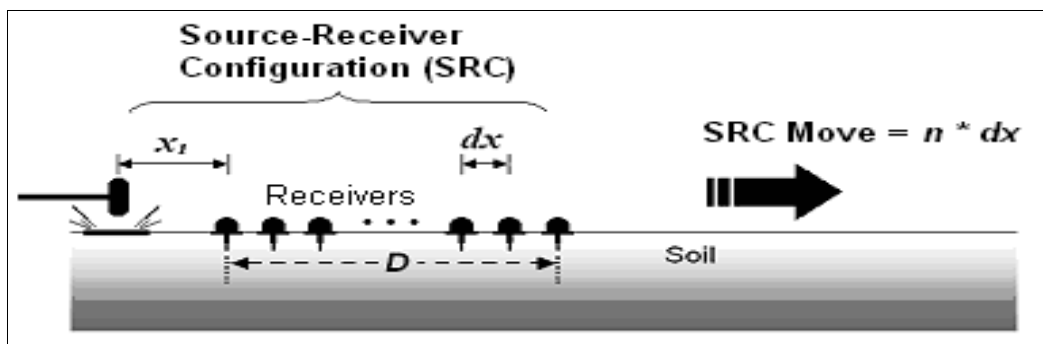


Slika 15. Snimka Rayleigh-ovih valova

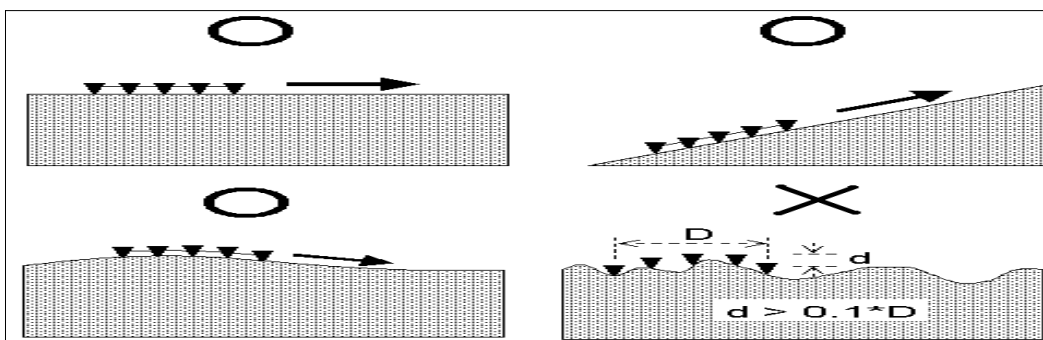
4.3.1. Prikupljanje podataka površinskih valova na terenu

Prikupljanje podataka na terenu pomoću MASW može se provesti s dvije metode: aktivnom ili pasivnom. Uglavnom se koristi aktivna metoda, te je ona opisan u daljnjem tekstu. Kao izvor seizmičkog vala kod ove metode koristi se aktivan izvor, najčešće čekić ili *drop-weight*. Maksimalna dubina istraživanja ($Z_{\max}$) ovisi o vrsti izvora seizmičkog vala te se kreće u rasponu od 10 do 30 metara.

Površinske valove najbolje je generirati na ravnome terenu unutar duljine jednoga geofonskog rasporeda D (slika 16a). Ako imamo ovakav slučaj na terenu, njegova topografija ne bi smjela utjecati na kompletan profil istraživanja. Problem u generiranju površinskih valova mogu predstavljati promjene dimenzija reljefa veće od 10% duljine geofonskog rasporeda D (slika 16b) [3].



Slika 16a. Raspored geofona na terenu



Slika 16b. Položaj geofona u odnosu na nagib terena

4.3.2. Izvor seizmičkog vala

Najveća dubina istraživanja ($Z_{\max}$) ovisi o najvećoj valnoj duljini generiranih površinskih valova ($L_{\max}$). Relacija između ova dva parametra je sljedeća:

$$Z_{\max} \approx 0.5 L_{\max} \quad (4)$$

Najveća valna duljina ovisi o udarnoj snazi seizmičkog izvora. Kod aktivne metode to je već spomenuti čekić (slika 17), dok kod pasivne metode to može biti prijelaz automobila preko neravnine na cesti. Što je udarna snaga izvora veća, postižu se veće valne duljine, a s time se povećava i maksimalna moguća dubina istraživanja. Za neka jednostavnija istraživanja čekić od nekih desetak kilograma može predstavljati dobar izbor. Ako su za istraživanje potrebne niže frekvencije (veće valne duljine) kao izvor seizmičkog vala može se koristiti padajući uteg (*drop-weight*). On ima veću snagu od čekića, ali je ujedno i skuplji i potrebno je organizirati pristup na teren pošto se najčešće nalazi u sklopu nekog teretnog vozila. Sljedeća točka u generiranju površinskih valova je ploča preko koje se prenosi udarac u tlo (slika 17). Koliko ona utječe na generiranje površinskih valova nije detaljnije istraženo. Najčešće se koriste metalne ploče, ali se pokazalo da i ploče koje nisu metalne (npr. od tvrde gume) mogu proizvesti veću energiju površinskih valova na nižim frekvencijama (npr. $< 10\text{Hz}$). Preporučuje se slaganje podataka na stog (stekiranje) sa više udaraca da bi se smanjio utjecaj smetnji, poglavito ako se radi u urbanom području. Optimalni broj stekiranja će se odrediti iz seizmičke snimke i to kada se više ne vidi promjena u odnosu signal – smetnja (engl. signal-to-noise ratio – S/N). Najčešće se koriste 3 – 5 stekiranja. Taj broj bi se trebao povećati ako se radi u bučnoj okolini ili ako se povećava duljina geofonskog rasporeda.



Slika 17. Čekić i metalna pločica kao izvor seizmičkog vala

4.3.3. Geofoni- prijamnici

U MASW metodi se koriste samo vertikalni geofoni. Preporučuje se korištenje geofona s niskom frekvencijom (npr. 4,5 Hz) (slika 18). Osim klasičnog postavljanja geofona danas se i sve češće koriste *land streamer*-i kojima je moguće brzo prikupljanje podataka. Najčešće se koristi postav od 24 geofona na razmaku od 1, 2 ili 3 metra.



Slika 18. Vertikalni geofon niske frekvencije (4,5 Hz)

4.3.4. Geometrija snimanja

Duljina geofonskog rasporeda (D) direktno utječe na najveću valnu duljinu ($L_{\max}$) koju je moguće analizirati, a s time i najveću dubinu istraživanja ($Z_{\max}$). Duljina geofonskog rasporeda trebala bi biti najmanje jednaka ili veća od najveće željene dubine istraživanja ($Z_{\max}$):

$$D = m Z_{\max} \quad (1 \leq m \leq 3) \quad (5)$$

Kako i D utječe na $Z_{\max}$, tako i razmak između dva susjedna geofona (dx) utječe na najmanju valnu duljinu ($L_{\min}$) a s time i na najmanju duginu istraživanja ($Z_{\min}$):

$$Z_{\min} = k dx \quad (0.3 \leq k \leq 1.0) \quad (6)$$

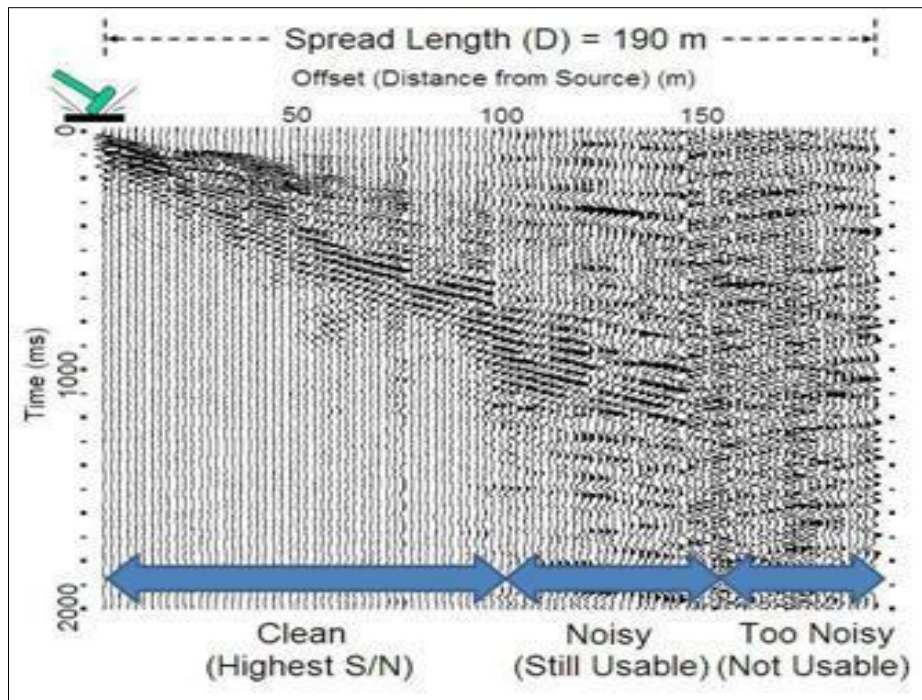
Glavni faktor koji u praksi utječe na $L_{\max}$ je izvor seizmičkog vala. D u kojemu se mogu iskoristiti površinski valovi se kreće od 50 – 100 m. Ako je D duži, površinski valovi generirani s većinom aktivnih izvora postaju prigušeni s okolnim smetnjama na samome kraju geofonskog rasporeda. Slabi nisko frekventni valovi često postoje iako

i nisu vidljivi na snimci zbog smetnje okoline. Oni pomažu u analizi niskih frekvencija disperzijske krivulje povećavajući maksimalnu dubinu istraživanja ($Z_{\max}$). To znači da je maksimalni D za veći $Z_{\max}$ uglavnom malo veći od udaljenosti na kojoj se na snimci čini da smetnje prevladavaju.

Za interval točaka paljenja preporučuje se od $1dx - 12 dx$ za snimanje s 24 kanala. U tome slučaju se najčešće koristi udaljenost točaka paljenja od $1 dx$. Ova udaljenost je jedna od varijabli koja direktno utječe na horizontalnu razlučivost. [5]

4.3.5. Postavke snimanja

Interval uzorkovanja od jedne milisekunde ($dt = 1 \text{ ms}$) s ukupnim vremenom snimanja od jedne sekunde ($T = 1 \text{ s}$) su najčešće korišteni parametri. Ako se planiraju koristiti i prostorni valovi (refleksijski i refrakcijski valovi) preporučuje se smanjenje vremena uzorkovanja (npr. $dt = 0.5 \text{ ms}$). U slučaju malih brzina posmičnih valova ($v_s < 100 \text{ m/s}$) potrebno je produžiti vrijeme snimanja (npr. $T = 2 \text{ s}$). Duže vrijeme snimanja se preporučuje ako se koristi dulji geofonski raspored ($D > 100 \text{ m}$). Predugo vrijeme snimanja ($T \geq 5 \text{ s}$) se ne preporučuje jer se povećava vjerojatnost da se snime i okolne smetnje (npr. promet). Ako se umjesto 24 kanala koristi 48 kanala bolje je smanjiti razmak između dva susjedna geofona (dx) nego povećavati ukupnu duljinu geofonskog rasporeda (D).



Slika 19. Snimka sa terena koja prikazuje domet iskoristive udaljenosti od izvora

Optimalni parametri prikupljanja podataka na terenu se cijelo vrijeme korigiraju kako istraživači na terenu dolaze do novih podataka.

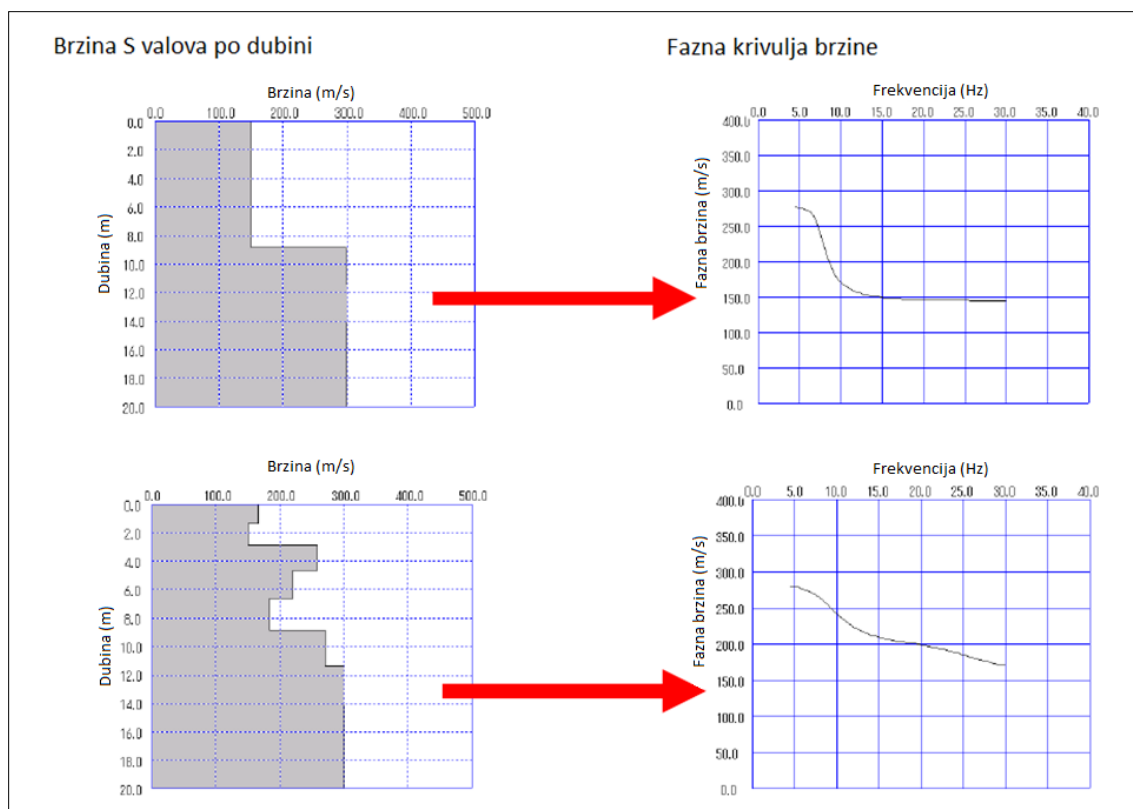
4.4. Disperzijska analiza

4.4.1. Disperzijska krivulja

Disperzijska krivulja je dijagram podataka frekvencija i faznih brzina. Određivanje točne disperzijske krivulje najvažniji je dio analize jer iz nje proizlazi profil širenja posmičnih valova.

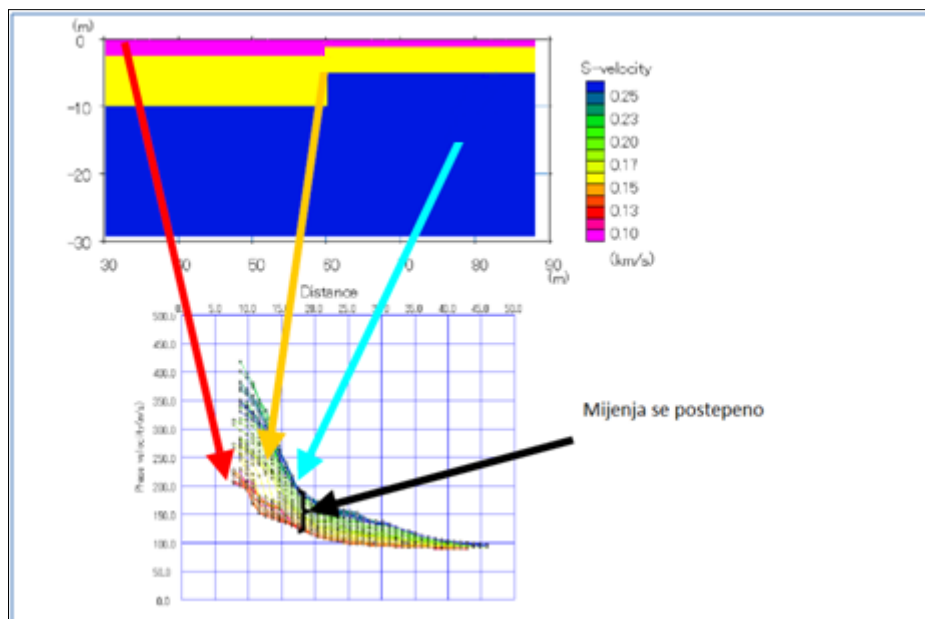
Karakteristike disperzijske krivulje:

- Disperzijska krivulja mora biti glatka zakrivljena linija(Slika 20.).



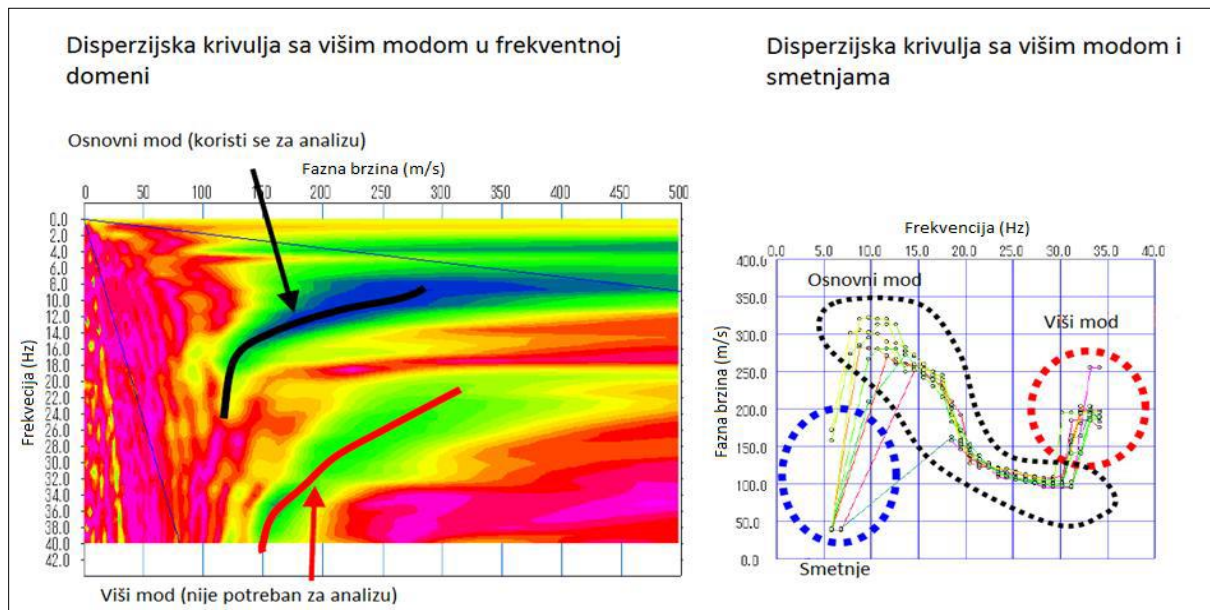
Slika 20. Primjer glatkih disperzijskih krivulja

- Disperzijska krivulja prikazuje prosječnu brzinu modela ispod mreže geofona. Ne može imati skokove (Slika 21.).



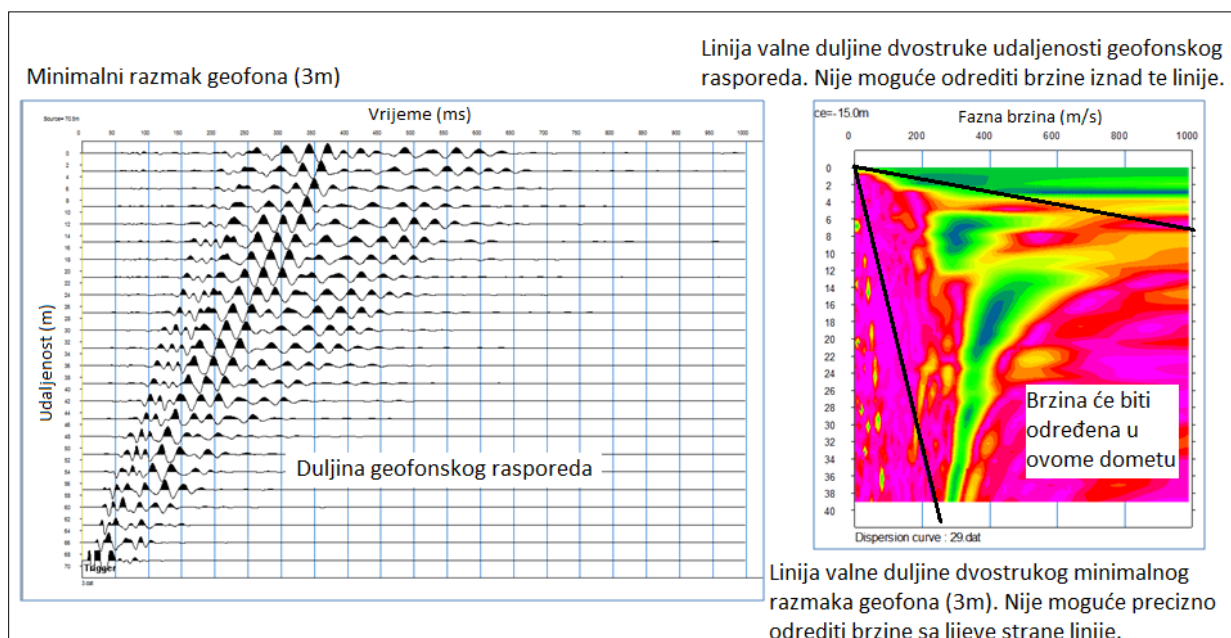
Slika 21. Postepeno mijenjanje disperzijske krivulje

- Disperzijska krivulja može uključivati i više modova (ne koriste se za analizu, slika 22.).



Slika 22. Disperzijska slika s višim modovima

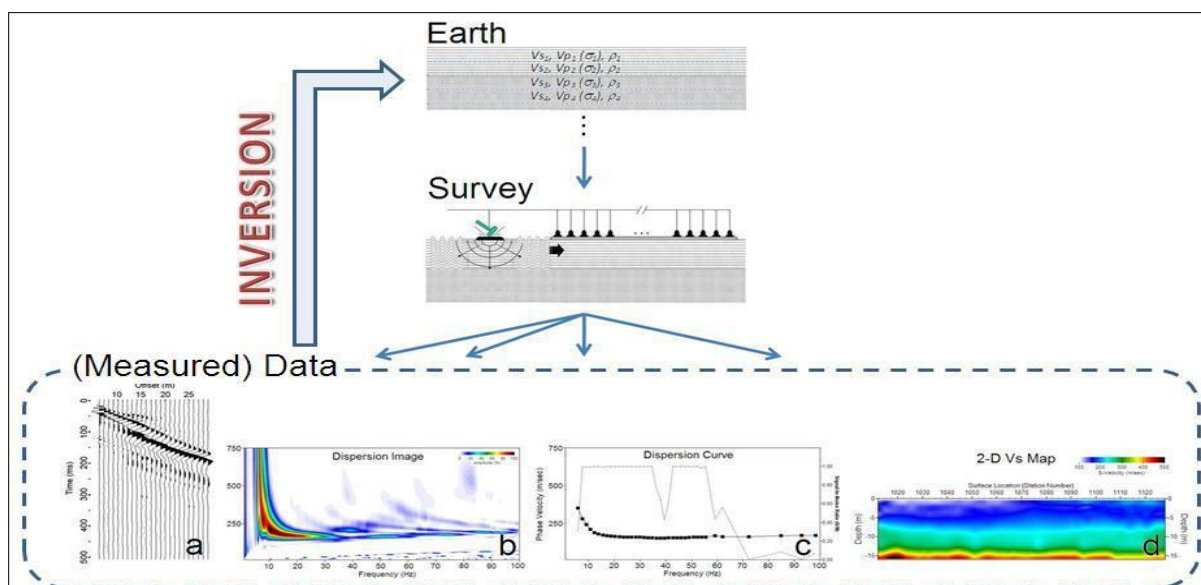
- Domet frekvencija ograničen je najmanjim razmakom između dva geofona i duljinom cijelog geofonskog rasporeda (Slika 23.).



Slika 23. Ograničenje frekvencija na disperznoj krivulji

4.5. Inverzija

Inverzija površinskih valova znači procjenu elastičnih svojstava tla iz izmjerenih podataka površinskih valova (Slika 24.). Pri procjeni se mogu koristiti različiti podaci: valne snimke s terena, disperzijske slike ili disperzijske krivulje, a odabir zavisi od izabrane metode inverzije.



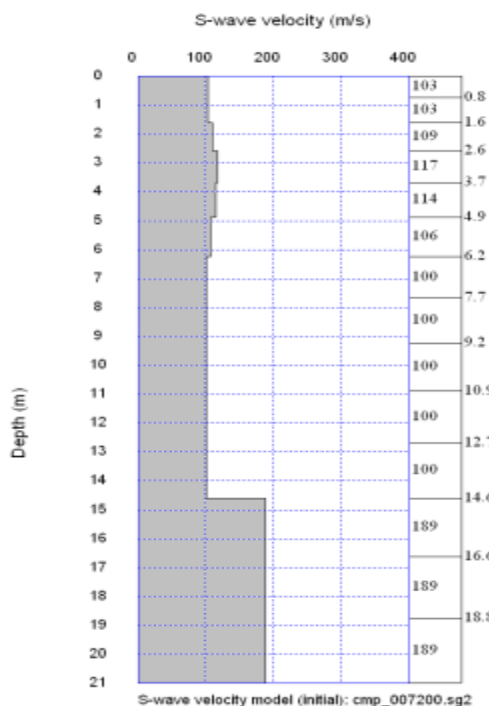
Slika 24. (a) Snimka sa terena; (b) disperzijska slika; (c) disperzijska krivulja; (d) 2D Vs profil

Iz inverzije disperzijske krivulje dobije se prikaz brzine posmičnih valova (V_s) po dubini – 1D profil (slika 25) ili 2D profil (slika 26). Ovim postupkom može se napraviti profiliranje slojeva tla na temelju elastičnih svojstava tla (krutost tla kod malih deformacija).

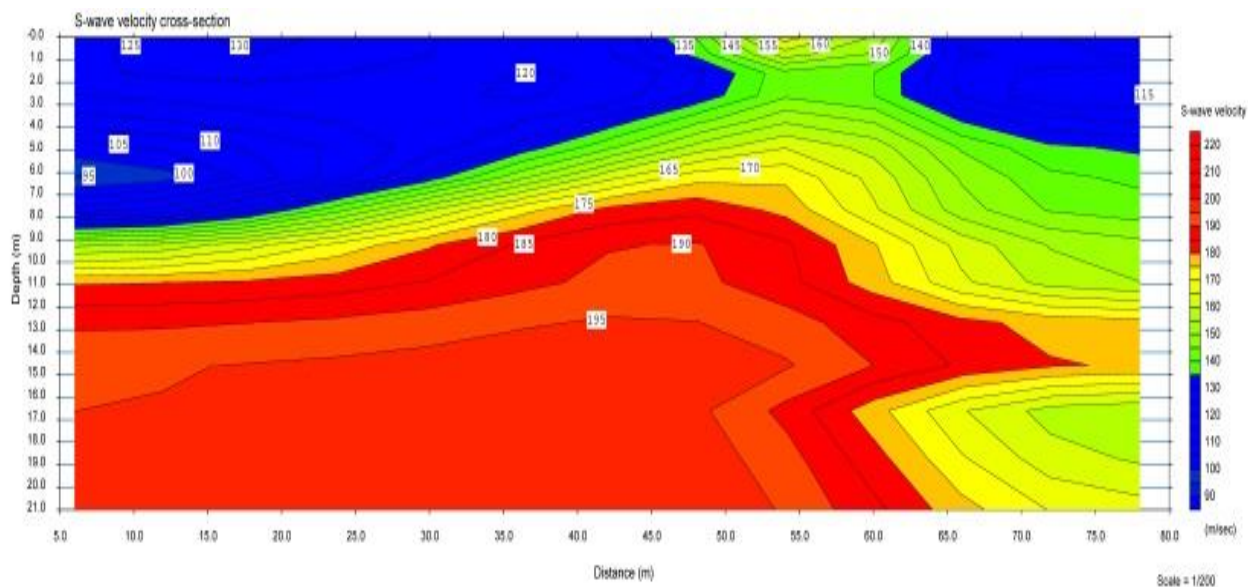
Izmjerena krivulja najviše je osjetljiva na promjene V_s po dubini dok se lateralne promjene često uprosječe tijekom obrade podataka. Ovaj 1D model v_s se naziva i uslojeni model tla koji može uključivati podatke o v_p , v_s i ρ ili samo v_s sa fiksiranim ostalim podacima. Uslojeni model tla ne uzima u obzir lateralne promjene kao neki proizvoljni model tla. U stvarnosti neka vrsta lateralne promjene uvijek postoji ali metode površinskih valova pretpostavljaju uslojeni model tla te prikazuju takvu strukturu u jednoj dimenziji (dubini) ispod geofonskog rasporeda, što se i naziva sondiranje. Prilikom višekanalnog prikupljanja podataka ovaj jednodimenzionalni profil se pripisuje sredini geofonskog rasporeda na površini

terena. Prikupljanjem većeg broja 1D profila sa različitim koordinatama na površini moguće je konstruirati 2D profil v_s koristeći određenu metodu interpolacije.

Ova metoda inverzije koja se bazira na osnovnome modu (M0) da bi se našao 1D profil v_s je najčešće korištena metoda inverzije u MASW metodi.



Slika 25. 1D- profil brzina posmičnih valova



Slika 26. 2D- profil brzina posmičnih valova

5. Primjena MASW metode na terenu

5.1. Primjer Ivanec

Potrebno je bilo izraditi geotehničko izvješće za potrebe kontrole poboljšanja temeljnog tla, u svrhu izgradnje dodatne hale za kartonažu. Za potrebe izrade izvješća izvedeni su geotehnički istražni radovi pomoću MASW metode. Svrha istražnih radova bila je dobivanje uvida u geotehničke značajke tla, te na osnovu tih podataka određivanje stupnja poboljšanja tla. U izvještaju su dani podaci o seizmičkoj brzini posmičnih valova, a sve u svrhu određivanja posmičnog modula prije i nakon poboljšanja.

Programom istraživanja izvedeno je pet (5) MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) profila na lokaciji Ivanec, k.o. Kaniža, k.č.br. 1316. Položaj istražnih radova u odnosu na tlocrtnu situaciju građevine prikazan je na situacijskom planu (prilog 3).

Mjerena su provedena:

1. Prije poboljšanja tla: 14.04.2016.
2. Poslije poboljšanja tla: 22.04.2016.

MASW dispozitiv sastojao se od 24 vertikalna geofona frekvencije 4.5 Hz, postavljena na međusobnom razmaku od 1, 2 ili 3 metra (slika 27). Nakon postavljanja vertikalnih geofona, krenulo se s udaranjem čekića po pločici. Pločica se postavlja na pola razmaka između dva geofona i svaki puta se udara minimalno dva puta kako bi se izbjegle okolne smetnje (noise). Prije prvog i poslije zadnjeg geofona se udaralo četiri puta. Svaki udarac zabilježen je na seizmograf (slika 28). Seizmograf je mjerni instrument kojim se mjere i bilježe pomaci tla.

Pri interpretaciji MASW mjerenja koristi se fundamentalni ili osnovni mod. Interpretacija mjerene krivulje disperzije na lokaciji dispozitiva MASW profila, provedena je računalnom aplikacijom SeisImager, OYO Corporation v. 4.0.1.6. Na slikama su prikazani rezultati interpretacije MASW, odnosno brzina posmičnih valova v_s po dubini sondiranog tla.



Slika 27. Geofonski postav na terenu (profil MASW 1-prije)



Slika 28. Seizmograf za bilježenje brzina valova

5.1.1. Rezultati seizmičkih ispitivanja tla

Analiza mjerenja površinskih valova provedena je na nepoboljšanom dijelu tla i na poboljšanom dijelu tla. Poboljšanje tla je rađeno šljunčanim pilotima dubine 7.50+ m i to samo ispod temelja samaca.

Ispod svakog temelja samca izvršeno je poboljšanje temeljnog tla izvedbom šest (6) ili devet (9) šljunčanih pilota promjera 70 cm. Između temelja samaca nije vršeno nikakvo poboljšanje tla. Mjerenje površinskih valova MASW metodom rađeno je u osi A/3-6 - 2/D-F u svrhu utvrđivanja koeficijenta poboljšanja temeljnog tla.

Izvedeno je pet (5) MASW profila, po jedan 2D na nepoboljšanom tlu u osi "A" i osi "2", te tri (3) 1D profila na poboljšanom dijelu temeljnog tla. Mjerenjem su određena po dubini brzine posmičnih valova (v_s).

Za određivanje stupnja poboljšanja tla rađene su usporedbe posmičnog modula (G_o) kod malih deformacija koji je u direktnoj vezi s posmičnom brzinom (v_s) preko izraza :

$$G_o = \frac{\gamma}{g} \cdot v_s^2 \quad (7)$$

gdje su:

g – jedinično ubrzanje sile teže, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

γ - jedinična težina tla dobivena iz izraza :

Nepoboljšano tlo : $\gamma = 16 + 0.002 \cdot v_p^2$

Poboljšano tlo : $\gamma = 17 + 0.002 \cdot v_p^2$

v_p – brzina primarnih valova

Tlo je analizirano u četiri (4) intervala (geotehničke zone) mjereno od postojeće površine terena:

- zona 1 (dubina 0-1,50 m) - nije izvođeno poboljšanje tla
- zona 2 (dubina 2-4 m)
- zona 3 (dubina 4-6 m)
- zona 4 (dubina 6-8 m).

Poboljšanje tla ide od dubine cca 1.50 m do 7,50 m mjereno od površine terena (prolazi kroz geotehničku zonu 2,3 i 4)

U tablici je dan prikaz raspona dobivenih rezultata za poboljšano i nepoboljšano temeljno tlo. Detaljan prikaz poboljšanja ispod svakog temelja dan je na slikama i tablicama koje slijede:

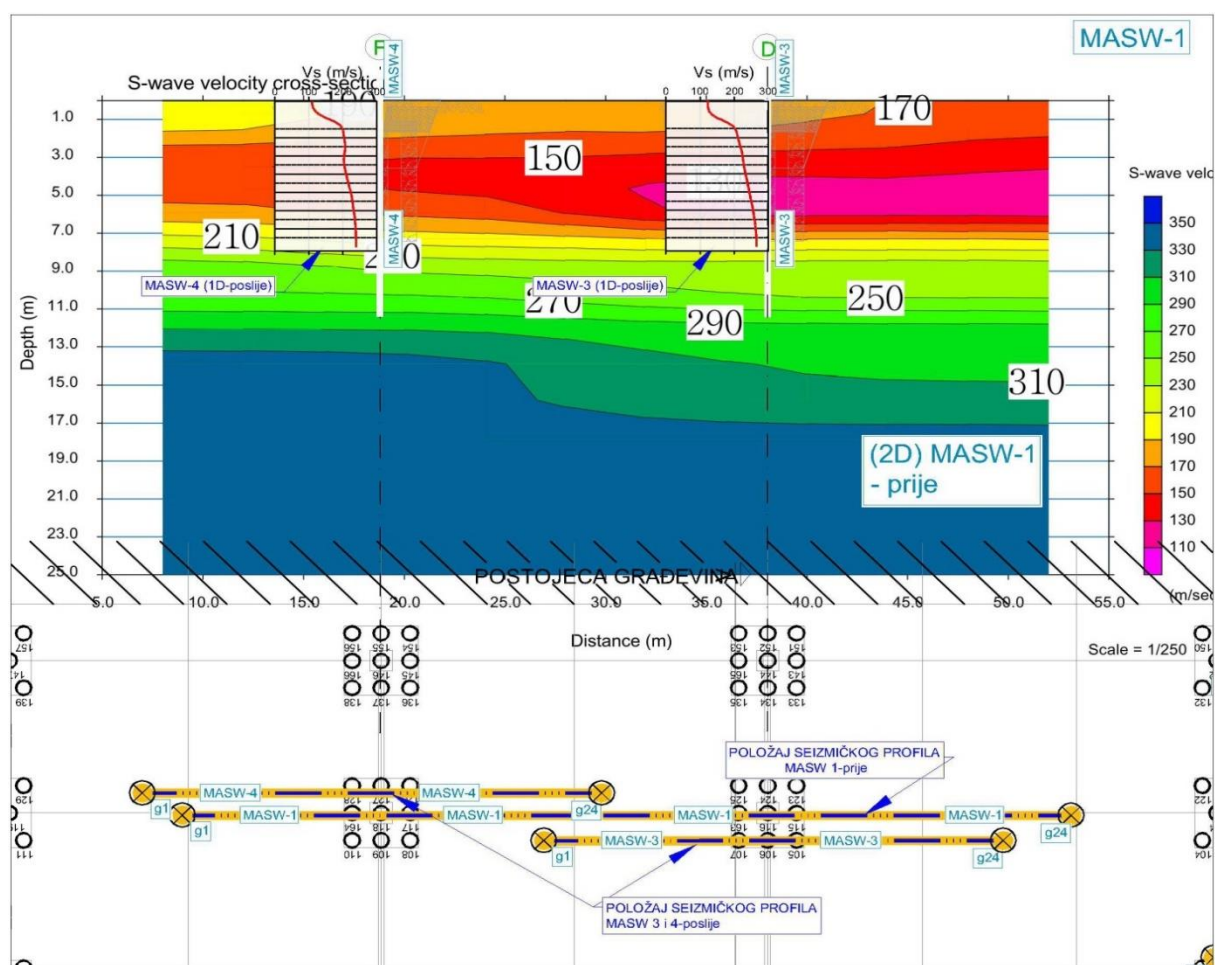
Tablica 1: Prikaz raspona dobivenih parametara tla i koeficijent poboljšanja temeljnog tla

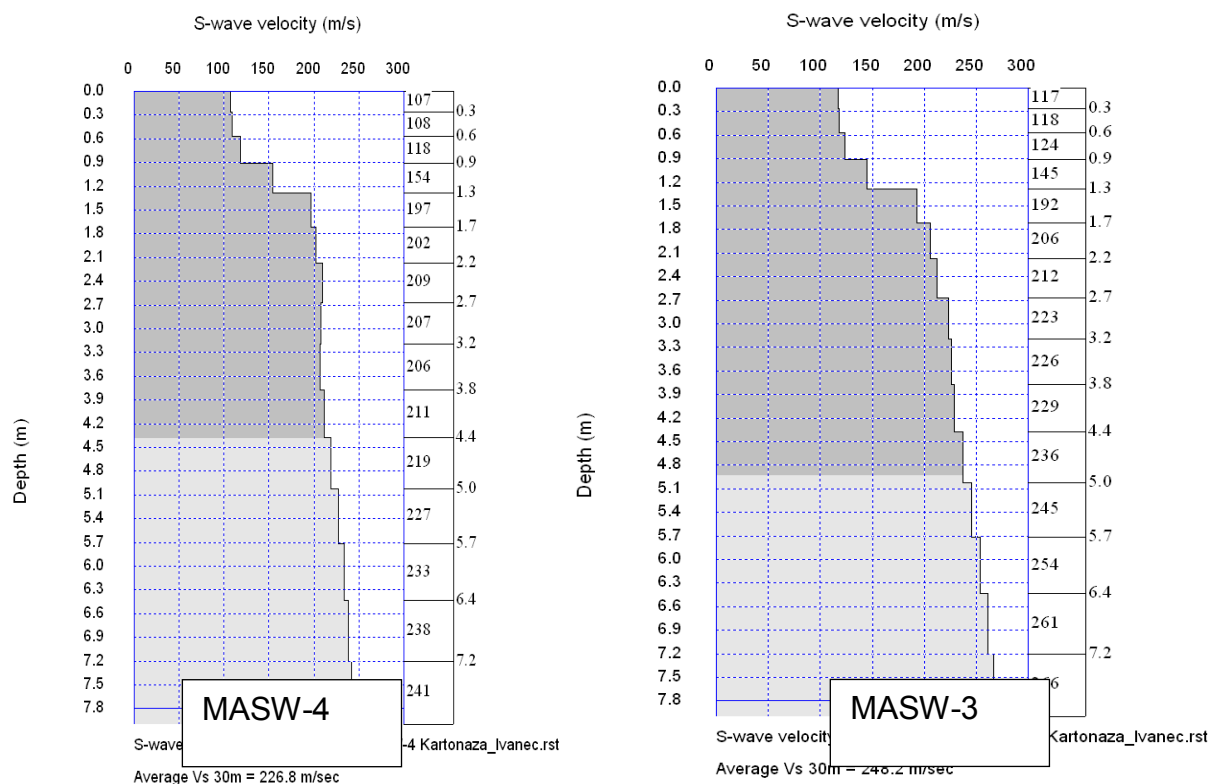
TEMELJ, OS 2/D

GEOTEHNIČKA ZONA	NEPOBOLJŠANO TLO			POBOLJŠANO TLO			Koeficijent poboljšanja	
	γ [kN/m ³]	v_s [m/s]	$G_{o,n}$ [kPa]	γ [kN/m ³]	v_s [m/s]	$G_{o,p}$ [kPa]	$K = G_{o,p} / G_{o,n}$	
Zona 1 (dubina 0-2 m)	16.5	160	42240	17.0	118	23671	0.56	2.58
Zona 1 (dubina 2-4 m)	17.5	150	39375	18.0	226	91937	2.33	
Zona 1 (dubina 4-6 m)	18.0	130	30420	18.5	236	103038	3.39	
Zona 1 (dubina 6-8 m)	18.0	190	64980	18.5	266	130899	2.01	

TEMELJ, OS 2/F

	NEPOBOLJŠANO TLO			POBOLJŠANO TLO			Koeficijent poboljšanja	
GEOTEHNIČKA ZONA	γ [kN/m ³]	v_s [m/s]	$G_{o,n}$ [kPa]	γ [kN/m ³]	v_s [m/s]	$G_{o,p}$ [kPa]	$K=G_{o,p} / G_{o,n}$	
Zona 1 (dubina 0-2 m)	16.5	160	42240	17.0	154	40317	0.95	
Zona 1 (dubina 2-4 m)	17.5	150	39375	18.0	207	77128	1.96	
Zona 1 (dubina 4-6 m)	18.0	140	35280	18.5	227	95329	2.70	
Zona 1 (dubina 6-8 m)	18.0	190	64980	18.5	241	107450	1.65	2.10



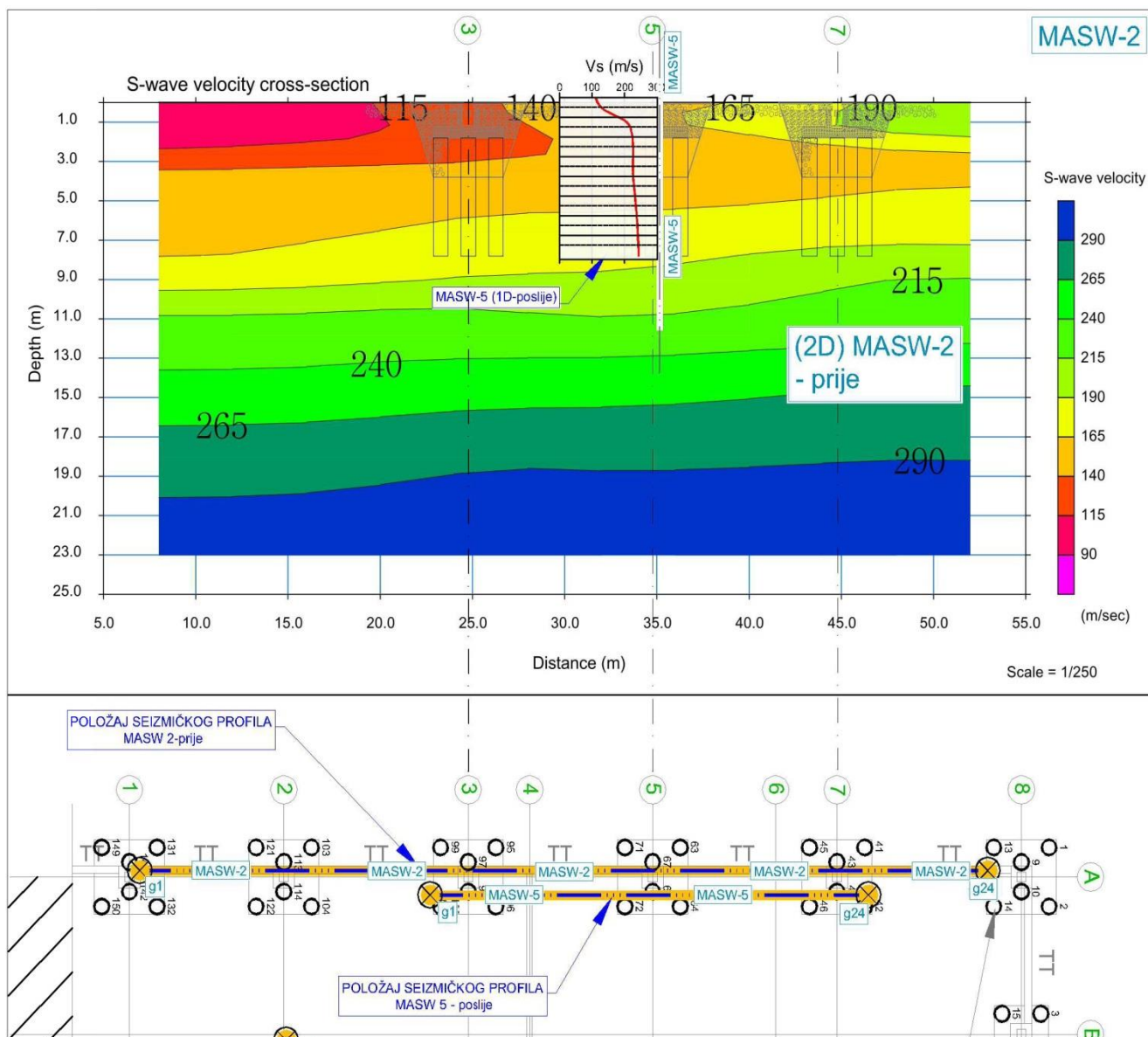


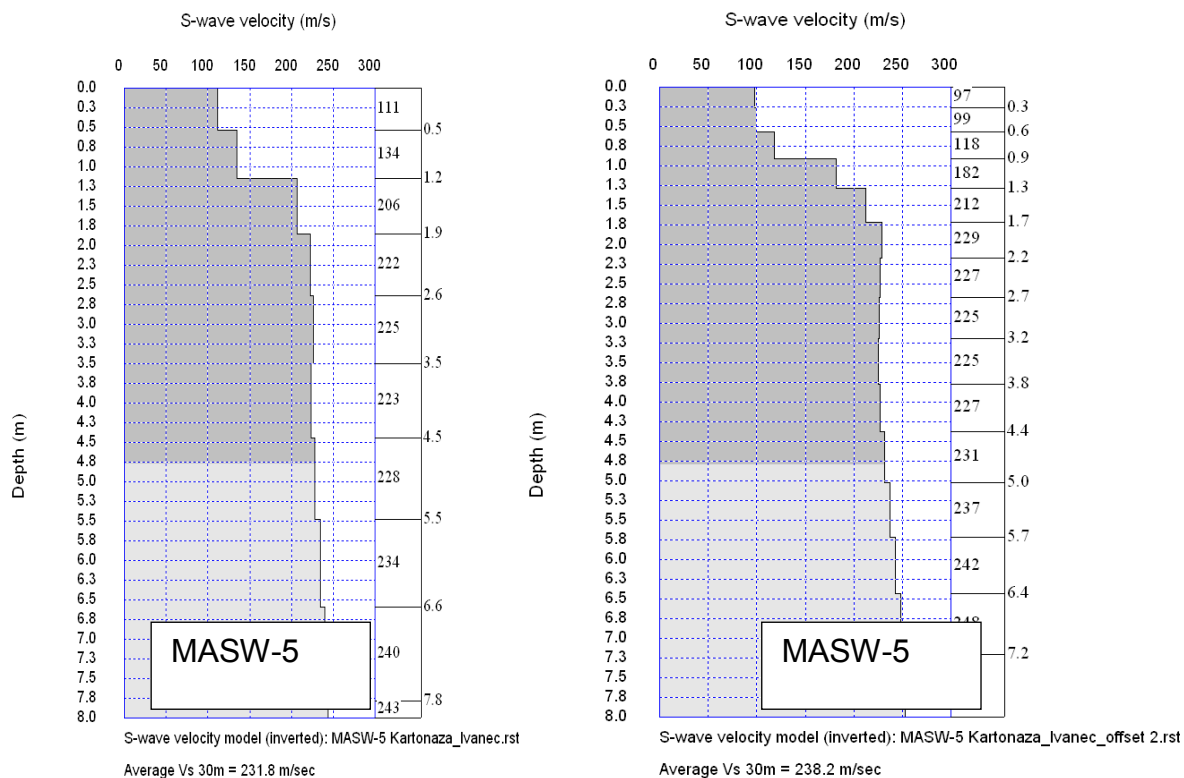
Slika 29. Poboljšanje temeljnog tla: 2D profil i položaj seizmičkog profila, 1D- profil, os 2/F.

Tablica 2: Prikaz raspona dobivenih parametara tla i koeficijent poboljšanja temeljnog tla:

TEMELJ, OS A/3-7

GEOTEHNIČKA ZONA	NEPOBOLJŠANO TLO			POBOLJŠANO TLO			Koeficijent poboljšanja	
	γ [kN/m ³]	v_s [m/s]	$G_{o,n}$ [kPa]	γ [kN/m ³]	v_s [m/s]	$G_{o,p}$ [kPa]	$K = G_{o,p} / G_{o,n}$	
Zona 1 (dubina 0-2 m)	16.5	140	32340	17.0	134	30525	0.94	2.19
Zona 1 (dubina 2-4 m)	17.5	150	39375	18.0	225	91125	2.31	
Zona 1 (dubina 4-6 m)	18.0	160	46080	18.5	228	96170	2.09	
Zona 1 (dubina 6-8 m)	18.0	165	49005	18.5	240	106560	2.17	

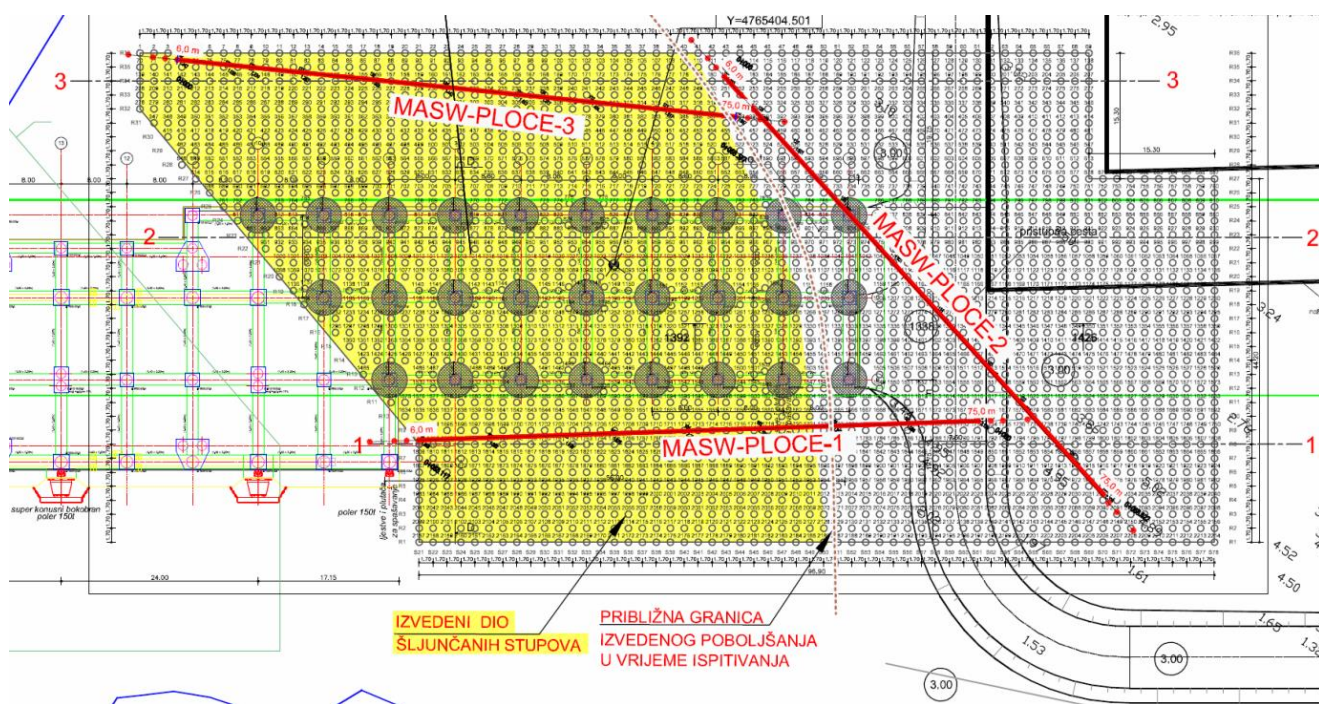




Slika 30. Poboljšanje temeljnog tla: 2D profil i položaj seizmičkog profila, 1D- profil, os A/3-7.

5.2. Primjer Luka Ploče

U svrhu izgradnje terminala za rasuti teret u Luci Ploče, bilo je potrebno izvršiti poboljšanje osnovnog tla ugradnjom šljunčanih pilota. Poboljšanje osnovnog tla provodilo se ugradnjom šljunčanih stupova nominalnog promjera prema projektu $d = 0,80$ m, u rasteru $1,70$ m. Bušenje tla vršilo se s radnog platoa približne kote $+1,5$ m.n.m, do dubine $-20,0$ m.n.m. Šljunčani stupovi su dužine od $3,5$ do $20,0$ metara i čine oblik klina. Kontrola poboljšanja tla provedena je MASW metodom.



Slika 31. Situacijski plan s položajima MASW profila

Mjerenja brzina posmičnih seizmičkih valova u svrhu određivanja stupnjeva postignutog poboljšanja tla Sr provedena su na ukupno tri seizmička profila dužine $l = 69,0$ metara. Točan položaj snimljenih seizmičkih MASW profila prikazan je na situacijskom planu (slika 31). U tablici 3 data je i dispozicija seizmičkih profila, ovisno o karakteristikama tla.

Tablica 3: Dispozicija seizmičkih profila ovisno o karakteristikama tla

MASW PLOČE - 1	seizmički profil do 50.-tog metra dispozitiva postavljen je na prostor izvedenog poboljšanja tla, a ostatak profila na nepoboljšanom prostoru radnog platoa
MASW PLOČE - 2	seizmički profil cijelim dispozitivom položen je na nepoboljšanom dijelu radnog platoa
MASW PLOČE - 3	seizmički profil gotovo cijelim dispozitivom položen je na poboljšanom dijelu radnog platoa

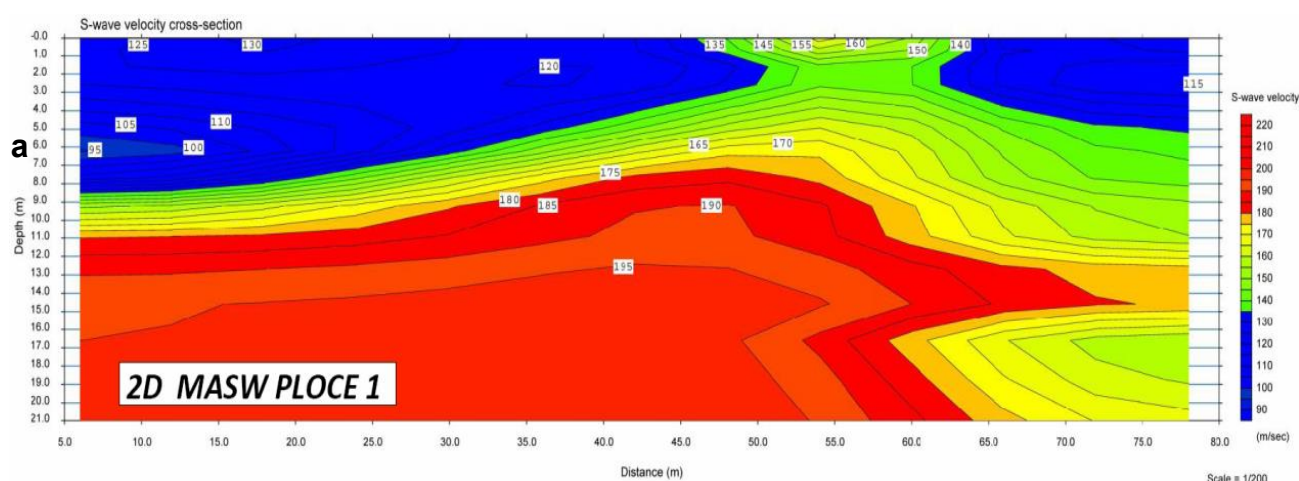
Prilikom provedenih ispitivanja korištena je oprema navedena u tablici 4.

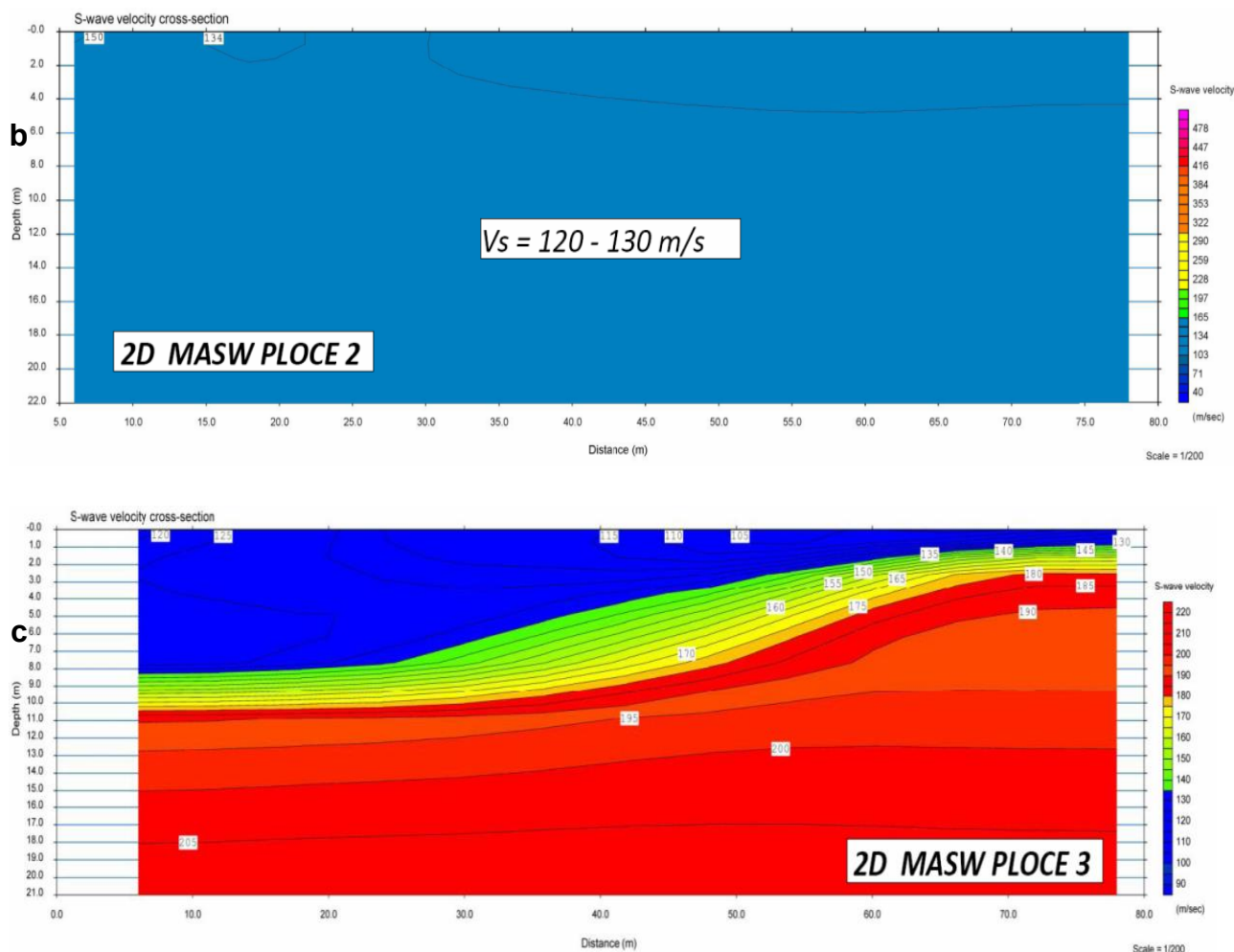
Tablica 4. Popis opreme za MASW ispitivanje

Vrsta i model opreme	Količina	Identifikacijski br.
Seizmograf – GEOMETRICS - GEODE	1	4657 1/10/10
Spojni kabeli za seizmograf – spoj na računalo i bateriju	2	P/N 28102-11
Prijenosno računalo Acer Aspire One – model KAV10	1	LUS560BO409081 DC61160
Geofonski kabel – GEO SPACE TECHNOLOGIES, 24s @3m	1	136115-001 1/10 GSC1387
Geofon – GEO SPACE sa spojnim kablom d = 1,1 m	25	13-105-030D

5.2.1. Rezultati seizmičkih ispitivanja tla

Kao i kod interpretacije rezultata za primjer Ivanec, se koristila računalna aplikacija SeisImager, OYO Corporation v. 4.0.1.6. Pri interpretaciji MASW mjerenja koristio se fundamentalni ili osnovni mod (M0). 2D prikazi za sva tri seizmička profila nalaze se na slici 32.





Slika 32. a) 2D MASW PLOČE 1; b) 2D MASW PLOČE 2; c) 2D MASW PLOČE 3

Na temelju izmjerenih brzina posmičnih seizmičkih valova na ukupno tri seizmička profila određeni su posmični (G_0) i elastični moduli (E_0), iz čega i stupnjevi postignutog poboljšanja tla (S_r).

Početni (inicijalni) posmični modul vezan je za brzinu širenja posmičnih valova (V_s) i zapreminsku gustoću tla (ρ), prema sljedećem izrazu:

$$G_0 \text{ (dyn)} = \rho \cdot V_s^2 \quad (8)$$

Modul elastičnosti (početni - iz seizmičkih ispitivanja):

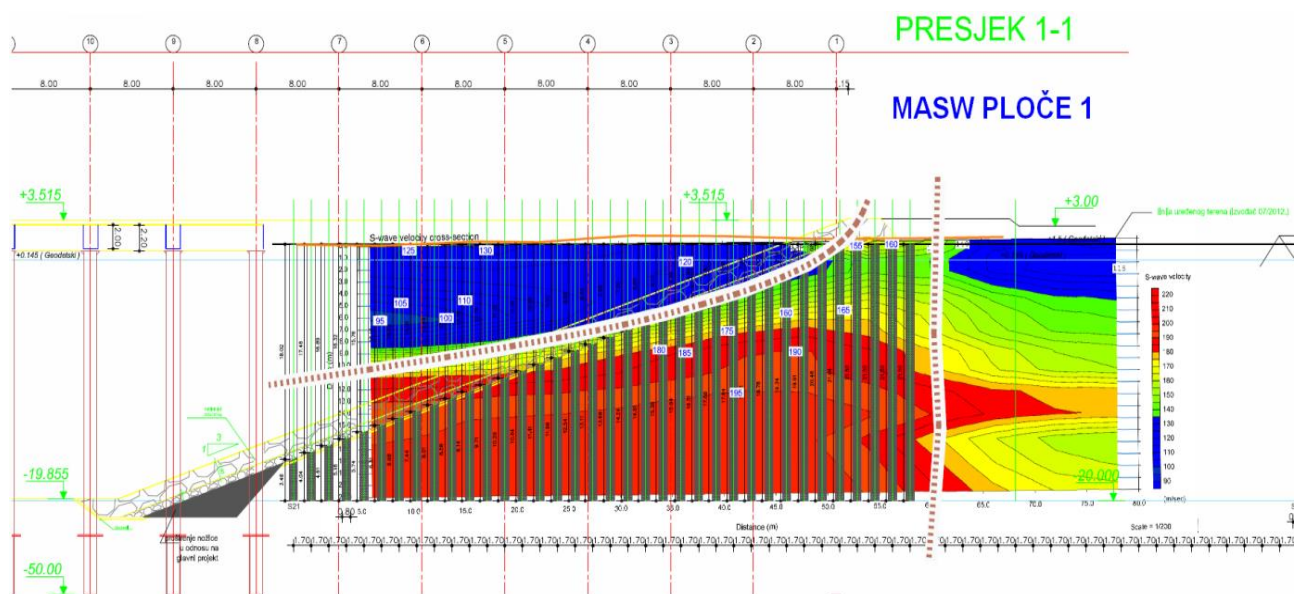
$$E_0 \text{ (dyn)} = 2 \cdot \rho \cdot V_s^2 \cdot (1 + \nu) = 2 \cdot (1 + \nu) G_0 \text{ (dyn)} \quad (9)$$

gdje je :

- V_s - brzina širenja posmičnih seizmičkih valova [m/s]
- ρ - zapreminska težina tla [kN/m³]
- ν - Poisson-ov koeficijent [1]

Seizmički profil MASW PLOČE 1

Profil brzina širenja posmičnih seizmičkih valova ostvaren MASW seizmičkim ispitivanjem preklapljen je na izvedbeni profil šljunčanih stupova, a prikazan je na slici 33. Na slici je jasno vidljiv prostor s ugrađenim šljunčanim stupovima, te dio nepoboljšanog tla.



Slika 33. Profil posmičnih seizmičkih brzina MASW PLOČE 1, preklapljen na izvedbeni profil šljunčanih stupova

Ispitani profil u pogledu preklapanja s projektiranom geometrijom šljunčanih stupova je u granicama točnosti seizmičke metode i odgovara projektiranim vrijednostima.

U tablici 4. date su izmjerene brzine posmičnih valova sraslog tla ($V_s(1)$) i na prostoru ugrađenih šljunčanih stupova ($V_s(2)$). Postignuti stupanj poboljšanja tla (S_r) definiran je odnosom krutosti tla za uvjet poboljšanog tla, te krutosti sraslog tla.

Tablica 5. Izmjerene brzine posmičnih valova na profilu MASW PLOČE 1, s parametrima za proračun postignutog stupnja poboljšanja tla

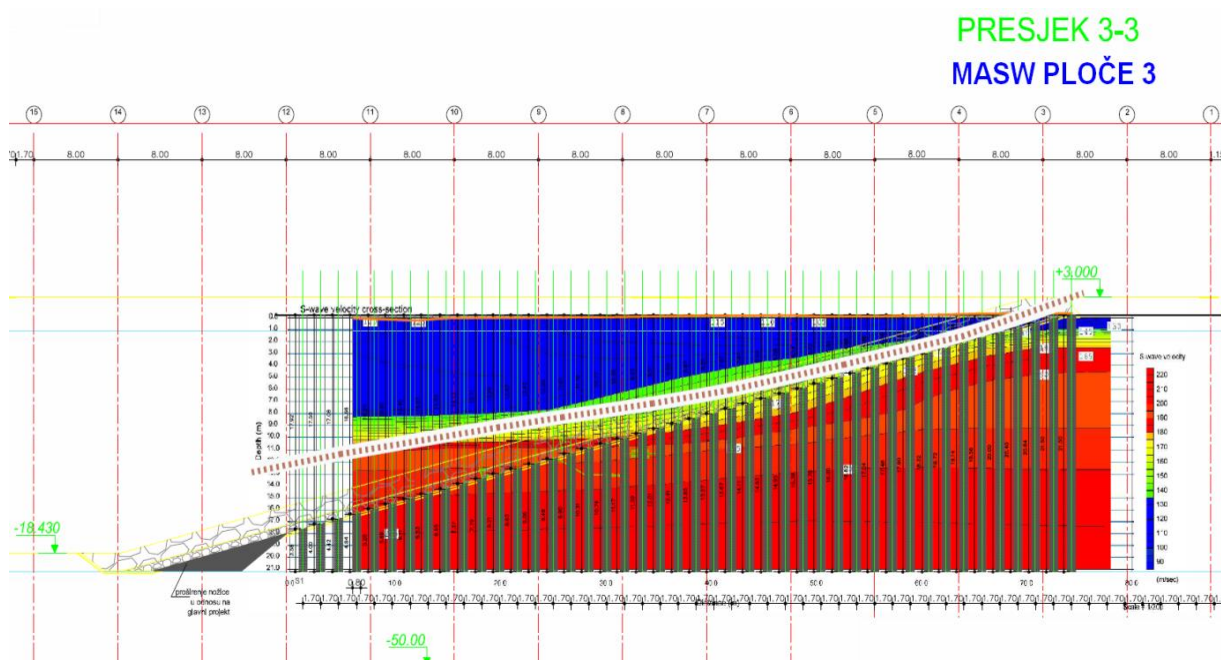
Vs(1)	Vs(2)	G0(1)	G0(2)	E0(1)	E0(2)	E0(1)/ E0(2)
[m/s]	[m/s]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	
105	175	17,64	49	38,81	107,8	2,8
115	205	21,16	67,24	46,55	147,93	3,2
Sr						3,0

Seizmički profil MASW PLOČE 2

Kako je profil MASW PLOČE 2 pozicioniran na nepoboljšanome dijelu radnog platoa, iz tog razloga nije računat stupanj poboljšanja, a izmjerene vrijednosti brzina posmičnih valova sraslog tla su u rasponu od 120 do 130 m/s (slika 31b).

Seizmički profil MASW PLOČE 3

Kao profil MASW PLOČE 1 i ovaj profil brzina širenja posmičnih seizmičkih valova MASW ispitivanja preklopljen je na izvedbeni profil šljunčanih stupova (slika 34). Na slici je vidljiv prostor s ugrađenim šljunčanim stupovima, a ispitani profil je u pogledu preklapanja sa projektiranom geometrijom šljunčanih stupova u granicama točnosti seizmičke metode i odgovara projektiranim vrijednostima.



Slika 34. Profil posmičnih seizmičkih brzina MASW PLOČE 3, preklopljen na izvedbeni profil šljunčanih stupova

U tablici 6. date su izmjerene brzine posmičnih valova $v_s(1)$ i $v_s(2)$, te je proračunat postignuti stupanj poboljšanja tla (S_r).

Tablica 6. Izmjerene brzine posmičnih valova na profilu MASW PLOČE 3, s parametrima za proračun postignutog stupnja poboljšanja tla

$V_s(1)$ [m/s]	$V_s(2)$ [m/s]	$G_0(1)$ [MPa]	$G_0(2)$ [MPa]	$E_0(1)$ [MPa]	$E_0(2)$ [MPa]	$E_0(1)/$ $E_0(2)$
105	175	17,64	49	38,81	107,8	2,8
110	190	19,36	57,76	42,59	127,07	3,0
S_r						2,9

6. Zaključak

Karakteristike tla moguće je odrediti raznim metodama. Neke od njih su invazivne, a neke poput MASW i SASW su neinvazivne. Kako je za invazivne metode potrebno bušenje, a samim time i bušaće kolone, veliko vozilo za transport i bušenje, tim stručnjaka i osposobljenih ljudi za bušenje cijene ovih metoda su dosta velike.

Upravo iz toga razloga, ali i brzine kojom se dolazi do rezultata primjenjuju se neinvazivne metode. MASW i SASW se baziraju na analizi površinskih valova. Razlika između ove dvije metode je u načinu prikupljanja podataka na terenu i njihove obrade da bi se dobila disperzijska krivulja. MASW je puno brža i jednostavnija metoda zbog svojeg višekanalnog pristupa kod kojega nije potrebno mijenjati raspored geofona na terenu prilikom novog snimanja.

Sve što je potrebno za MASW metodu su geofoni, njih 24, čekić, pločica i seizmograf. Nakon terenskog mjerenja podatke je potrebno obraditi koristeći neki od programskih paketa koji tomu služe. Podaci dobiveni mjerenjima u Ivancu i Luci Ploče obrađeni su u programskom paketu SeisImager.

Na osnovi provedenih ispitivanja na lokacijama Ivanec i Luka Ploče u svrhu kontrole poboljšanja temeljnog tla MASW metodom, te interpretacijom rezultata može se zaključiti da je poboljšanje tla uspješno u oba slučaja.

Literatura

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

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

[1] Lebo Ž. *Usporedba krutosti tala pri malim deformacijama*, Magistarski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2011.

[3] Filipović A. *Određivanje dinamičkih parametara tla pri malim deformacijama*, Završni rad. Varaždin: Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, 2012.

[4] Strelec S., Gazdek M., Jeđud B. *Procjena krutosti tla in-situ ispitivanjima i korelacije između V_s , N_{SPT} i N_{10H}*

[5] Jeđud B. *Primjena spektralne analize površinskih valova u geotehnici*, Rad za rektorovu nagradu, Varaždin: Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, 2010.

Geotehnička izvješća

Grabar K., Špiranec M., Pažur I., Marcijuš M. *Izvještaj o mjerenju posmičnih valova za potrebe utvrđivanja stupnja poboljšanja tla*, lokacija: Ivanec Jedinstvo- karotaža d.o.o., Varaždin, 2016.

Strelec S., Grabar K., Jug J. *Ispitivanje poboljšanja tla MASW metodom u terminalu za razasuti teret Luke Ploče*, Jahorina, 2013.

Podaci s interneta:

[2] http://www.geotehnika.info/Hadzalic_Izborni_Rad.pdf

www.MASW.com

<http://nastava.tvz.hr/zlatovic/knjiga/7.pdf>

http://www.geotehnika.info/Geofizicke_Metode_U_Geotehnici.pdf

Popis slika

Slika 1. Linearno elastični model

Slika 2. Mhor- Coulombova anvelopa sloma

Slika 3. Smjer širenja uzdužnog vala i smjer oscilacija čestica geomedija

Slika 4. Smjer širenja poprečnog vala i smjer oscilacija čestica geomedija

Slika 5. Smjer širenja Loveov-og vala i smjer oscilacija čestica geomedija

Slika 6. Smjer širenja Rayleigh-og vala i smjer oscilacija čestica geomedija

Slika 7. Širenje Rayleigh-ovog vala

Slika 8. Disperzija površinskih valova

Slika 9. Terenski postav SASW geofonskog rasporeda

Slika 10. Normalno disperzni i obrnuto disperzni profili

Slika 11. 1D MASW ili sondiranje

Slika 12. 2D MASW ili tomografija

Slika 13. 3D MASW ili modeliranje stvarnosti

Slika 14. Usporedba SASW i MASW metoda

Slika 15. Snimka Rayleigh-ovih valova

Slika 16a. Raspored geofona na terenu

Slika 16b. Položaj geofona u odnosu na nagib terena

Slika 17. Čekić i metalna pločica kao izvor seizmičkog vala

Slika 18. Vertikalni geofon niske frekvencije (4,5 Hz)

Slika 19. Snimka sa terena koja prikazuje domet iskoristive udaljenosti od izvora

Slika 20. Primjer glatkih disperzijskih krivulja

Slika 21. Postepeno mijenjanje disperzijske krivulje

Slika 22. Disperzijska slika sa višim modovima

Slika 23. Ograničenje frekvencija na disperznoj krivulji

Slika 24. (a) Snimka sa terena; (b) disperzijska slika; (c) disperzijska krivulja; (d) 2D Vs profil

Slika 25. 1D- profil brzina posmičnih valova

Slika 26. 2D- profil brzina posmičnih valova

Slika 27. Geofonski postav na terenu (profil MASW 1-prije)

Slika 28. Seizmograf za bilježenje brzina valova

Slika 29. Poboljšanje temeljnog tla: 2D profil i položaj seizmičkog profila, 1D- profil, os 2/F

Slika 30. Poboljšanje temeljnog tla: 2D profil i položaj seizmičkog profila, 1D- profil, os A/3-7

Slika 31. Situacijski plan s položajima MASW profila

Slika 32. a) 2D MASW PLOČE 1; b) 2D MASW PLOČE 2; c) 2D MASW PLOČE 3

Slika 33. Profil posmičnih seizmičkih brzina MASW PLOČE 1, preklopljen na izvedbeni profil šljunčanih stupova

Slika 34. Profil posmičnih seizmičkih brzina MASW PLOČE 3, preklopljen na izvedbeni profil šljunčanih stupova

Popis Tablica

Tablica 1: Prikaz raspona dobivenih parametara tla i koeficijent poboljšanja temeljnog tla os 2/D-F

Tablica 2: Prikaz raspona dobivenih parametara tla i koeficijent poboljšanja temeljnog tla os A/3-7

Tablica 3: Dispozicija seizmičkih profila ovisno o karakteristikama tla

Tablica 4. Popis opreme za MASW ispitivanje

Tablica 5. Izmjerene brzine posmičnih valova na profilu MASW PLOČE 1, s parametrima za proračun postignutog stupnja poboljšanja tla

Tablica 6. Izmjerene brzine posmičnih valova na profilu MASW PLOČE 3, s parametrima za proračun postignutog stupnja poboljšanja tla

Prilozi

Why S-Velocity (V_s)?

— Because of Shear (μ) and Young's (E) Moduli —

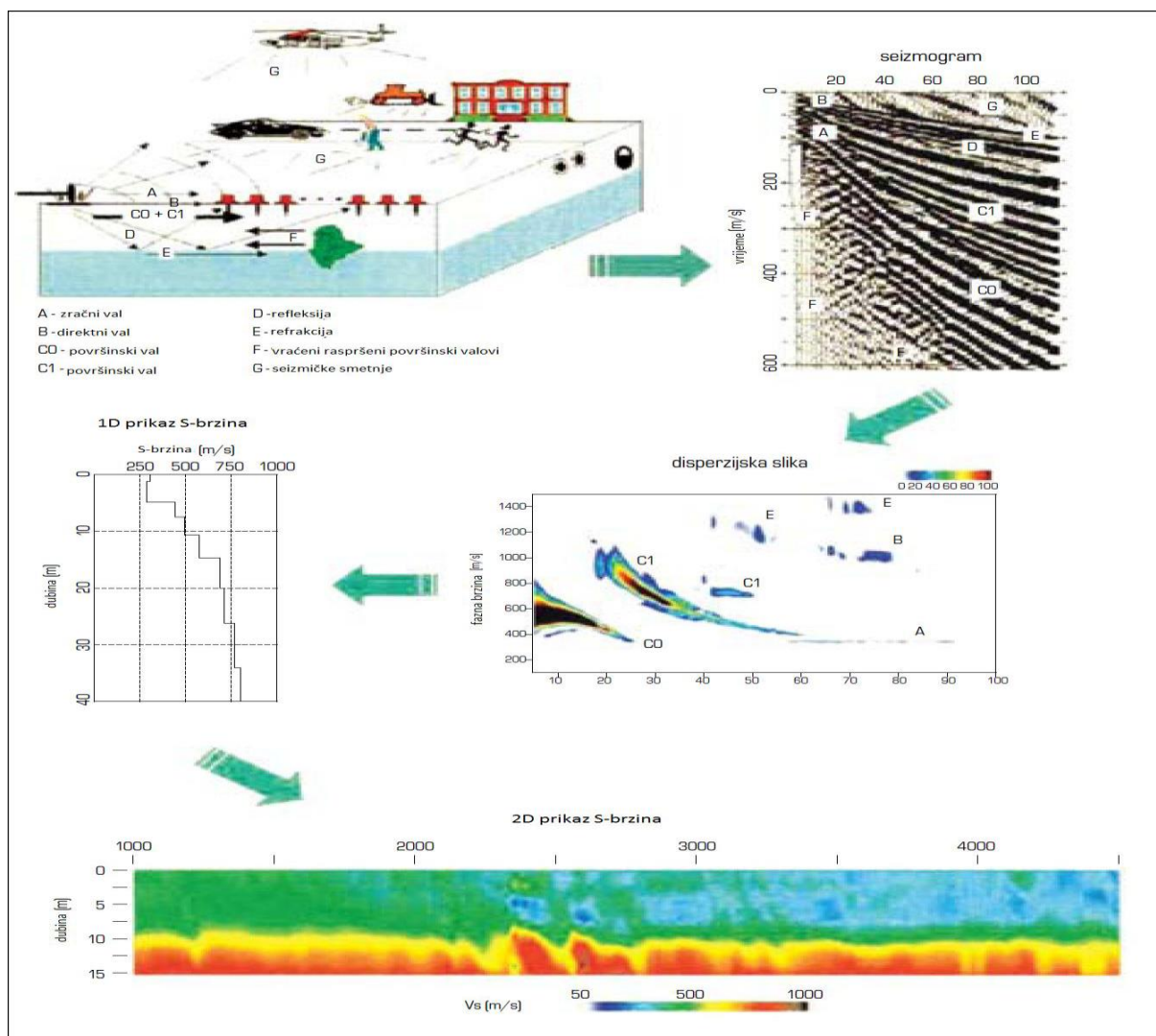
$$\mu = \rho V_s^2 \quad (\rho = \text{density})$$

(Shear modulus heavily depending on V_s)

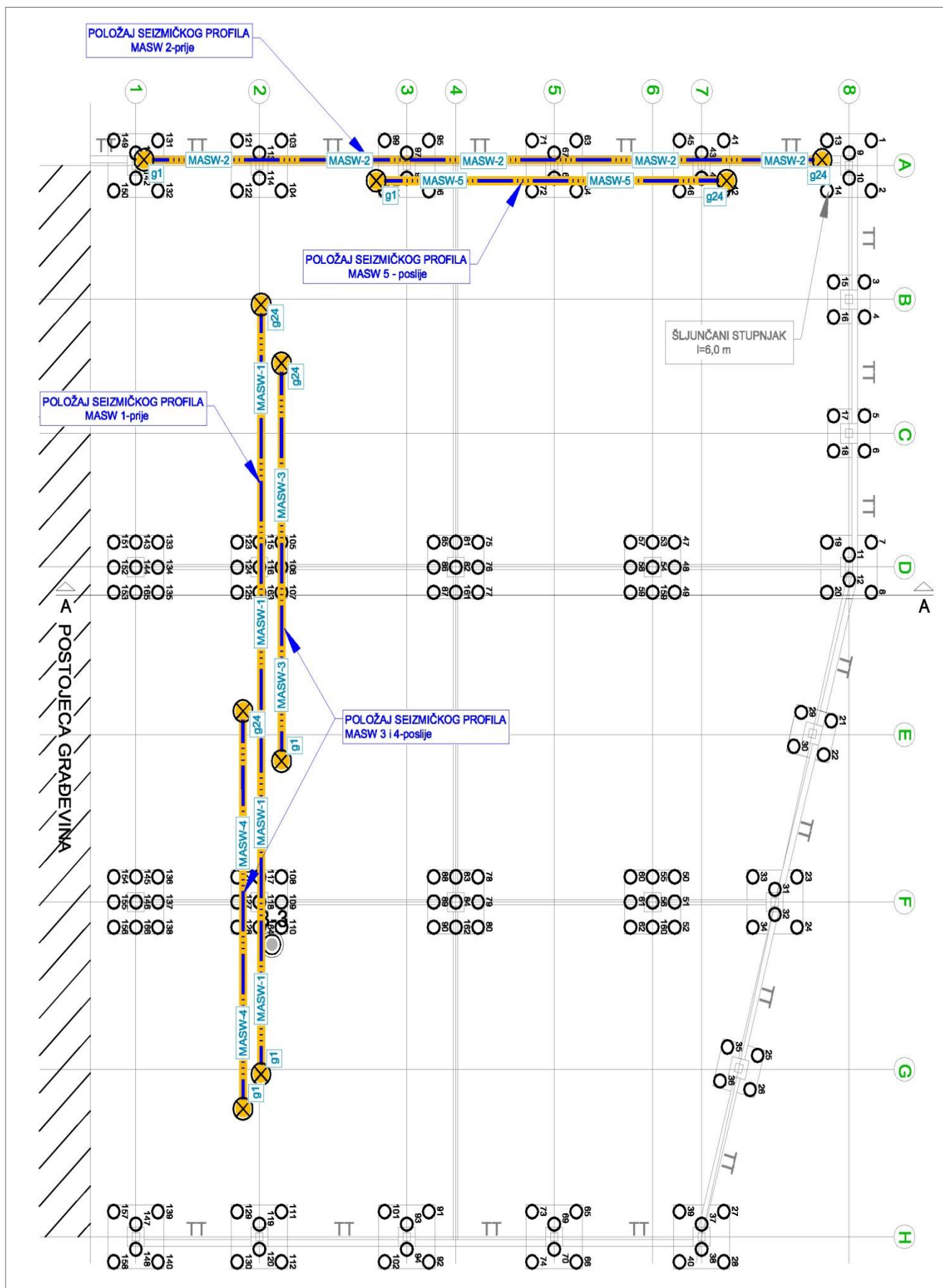
$$E = \rho V_s^2 \frac{3 \left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 4}{\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1}$$

(Young's modulus heavily depending on V_s , and almost neutral to V_p/V_s or Poisson's Ratio, σ)

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU	
GEOTEHNIČKI FAKULTET	
DIPLOMSKI RAD	
Naziv priloga: Važnost brzine posmičnih valova	Datum: 08.2016.
Mjerilo:	Broj priloga: 1
Kandidat: Matej Kostolanović	Mentor: Izv. prof. dr. sc. Stjepan Strelec



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU	
GEOTEHNIČKI FAKULTET	
DIPLOMSKI RAD	
Naziv priloga: Prikaz mjerjenja i analize podataka aktivnom MASW metodom	Datum: 08.2016.
Mjerilo:	Broj priloga: 2
Kandidat: Matej Kostolanović	Mentor: Izv. prof. dr. sc. Stjepan Strelec



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GEOTEHNIČKI FAKULTET	
DIPLOMSKI RAD	
Naziv priloga: Tlocrtna dispozicija izvedenih radova- položaj MASW profila	Datum: 08.2016.
Mjerilo:	Broj priloga: 3
Kandidat: Matej Kostolanović	Mentor: Izv. prof. dr. sc. Stjepan Strelec