

Primljen / Received: 6.7.2017.

Ispravljen / Corrected: 18.1.2018.

Prihvaćen / Accepted: 24.7.2018.

Dostupno online / Available online: 10.7.2020.

# Utjecaj svojstava tla na amplifikaciju zasićenog nehomogenog poroviskoelastičnog profila tla

## Autori:

Dr. sc. **Toufiq Ouzandja**, dipl.ing.građ.

Sveučilište A. Mira Bejaia, Alžir

Tehnološki fakultet

Laboratorij građevinskog inženjerstva i arhitekture (LGCA)

[ouzandja.toufiq@yahoo.fr](mailto:ouzandja.toufiq@yahoo.fr)

Autor za korespondenciju

Prof. dr. sc. **Mohamed Hadid**, dipl.ing.građ.

Nacionalna škola javnih radova, Alžir

Laboratorij javnih radova inženjerstva prometa i okoliša (TPITE)

[hadid\\_mohamed2003@yahoo.fr](mailto:hadid_mohamed2003@yahoo.fr)

Prethodno priopćenje

**Toufiq Ouzandja, Mohamed Hadid**

## Utjecaj svojstava tla na amplifikaciju zasićenog nehomogenog poroviskoelastičnog profila tla

U radu se analizira utjecaj lokalnih geotehničkih uvjeta tla na amplifikaciju profila tla uz pretpostavku da se dolazni seizmički valovi sastoje od kosih P-SV valova. Nehomogeni profil tla idealizira se kao višeslojni zasićeni poroviskoelastični medij karakteriziran Biotovom teorijom, pri čemu modul posmika kontinuirano varira po dubini u skladu s Wichtmannovim modelom. Rezultati su iskazani u vidu horizontalne i vertikalne amplifikacije profila tla pri linearnom i nelinearnom ponašanju tla, za razne vrijednosti upadnog kuta, stupnja zasićenosti, poroznosti, propusnosti, koeficijenta jednolikosti i udjela sitnih nekoherentnih čestica.

### Ključne riječi:

Biotova teorija, funkcija amplifikacije, nelinearno ponašanje tla, nehomogeni profil tla

Research paper

**Toufiq Ouzandja, Mohamed Hadid**

## Influence of soil properties on amplification of saturated inhomogeneous poroviscoelastic soil profile

The influence of local geotechnical site conditions on the soil profile amplification is analysed in this paper by assuming that the incoming seismic waves consist of inclined P-SV waves. The inhomogeneous soil profile is idealized as a multi-layered saturated poroviscoelastic medium and characterized by the Biot's theory with a shear modulus varying continuously in depth according to the Wichtmann's model. The results are presented in terms of horizontal and vertical soil profile amplification with linear and nonlinear soil behaviour, for different values of incidence angle, pore-water saturation, porosity, permeability, coefficient of uniformity, and non-cohesive fines content.

### Key words:

Biot's theory, amplification function, nonlinear soil behaviour, inhomogeneous soil profile

Vorherige Mitteilung

**Toufiq Ouzandja, Mohamed Hadid**

## Einfluss der Bodeneigenschaften auf die Verstärkung des gesättigten inhomogenen porös-elastischen Bodenprofils

Die Abhandlung analysiert den Einfluss lokaler geotechnischer Bedingungen auf die Verstärkung des Bodenprofils, unter der Voraussetzung, dass die ankommenden seismischen Wellen aus schrägen P-SV-Wellen bestehen. Das inhomogene Bodenprofil wird als mehrschichtiges gesättigtes porös-elastisches Medium idealisiert, das durch die Biot-Theorie charakterisiert ist, wobei das Schermodul gemäß dem Wichtmann-Modell kontinuierlich in der Tiefe variiert. Die Ergebnisse werden in Form einer horizontalen und vertikalen Verstärkung des Bodenprofils bei linearem und nicht linearem Bodenverhalten für verschiedene Werte des Einfallswinkels, Sättigungsgrads, Porosität, Durchlässigkeit, des Gleichmäßigkeitskoeffizienten und Anteile kleiner inkohärenter Partikel dargestellt.

### Schlüsselwörter:

Biot-Theorie, Verstärkungsfunktion, nicht lineares Bodenverhalten, inhomogenes Bodenprofil

## 1. Uvod

Lokalni uvjeti terena iznimno su važni za seizmički odziv građevina koje se izvode na mekom tlu [1]. Stoga se pri strogoj seizmičkoj projektiranju građevina u obzir treba uzeti složenost tla (uslojenost, poroznost, nehomogenost modula posmika, stupanj zasićenosti, propusnost itd.) jer je ona odgovorna za mnoge promjene koje utječu na seizmičke valove tijekom propagacije od izvora pobude do površine tla.

U većini prirodnih naslaga tla, mehanička svojstva i krutost rastu usporedno s povećanjem udaljenosti od površine tla [2-8]. Iskustva pokazuju kako u takvom tlu, zbog pritiska nadsloja, vrijednosti modula posmika variraju eksponencijalno s dubinom. Neki istraživači pri određivanju seizmičkog odziva naslaga tla na djelovanje upadnih ravninskih valova, naglasak stavljaju na kontinuirano variranje mehaničkih svojstava tla. Profil tla naziva se nehomogenim profilom tla, a pretpostavlja se da mu modul posmika raste u skladu s određenim eksponentom potencije dubine [9-19]. Međutim, sve se te studije mogu primijeniti samo na jednofaznom čvrstom mediju, a ne mogu se primijeniti na stvarna tla koja su često u prirodi prisutna u obliku tekućinom zasićenog poroviskoelastičnog medija. Kako su za dobivanje odziva zasićenog nehomogenog poroviskoelastičnog tla potrebni vrlo složeni proračuni, do sada je objavljen tek mali broj studija u kojima se primjenjuje Biotova teorija [20-22]. Prema toj teoriji, složena jednadžba disperzije Loveovih valova izvodi se za poprečno izotropne tekućinom zasićene porozne medije s eksponencijalnom i linearnom varijacijom modula posmika [23-24]. Disperzijsko ponašanje ravninskih valova [25] i Rayleighovih valova [26] te nestacionarni odziv viskoelastičnog poroznog medija [27], analiziraju se u nehomogenom zasićenom tlu s gradijentnom varijacijom mehaničkih svojstava po dubini. Međutim, potrebno je naglasiti da se niti u jednoj od tih studija ne analizira problem amplifikacije odziva poroznog medija. Osim toga, formule koje se u tim studijama predlažu za opisivanje nehomogenog modula posmika zasićenog poroznog profila tla nisu realne te ne uzimaju u obzir geotehničke uvjete tla kao što su klasifikacija tla (pijesak, glina itd.), stupanj zasićenosti, granulometrija, količina sitih čestica itd., što sve može bitno utjecati na amplifikaciju profila tla.

U radu se prikazuje utjecaj granulometrije u smislu koeficijenta jednolikosti, stupnja zasićenosti, poroznosti, propusnosti i količine sitih čestica, na horizontalnu i vertikalnu amplifikaciju tla pri linearnom i nelinearnom ponašanju tla. Profil tla idealizira se kao višeslojni zasićeni poroviskoelastični medij te se karakterizira pomoću Biotove teorije, uz primjenu Wichtmannovog modela [6-8] koji razmatra variranje modula posmika po dubini i u obzir uzima utjecaj granulometrije, poroznosti i količine sitih čestica na dinamička svojstva pjeskovitog tla.

Analiza seizmičkog odziva provodi se primjenom metode precizne matrice krutosti u frekvencijskoj domeni [28] uz pretpostavku da se dolazni seizmički valovi sastoje od kosih P-SV valova. Pretpostavlja se da je metoda matrice krutosti

koja se koristi u ovom radu prikladna za rješavanje problema amplifikacije poroviskoelastičnog tla prije svega zato što omogućuje smanjenje broja proračuna u odnosu na numeričke metode, a ujedno automatski uzima u obzir uvjet prostiranja.

## 2. Opis modela tla

Usvajeno je da se gibanje tla odvija prema Biotovoj teoriji dvofaznog prostiranja valova kroz zasićeni poroelastični homogeni materijal. To se temelji na pretpostavci da je gibanje čvrste matrice zapravo valno gibanje, a gibanje fluida u odnosu na čvrste tvari difuzijski je proces opisan Darcyjevom zakonom. Prema Biotovoj teoriji, konstitutivni odnosi homogenog poroelastičnog medija mogu se u Kartezijevom koordinatnom sustavu izraziti kako slijedi u izrazima (1) i (2):

$$\sigma_{ij} = \lambda e \delta_{ij} + 2G \varepsilon_{ij} - \alpha p \delta_{ij} \quad i, j = x, z \quad (1)$$

$$p = -\alpha M e + M \zeta \quad (2)$$

U tim je izrazima,  $\sigma_{ij}$  tenzor ukupnih naprezanja čvrstog skeleta tla, a  $\varepsilon_{ij}$  je tenzor deformacija; izrazi  $e = \text{div } u$  i  $\zeta = -\text{div } w$  označavaju dilatacijske komponente čvrste sredine i inkrement udjela fluida;  $p$  je porni tlak fluida,  $\lambda$  i  $G$  su Laméove konstante za rastresiti materijal,  $\delta_{ij}$  je Kroneckerova delta, dok su  $\alpha$  i  $M$  Biotovi parametri za stižljivost čestica i fluida ( $0 \leq \alpha \leq 1$  i  $0 \leq M \leq \infty$ ), što se može prikazati kako slijedi i uzrazima (3) do (6):

$$K_b = \lambda + \frac{2}{3} G \quad (3)$$

$$\alpha = 1 - \frac{K_b}{K_s} \quad (4)$$

$$\frac{1}{M} = \frac{\alpha - n}{K_s} + \frac{n}{K_f} \quad (5)$$

$$\frac{1}{K_f} = \frac{1}{K_w} + \frac{1 - S_r}{P_a} \quad (6)$$

$K_s$ ,  $K_b$ ,  $K_w$  i  $K_f$  označavaju volumni modul čvrstih čestica, skeleta, porne vode i pornog fluida.  $P_a$  je apsolutni tlak fluida,  $n$  je poroznost, a  $S_r$  je stupanj zasićenosti ( $0,95 \leq S_r \leq 1$ ).

Stoga se za pomak čvrste sredine,  $u$ , i pomak fluida u odnosu na čvrste čestice,  $w$ , jednadžbe gibanja valova mogu iskazati kako slijedi, prema [29] za:

čvrsti skelet:

$$G \nabla^2 u + (\lambda + \alpha^2 M + G) \nabla e - \alpha M \nabla \zeta = \rho \ddot{u} + \rho_f \ddot{w} \quad (7)$$

porni fluid:

$$\alpha M \nabla e - M \nabla \zeta = \rho_f \ddot{u} + m \ddot{w} + b \dot{w} \quad (8)$$

$\rho$  je gustoća porozne matrice izražena kao  $\rho = (1-n)\rho_s + n\rho_f$  gdje su  $\rho_s$  i  $\rho_f$  gustoće čvrste i tekuće faze.  $b = \eta/k$  je parametar koji se odnosi na unutarnje trenje uslijed relativnog pomicanja među čvrstim česticama i pornog fluida ( $b = 0$ , pri čemu se zanemaruje prigušenje uzrokovano strujanjem),  $\eta$  je viskoznost fluida a  $k$  je propusnost ( $m^2$ ).  $m = \tau\rho_f/n$  je parametar vezan za jediničnu gustoću pornog fluida i geometrijska svojstva pora, dok je  $\tau$  koeficijent statične tortuoznosti (geometrijska sinusoidnost poroznog medija) za inerciju koja proizlazi iz interakcije čvrstih čestica i fluida, što ovisi o obliku čvrstih čestica [30, 31].

$$\tau = 1 + r \left( \frac{1}{n} - 1 \right) \text{ za oble čvrste čestice vrijednost, } r = 0,5 \quad (9)$$

Osim toga, brzina tri tipa valova koji se javljaju u zasićenom poroznom mediju ( $V_{sv}$ ,  $V_{p1}$  i  $V_{p2}$ ) može se izračunati pomoću sljedećih izraza [28]:

$$V_{sv} = \sqrt{\frac{G(ib - \omega m)}{\omega(\rho_f^2 - \rho m) + i\rho b}} \quad (10)$$

$$V_{p1,2} = \frac{\omega}{k_{p1,2}} \quad (11)$$

$$k_{p1}^2 = \frac{-\omega_1 + \sqrt{\omega_1^2 - 4\omega_2}}{2}, \quad k_{p2}^2 = \frac{-\omega_1 - \sqrt{\omega_1^2 - 4\omega_2}}{2} \quad (12)$$

gdje je

$$\omega_1 = \frac{(\lambda + 2G + \alpha^2 M)(ib\omega - m\omega^2) + (2\rho_f\alpha - \rho)\omega^2 M}{(\lambda + 2G)M} \quad (13)$$

$$\omega_2 = \frac{\omega^4(\rho m - \rho_f^2) - ib\rho\omega^3}{(\lambda + 2G)M} \quad (14)$$

pri čemu se oštrobridni agregat iskazuje kao  $\omega$ .

S druge strane, s obzirom na nehomogenost mehaničkih svojstava profila tla koje se analizira u ovom radu, lokalno tlo može se smatrati nehomogenim profilom pješčanog tla. Modul posmika raste usporedno s povećanjem dubine a prema Wichtmannovom modelu, gdje su Hardinove jednadžbe proširene kako bi se uključio utjecaj granulometrije [6] u smislu koeficijenta jednolikosti,  $C_u$ , i utjecaja količine nekoherentnih sitnih čestica,  $FC$  [8]. Zatim se sljedeća jednostavna jednadžba koristi za određivanje modula posmika pri malim deformacijama:

$$G_{\max} = A \frac{(a - e_1)^2}{1 + e_1} \left( \frac{\sigma'_v}{P_{atm}} \right)^{n'} P_{atm} \quad (15)$$

gdje je

$$a = 1.94 \exp(-0.066 C_u) \exp(0.065 FC) \quad (16)$$

$$n' = 0.40 C_u^{0.18} [1 + 0.116 \ln(1 + FC)] \quad (17)$$

$$A = (1563 + 3.13 C_u^{2.98}) \frac{1}{2} [\exp(-0.3 FC^{1.1}) + \exp(-0.28 FC^{0.85})] \quad (18)$$

$$\sigma'_v = \frac{\sigma'_v}{3} (3 - 2 \sin \phi') \quad (19)$$

te gdje se koriste sljedeće oznake: koeficijent pora  $e_1$  ( $e_1 = n/(1-n)$ ), kut trenja  $\phi'$ , vertikalno naprezanje  $\sigma'_v$ , srednji tlak  $\sigma'_v$  i atmosferski tlak  $P_{atm} = 100$  kPa.

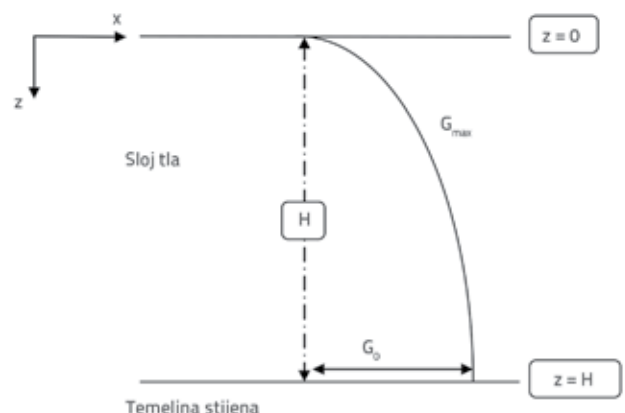
U ovom se radu pretpostavlja da profil tla ima mehanička svojstva (krutost, modul posmika) koja se povećavaju u skladu s određenim eksponentom potencije dubine ( $z$ ), sukladno s povećanjem tlačne sile nadsloja, što je iskazano kroz vertikalno naprezanje,  $\sigma'_v$  ( $\sigma'_v = \gamma'z$ ), ( $\gamma'$  je specifična težina). Osim toga kako bi se dodatno objasnila ovisnost između dubine i modula posmika, jednadžba (15) za  $G_{\max}$  prilagođena je tako da se uključi ovisnost o dubini ( $z$ ):

$$G_{\max}(z) = G_0 \left( \frac{z}{H} \right)^{n'} \quad (20)$$

gdje je

$$G_0 = A \frac{(a - e_1)^2}{1 + e_1} \left( \frac{\gamma' H}{3 P_{atm}} (3 - 2 \sin \phi') \right)^{n'} P_{atm} \quad (21)$$

Ovdje je  $H$  debljina profila tla a  $G_0$  je modul posmika na dnu (slika 1.)



Slika 1. Variranje posmičnog modula  $G_{\max}$  ovisno o dubini

Poissonov se koeficijent može iskazati kako slijedi [7, 8, 32]:

$$\nu = \frac{\alpha'}{4(1-\alpha')} + \sqrt{\left( \frac{\alpha'}{4(1-\alpha')} \right)^2 - \frac{\alpha' - 2}{2(1-\alpha')}}}, \quad \alpha' = \frac{M_{\max}}{G_{\max}} \quad (22)$$

s modulom stišljivosti  $M_{max}$  koji se za pijesak može iskazati pomoću izraza (23):

$$M_{max} = A_1 \frac{(a_1 - e_1)^2}{1 + e_1} \left( \frac{\sigma'_0}{P_{atm}} \right)^{n'_1} P_{atm} \quad (23)$$

gdje je

$$a_1 = 2.16 \exp(-0.055 C_u)(1 + 0.116 FC) \quad (24)$$

$$n'_1 = 0.344 C_u^{0.126}(1 + 0.125 \ln(1 + FC)) \quad (25)$$

$$A_1 = (3655 + 26.7 C_u^{2.42}) \frac{1}{2} [\exp(-0.42 FC^{1.10}) + \exp(-0.52 FC^{0.6})] \quad (26)$$

Ovdje treba napomenuti da je utjecaj prigušenja koji se razmatra u gornjim konstitutivnim jednadžbama uzrokovan samo interakcijom viskoznog fluida i elastične čvrste faze, pri čemu je prigušenje materijala uslijed trenja između čvrstih čestica tla uvijek prisutno. Poroviskoelastična svojstva i svojstva relaksacije pretpostavljena su zamjenom koeficijenta elastičnosti  $\lambda$ ,  $G$  i  $M$  složenim modulima  $\lambda^*$ ,  $G^*$  i  $M^*$  [33].

$$G^* = G(1 + 2i\xi_\mu) \quad (27)$$

$$\lambda^* = \lambda(1 + 2i\xi_\mu) \quad (28)$$

$$M^* = M(1 + 2i\xi_M) \quad (29)$$

$\xi_\mu$  je stupanj histereznog prigušenja, a

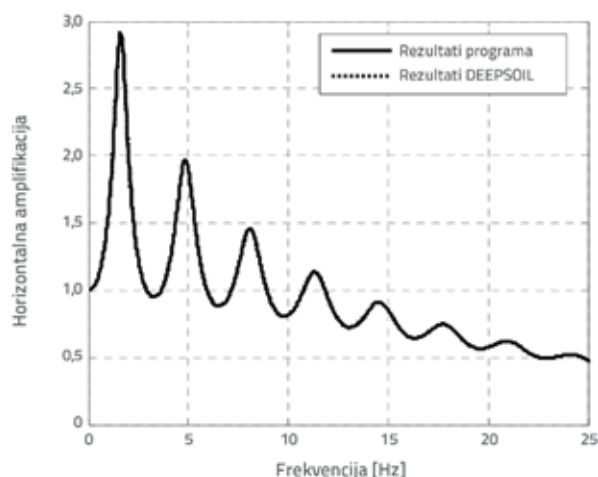
$$\xi_M = \xi_\mu \frac{(\alpha - n)}{(\alpha - n) + n \frac{K_s}{K_f}}, \text{ što se može izvesti iz jednadžbe (5).}$$

### 3. Provjera i ocjena pouzdanosti korištene metode

Otprije je poznato da se u vertikalnom smjeru SV valovi prostiru jednako kao i SH valovi. Stoga se mogu provesti usporedbe s odgovarajućim rezultatima uobičajene metode za jednodimenzionalno uzlazno prostiranje posmičnih valova. Za te potrebe možemo razmotriti jedan zasićeni poroviskoelastični jednoslojni profil tla koji leži na poluprostoru, izložen prostiranju vertikalnih SV valova. Osnovna svojstva tog profila tla prikazana su u tablici 1. Rezultati predložene metode (metoda matrice krutosti) u smislu horizontalne amplifikacije na površini uspoređeni su s rezultatima računalnog programa DEEPSOIL gdje se pretpostavlja vertikalno širenje SH valova. Analizom krivulja horizontalne amplifikacije prikazanih na slici 2. može se zaključiti da se rezultati dobiveni pomoću predložene metode (vertikalno prostiranje SV valova) savršeno podudaraju s rezultatima dobivenima primjenom programa DEEPSOIL.

Tablica 1. Svojstva sustava fluidom zasićenog poroznog profila tla – matične stijene

Svojstva	Pijesak	Poluprostor
Debljina $H$ [m]	30	/
Modul posmika $G$ [MPa]	80	1000
Propusnost $k$ [m <sup>2</sup> ]	10 <sup>-10</sup>	10 <sup>-13</sup>
Poroznost $n$	0,3	0,1
Gustoća čvrstih čestica $\rho_s$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2600	2600
Volumni modul čvrstih čestica $K_s$ [GPa]	36	36
Volumni modul porne vode $K_w$ [GPa]	2,2	2,2
Viskoznost fluida $\eta$ (Ns/m <sup>2</sup> )	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-3</sup>
Stupanj zasićenosti [%]	100	100
Prigušenje $\xi_{sh}$ [%]	5	1
Poissonov koeficijent	0,3	0,3



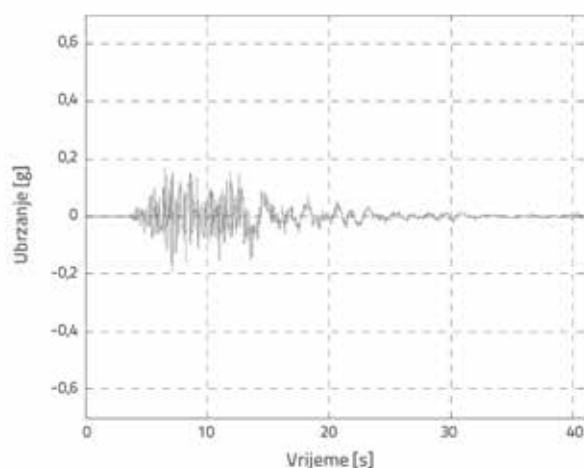
Slika 2. Usporedba horizontalne amplifikacije na površini dobivene predloženom metodom i programom DEEPSOIL

Kako bi se potvrdile pogodnosti predložene metode, simuliran je i vertikalni odziv potresa koji je zadesio otok u luci grada Kobeja 1995. godine. Pritom su korištena svojstva tla i brzine širenja valova za različite slojeve prikazane u tablici 2. [34, 35], te je pretpostavljen vertikalni upad ravninskih P valova. Osim toga, za ulazna gibanja korištena je uzlazno-silazna komponenta seizmičkih akceleroograma zabilježenih na lokaciji tog otoka na dubini od 83 m (slika 3.). Rezultati dobiveni metodom matrice krutosti također su uspoređeni s rezultatima dobivenima na mjestu potresa.

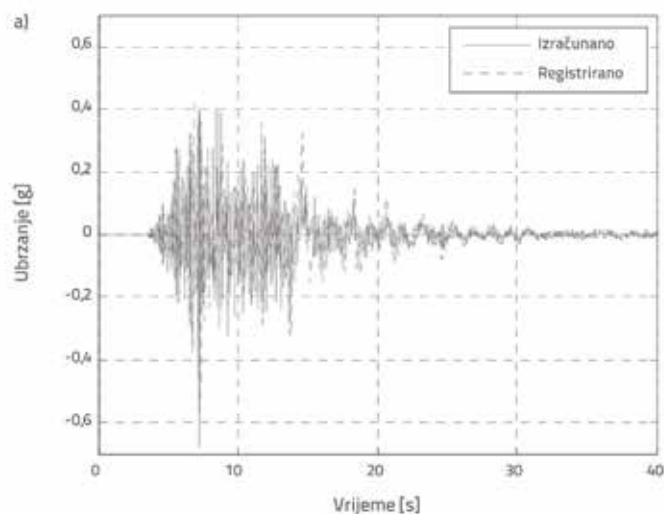
Može se uočiti da nema bitnog variranja u profilu brzina posmičnih valova ( $V_s$ ), što upućuje na zaključak da se krutost tla postupno smanjuje od dna prema površini. Međutim, na dubini od 12,6 m, može se uočiti znatno smanjenje brzine širenja P valova (od 1480 m/s na 780 m/s). To se smanjenje može objasniti utjecajem zasićenosti pornom vodom na brzinu P valova (vidi poglavlje 4.1.2). Zbog toga je u ovoj simulaciji usvojeno da je tlo potpuno zasićeno na dubinama većim od 12,6 m te djelomično zasićeno na manjim dubinama.

Tablica 2. Svojstva tla i brzine valova (lokacija: otok u luci grada Koba)

Dubina [m]	Debljina [m]	Gustoća [kN/m <sup>3</sup> ]	$V_p$ [m/s]	Faktor prigušenja [%]	$V_s$ [m/s]
0-2	2	1,8	260	17	170
2-5	3	1,8	330	17	170
5-12,6	7,6	1,8	780	17	210
12,6-19	6,4	1,8	1480	10	210
19-27	8	1,5	1180	10	180
27-23	6	1,85	1330	10	245
33-50	17	1,85	1530	10	305
50-61	11	1,85	1610	10	350
61-79	18	1,8	1610	10	303
79-83	4	1,9	2000	10	320

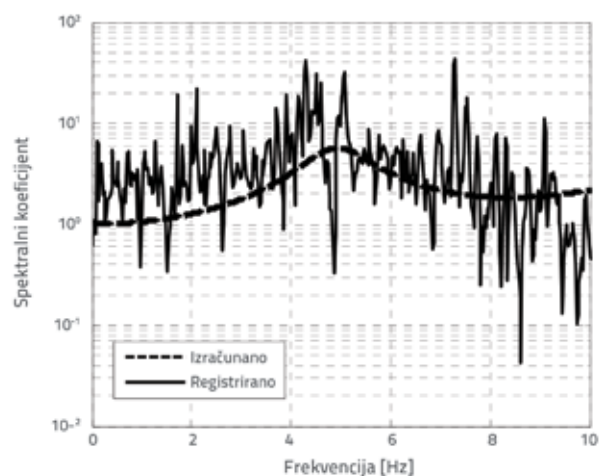


Slika 3. Vertikalna komponenta ubrzanja registrirana na dubini od 83 m (lokacija: otok u luci Kobe)



Slika 5. Usporedba: a) vertikalnog ubrzanja na površini tla; b) profila vršnog vertikalnog ubrzanja tla

Usporedba između procijenjenog i zabilježenog odziva prikazana je kao odnos spektralnih ubrzanja na površini i na dubini od 83 m (slika 4.). Usporedba između vertikalnog ubrzanja na površini tla i profila vršnog vertikalnog ubrzanja tla prikazana je na slici 5. Tu se može uočiti da se rezultati dobiveni analizom vertikalnog odziva uvelike podudaraju s rezultatima zabilježenima na otoku u luci Kobe.

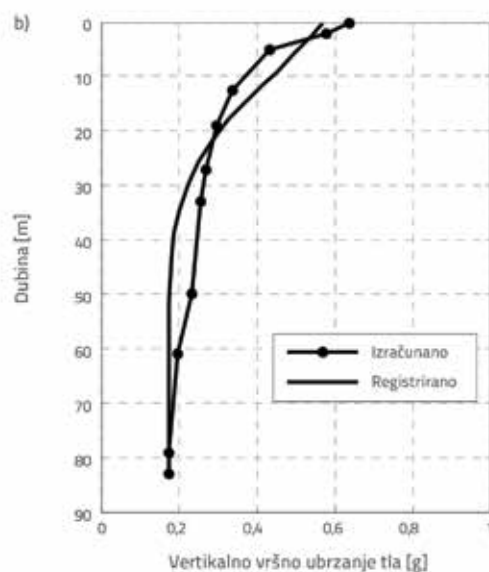


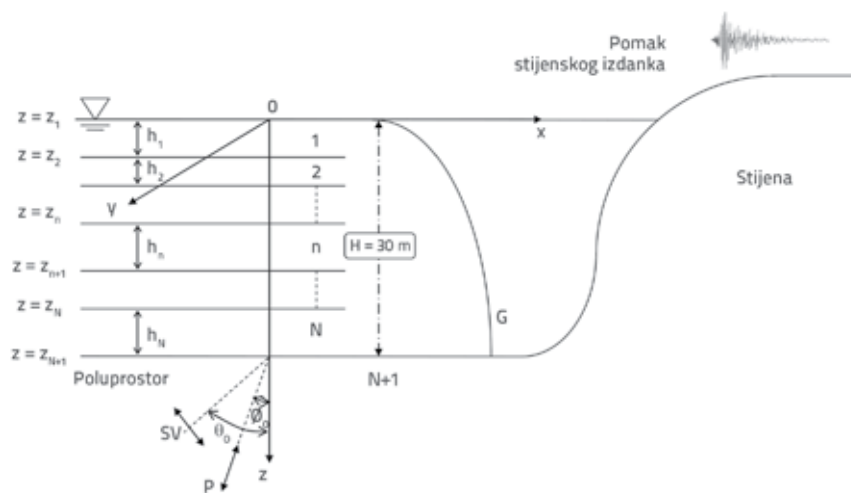
Slika 4. Usporedba odnosa vertikalnih spektralnih ubrzanja na površini tla i na dubini od 83 m

## 4. Parametarska studija

### 4.1. Linearna analiza

Ovdje se prikazuje parametarsko ispitivanje kako bi se analizirao utjecaj variranja upadnog kuta, stupnja zasićenosti, koeficijenta jednolikosti, količine sitnih čestica, poroznosti i propusnosti na dvosmjerni odziv amplifikacije





Slika 6. Geometrija profila tla

odziva poroviskoelastičnog profila tla, pri čemu se ta amplifikacija iskazuje kroz odnos gibanja na površini tla i na poluprostoru izdanka. U tom se smislu pretpostavlja da je profil tla nehomogeni 30-metarski sloj pješčanog tla smješten neposredno iznad stijenske mase, a diskretiziran je u više slojeva s konstantnim svojstvima unutar svakog podsloja (slika 6.). Pobuda se sastoji od ravninskih upadnih P i SV valova koji dolaze iz poluprostora s različitim upadnim kutovima ( $\theta_0$  i  $\theta_p$  su upadni kutovi ravninskih P i SV valova). Također je pretpostavljeno da su horizontalni odzivi uzrokovani isključivo prostiranjem SV valova, a vertikalni P valova.

U ovom se radu i profil tla i poluprostor smatraju poroviskoelastičnim materijalom koji karakterizira: stupanj zasićenosti  $S_r$ , poroznost  $n$ , propusnost  $k$ , prigušenje  $\xi_p$  ( $\xi_p$  je stupanj histereznog prigušenja koji se pretpostavlja jednakim za SV i P valove) i stižljivost čvrstih i fluidnih komponenta  $\xi_M$ . Svojstva pijeska i stijene korištenih u ovom proračunu prikazana su u tablici 3.

Tablica 3. Svojstva fluidom zasićenog sustava "porozno tlo – matična stijena"

Svojstva	Pijesak	Poluprostor
Debljina $H$ [m]	30	/
Modul posmika $G$ [GPa]	/	1,5
Propusnost $k$ [m <sup>2</sup> ]	$10^{-10}$ - $10^{-13}$	$10^{-13}$
Poroznost $n$	0,2-0,4	0,05
Gustoća čvrstih čestica $\rho_s$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2600	2600
Volumni modul čvrstih čestica $K_s$ [GPa]	36	36
Volumni modul porne vode $K_w$ [GPa]	2,2	2,2
Viskoznost fluida $\eta$ [Ns/m <sup>2</sup> ]	$10^{-3}$	$10^{-3}$
Prigušenje $\xi_p$ [%]	5	1
Kut trenja $\phi'$	35°	/

### 4.1.1. Utjecaj kuta incidencije

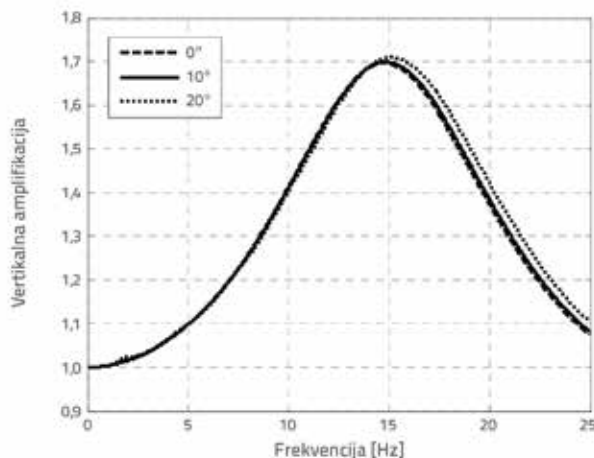
Najprije se razmatra utjecaj upadnih kutova ( $\theta_0$  i  $\theta_p$ ) na horizontalnu i vertikalnu amplifikaciju poroviskoelastičnog profila tla (slika 7.). Pretpostavlja se da upadni valovi djeluju na kontaktu profila tla – poluprostora pod kutovima od 0°, 10° i 20° u odnosu na vertikalnu os  $z$ .

Iz analize amplifikacijskih funkcija prikazanih na slici 7. vidi se da je utjecaj variranja upadnog kuta  $\theta_0$  na vertikalnu amplifikaciju za ravninski P val koji ulazi u potpuno zasićeni porozni medij, zapravo neznatna. U istom mediju, upadni kut  $\theta_0$  ravninskih SV valova utječe na horizontalnu amplifikaciju (slika 8.a). Taj je utjecaj naglašeniji u slučaju poroznog medija

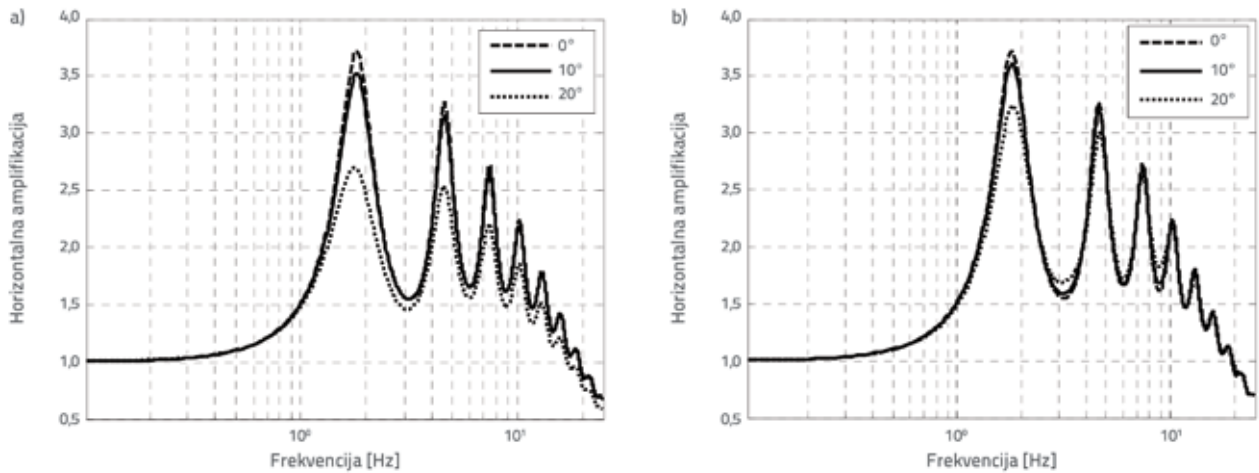
nego u slučaju čvrstog medija (slika 8.b). Također je uočeno da su te dvije horizontalne amplifikacije tla u poroznom i čvrstom mediju identične za vertikalno prostiranje SV valova (slike 8.a i 8.b).

Osim toga, amplifikacija se smanjuje s povećanjem upadnog kuta  $\theta_p$  SV valova. Tako vršna vrijednost amplifikacije iznosi 3,71 uz temeljnu frekvenciju od 1,8 Hz kada je  $\theta_0 = 0^\circ$ . Nakon toga se ta vrijednost spušta na 3,6 i 3,23 u jednofaznom mediju, te na 3,52 i 2,7 u fluidom zasićenom poroznom mediju kada  $\theta_0$  iznosi 10° odnosno 20°. Ova se razlika može objasniti činjenicom da konverzija P-SV u čvrstom i zasićenom poroznom mediju nije jednaka (slika 9.). Kada se SV val prostire kroz zasićeni porozni medij pod upadnim kutom različitim od nule, generira brzi tlačni val (val  $P_1$ ) i posmični val (val SV), slično kao i kod odgovarajućih valova u jednofaznom mediju, a također i spori tlačni val (val  $P_2$ ) koji se povezuje s izvanfaznim gibanjem između pornih fluida i čvrste faze [36].

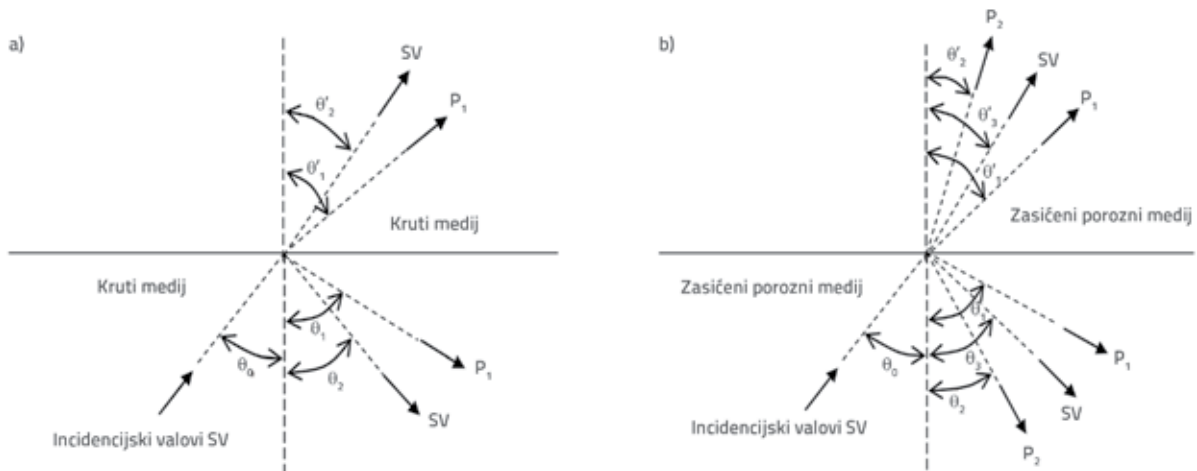
U parametarskom ispitivanju koje slijedi pretpostavlja se da upadni kutovi ( $\theta_0$  i  $\theta_p$ ) za P i SV valove iznose 10° u odnosu na vertikalnu os.



Slika 7. Utjecaj upadnog kuta na vertikalnu amplifikaciju u potpuno zasićenom poroznom mediju ( $n = 0,3$ ,  $C_v = 5$ ,  $FC = 5\%$ ,  $S_r = 100\%$ )



Slika 8. Utjecaj upadnog kuta na horizontalnu amplifikaciju: a) u popuno zasićenom poroznom tlu ( $n = 0,3$ ,  $C_u = 5$ ,  $FC = 5 \%$ ,  $S_r = 100 \%$ ); b) u čvrstom mediju



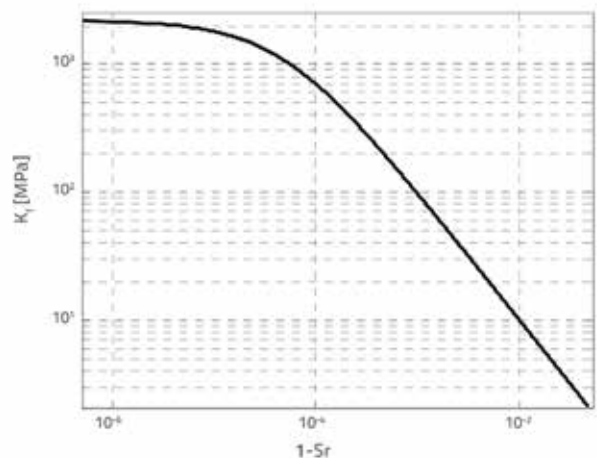
Slika 9. Refleksija i transmisija SV valova: a) u čvrstom; b) u fluidom zasićenom poroznom mediju

#### 4.1.2. Utjecaj zasićenosti pornom vodom

U geotehničkim se analizama najčešće pretpostavlja da je tlo ispod razine podzemne vode potpuno zasićeno. Međutim, u nekim uvjetima koji utječu na položaj podzemne vode, tlo ipak nije potpuno zasićeno. Tome je razlog prisutnost zraka u pornom fluidu za djelomično zasićeni slučaj. Udio takvog zraka bitno utječe na volumni modul pornog fluida, vidi jednadžbu 6.

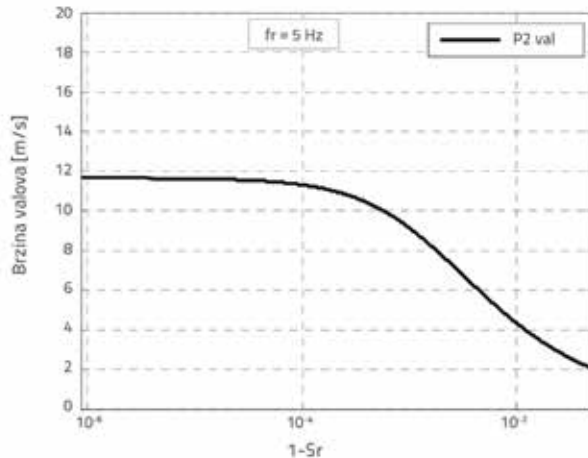
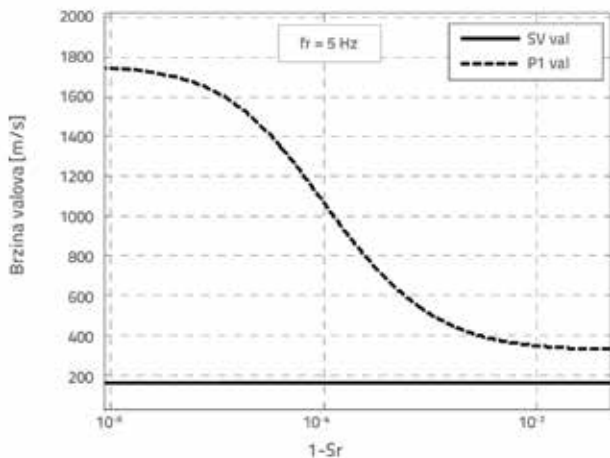
Kao što se može vidjeti na slici 10., modul pornog fluida  $K_f$  jednak je modulu porne vode (2200 MPa) za  $S_r = 100 \%$ , ali se smanjuje za 99,9 % kada  $S_r$  iznosi 95 %. Kao se uslijed djelomične zasićenosti volumni modul pornog fluida bitno smanjuje, može se reći da je pretpostavka o nestižljivosti fluida, koja se obično prihvaća u mehanici tla, u ovom slučaju neprimjerena.

Kako bi se u obzir uzeo utjecaj zasićenja na odziv na analiziranoj lokaciji, analiziraju se kako brzine seizmičkih valova tako i amplifikacija. Potrebno je napomenuti da stupanj zasićenosti utječe samo na brzinu prostiranja P valova ( $V_{p1}$  i  $V_{p2}$ ).



Slika 10. Variranje modula fluida usporedno sa stupnjem zasićenosti  $S_r$

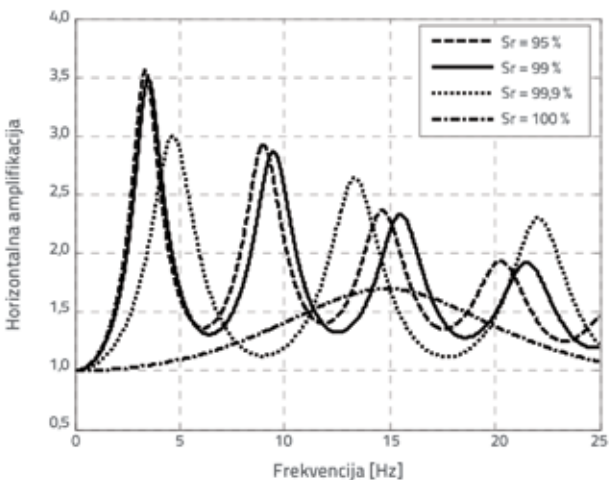
Slika 11.a pokazuje da je vrijednost  $V_{p1}$  maksimalna ( $V_{p1} = 1756 \text{ m/s}$ ) u slučaju potpune zasićenosti, a bitno se



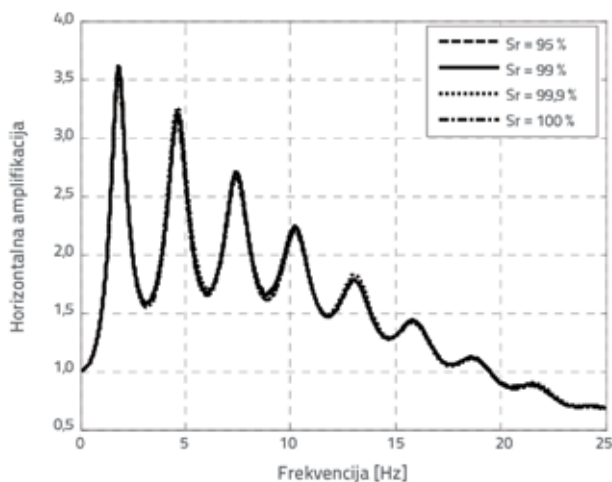
Slika 11. Utjecaj zasićenosti ( $\sigma'_0 = 100 \text{ kPa}$ ,  $C_v = 5$ ,  $FC = 5 \%$ ) na brzinu valova: a) valovi SV i P1; b) P2 val

smanjuje kada  $S_r$  iznosi 95 % ( $V_{p1} = 365 \text{ m/s}$ ), što je u skladu s modulom pornog fluida koji ovisi o zasićenosti. Val  $P_2$  izrazito je disperzivan i iskazuje tendenciju prigušenja pri niskim frekvencijama (slika 11.b). Osim toga, stupanj zasićenosti ne utječe na brzinu prostiranja SV valova (slika 11.a).

S druge strane, rezultati horizontalne i vertikalne amplifikacije dobiveni za ta četiri slučaja zasićenosti pokazuju da je utjecaj zasićenosti na horizontalnu amplifikaciju zanemariv (slika 12.). To je potpuno logično s obzirom na to da se samo tlačni valovi prostiru kroz međuprostorni fluid, a njen utjecaj je vrlo značajan na vertikalnu amplifikaciju (slika 13.). Kod malog smanjenja ispod vrijednosti potpune zasićenosti (99,9 %), vertikalna se amplifikacija bitno povećava s 1,7 na 3, uz znatan pomak frekvencije prve vršne vrijednosti na niske frekvencije, od 14,84 Hz na 4,66 Hz.



Slika 13. Utjecaj zasićenosti na vertikalnu amplifikaciju ( $n = 0,3$ ,  $C_v = 5$ ,  $FC = 5 \%$ )



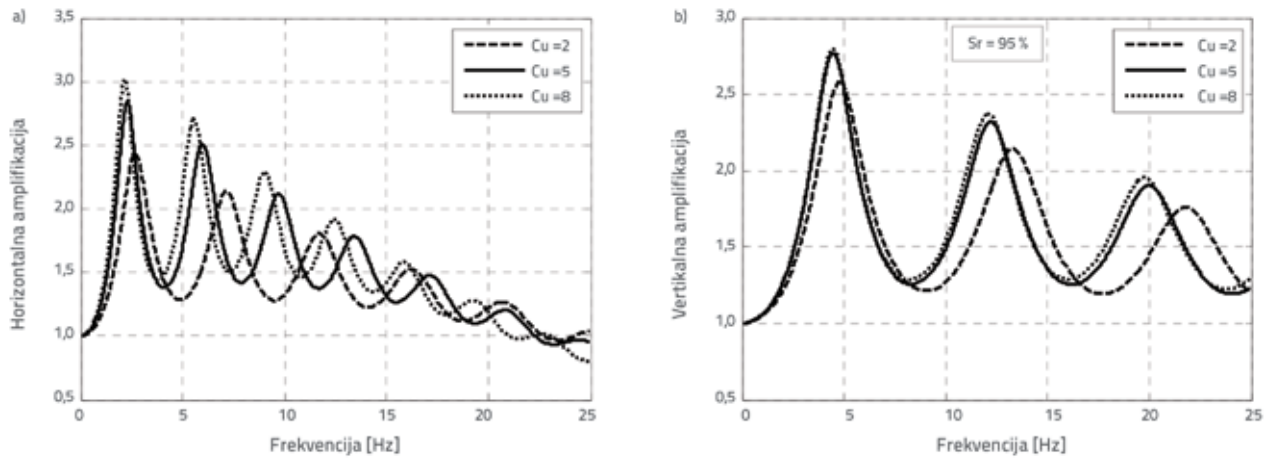
Slika 12. Utjecaj zasićenosti na horizontalnu amplifikaciju ( $n = 0,3$ ,  $C_v = 5$ ,  $FC = 5 \%$ )

### 4.1.3. Utjecaj granulometrije

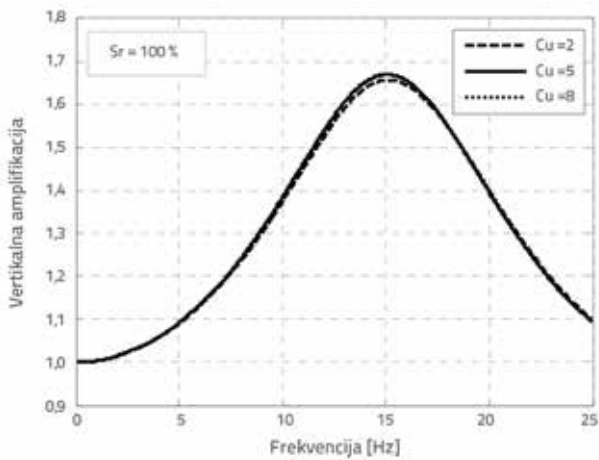
U smislu koeficijenta jednolikosti, granulometrijski sastav ima ključnu ulogu u mehanici tla i geotehničkom inženjerstvu. On tvori značajan faktor za određivanje modula posmika tla. Kada su vrijednosti  $C_v$  niske, smatra se da je tlo loše ili jednoliko graduirano, jer su veličine čestica gotovo identične. Međutim s porastom vrijednosti  $C_v$  smanjuje se modul posmika i tlo postaje dobro graduirano.

S druge strane, amplifikacijske su funkcije iskazane za različite vrijednosti  $C_v$ :  $C_v = 2, 5$  i  $8$ . Ustanovljeno je da s porastom koeficijenta jednolikosti  $C_v$  raste i amplituda vršnih vrijednosti uz pomak prema niskim frekvencijama kod horizontalne amplifikacije, ali i kod vertikalne amplifikacije u slučaju djelomično zasićenog profila tla (slika 14.). Ipak, nema utjecaja na vertikalnu komponentu u slučaju potpune zasićenosti (slika 15.).





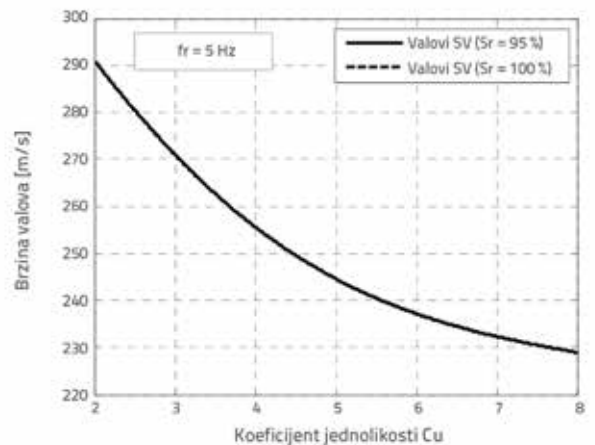
Slika 14. Utjecaj vrijednosti  $C_v$  na: a) horizontalnu amplifikaciju; b) vertikalnu amplifikaciju, ( $S_r = 95\%$ ,  $FC = 0\%$ ,  $n = 0,3$ )



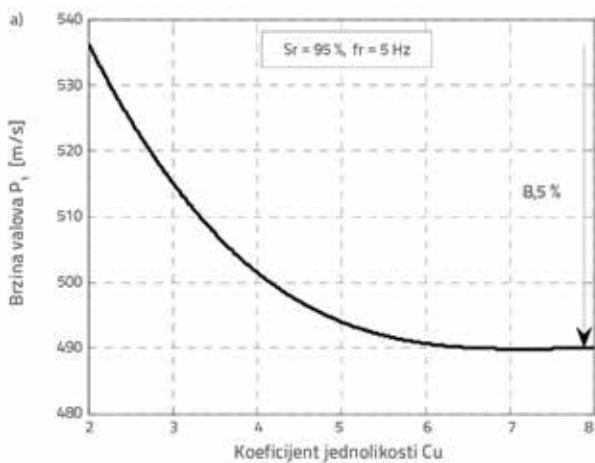
Slika 15. Utjecaj  $C_v$  na vertikalnu amplifikaciju ( $FC = 0\%$ ,  $n = 0,3$ ,  $S_r = 100\%$ )

U svrhu dodatne analize tog utjecaja, brzine seizmičkih valova iskazane su u funkciji vrijednosti  $C_v$ . Može se uočiti da se, s povećanjem vrijednosti  $C_v$  s 2 na 8, brzina  $P_1$  valova smanjuje

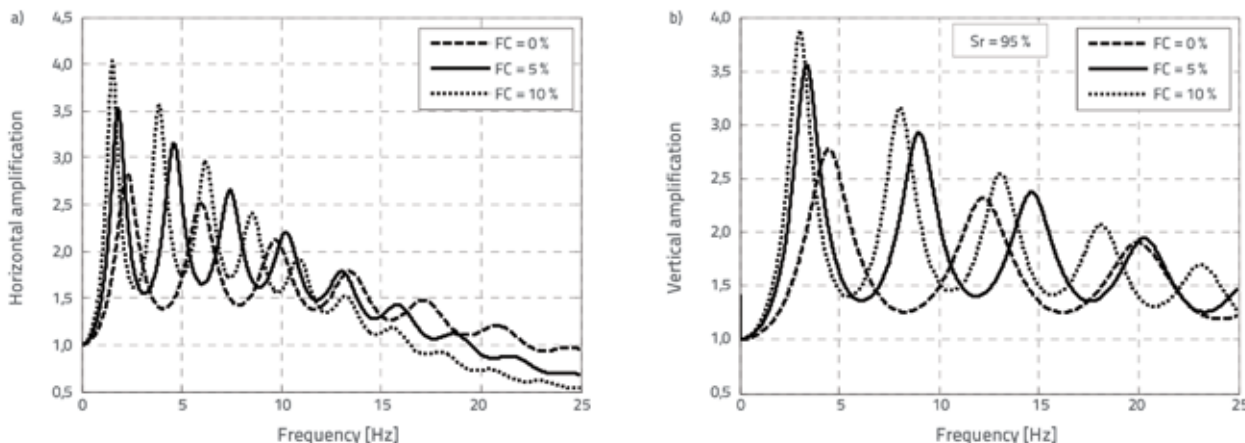
za 8,5% i manje od 1% za djelomično odnosno potpuno zasićeni medij (slika 16.), čime se zapravo može objasniti mali utjecaj vrijednosti  $C_v$  na vertikalnu amplifikaciju kada je  $S_r = 100\%$ . Međutim, brzina SV valova također se istovjetno smanjuje u slučajevima djelomičnog i potpunog zasićenja (slika 17.).



Slika 17. Utjecaj vrijednosti  $C_v$  na brzinu SV valova ( $\sigma'_0 = 100$  kPa,  $FC = 0\%$ ,  $n = 0,3$ )



Slika 16. Utjecaj vrijednosti  $C_v$  na brzinu valova  $P_1$ ; a) u djelomično zasićenom; b) u potpuno zasićenom poroznom tlu ( $\sigma'_0 = 100$  kPa,  $FC = 0\%$ ,  $n = 0,3$ )

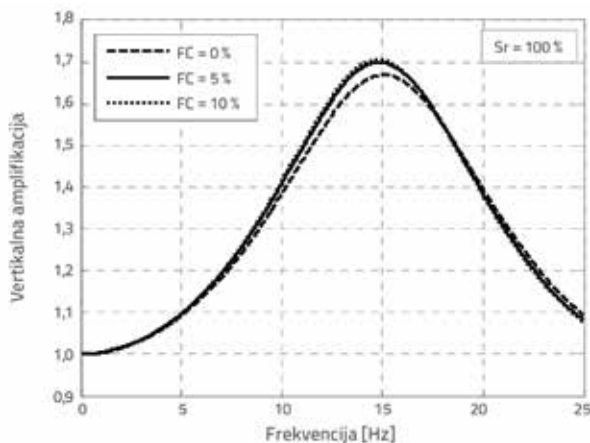


Slika 18. Utjecaj vrijednosti FC (količina sitnih čestica) na: a) horizontalnu amplifikaciju; b) vertikalnu amplifikaciju ( $S_r = 95 \%$ ,  $C_v = 5$ ,  $n = 0,3$ )

#### 4.1.4. Utjecaj količine nekoherentnih sitnih čestica

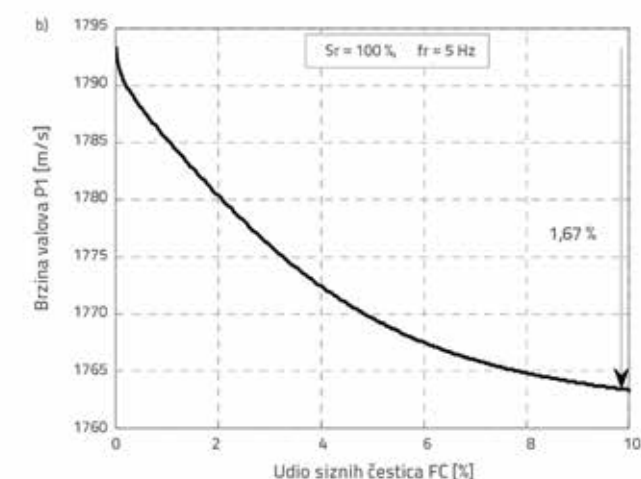
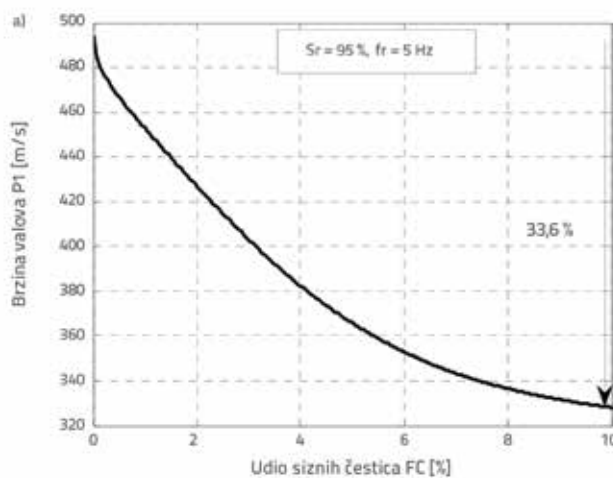
U nekim istraživanjima o prisutnosti plastičnih ili neplastičnih sitnih čestica u pjeskovitom tlu naglašava se otpornost tla na likvefakciju [37, 38] a često se zanemaruje utjecaj tih sitnih čestica na amplifikaciju odziva tla. Za tu svrhu je u ovom radu pretpostavljeno da modul posmika ovisi o količini nekoherentnih sitnih čestica prema Wichtmannovom modelu [8].

I kod horizontalne i vertikalne amplifikacije sa  $S_r = 95 \%$  uočavaju se varijacije slične onima koje su zabilježene u analizi  $C_v$ , gdje povećanje vrijednosti FC uvjetuje porast vršnih vrijednosti amplifikacije uz pomak prema niskim frekvencijama (slika 18.). Međutim, količina sitnih čestica ipak donekle utječe na vertikalnu amplifikaciju u potpuno zasićenom tlu (slika 19.).



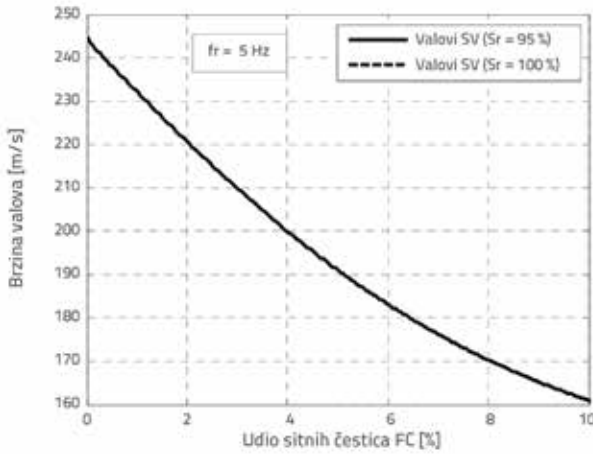
Slika 19. Utjecaj FC na vertikalnu amplifikaciju ( $C_v = 5$ ,  $n = 0,3$ ,  $S_r = 100 \%$ )

Osim toga, treba napomenuti da je variranjem udjela sitnih čestica (FC) od 0 do 10 % zabilježen pad brzine valova  $P_1$  od 33,6 % za djelomično zasićeno tlo, dok je pad brzine tih valova iznosio manje od 2 % za potpuno zasićeno tlo (vidi slike 20.a i 20.b).

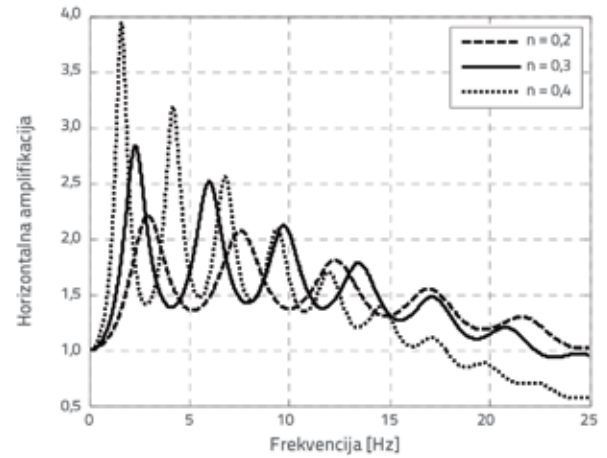


Slika 20. Utjecaj vrijednosti FC na brzinu valova  $P_1$ ; a) u djelomično zasićenom; b) u potpuno zasićenom poroznom tlu ( $\sigma'_{0} = 100$  kPa,  $C_v = 5$ ,  $n = 0,3$ )

Potvrđuje činjenicu da variranje krutosti malo utječe na vertikalnu amplifikaciju u potpuno zasićenom tlu. I kod SV valova je zabilježen isti trend variranja brzine za oba slučaja zasićenosti (slika 21.).



Slika 21. Utjecaj vrijednosti  $FC$  na brzinu  $SV$  valova ( $\sigma'_o = 100$  kPa,  $C_u = 5$ ,  $n = 0,3$ )



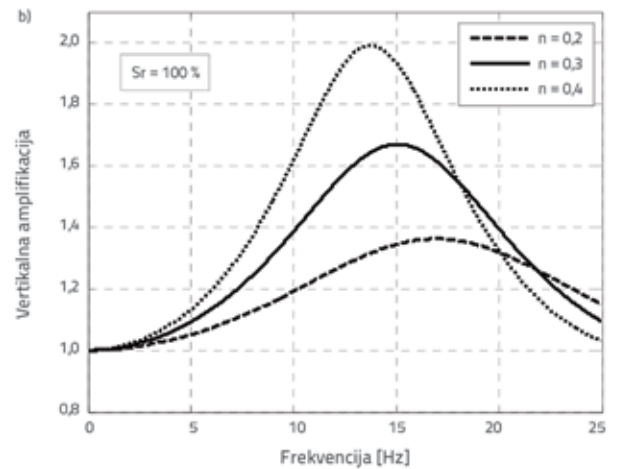
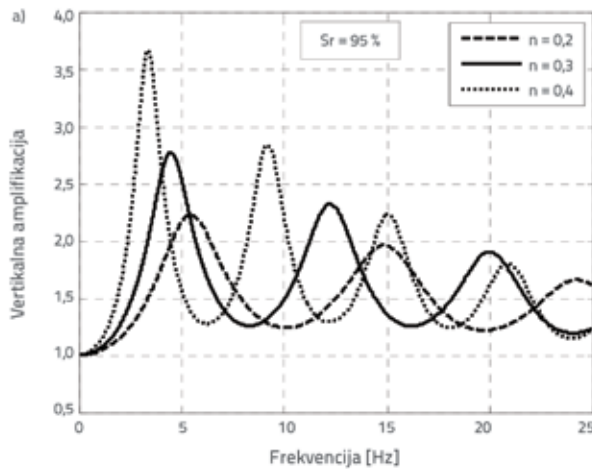
Slika 22. Utjecaj poroznosti  $n$  na horizontalnu amplifikaciju ( $C_u = 5$ ,  $FC = 0\%$ )

#### 4.1.5. Utjecaj poroznosti

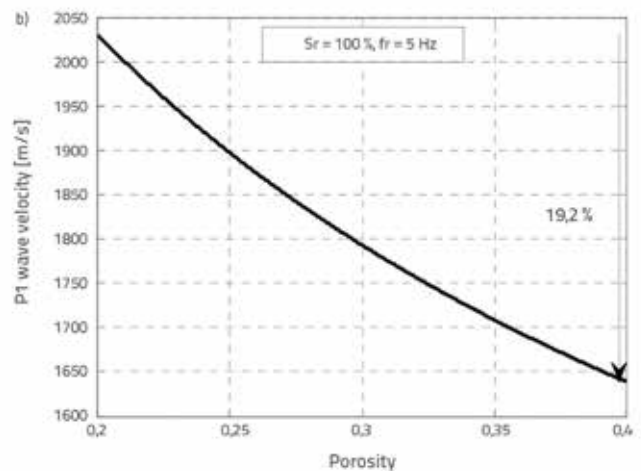
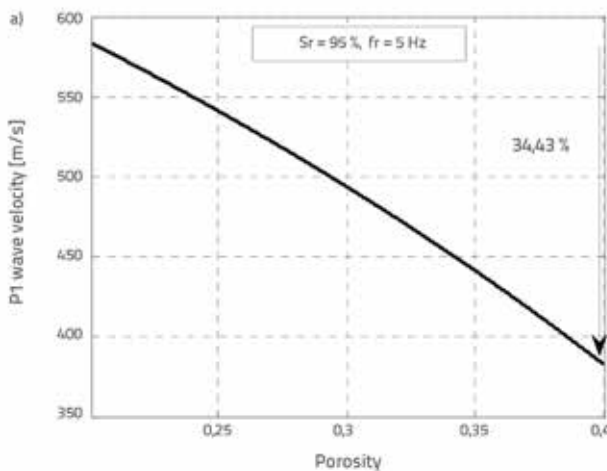
Poroznost je značajno svojstvo koje uvelike obilježava porozni medij i često utječe na uvjete strujanja te na fizikalna svojstva skeleta kao što je modul posmika. U ovom je radu usvojeno

da modul posmika ovisi o poroznosti na način opisan u Wichtmannovom modelu za pjeskovito tlo.

Na slici 22. prikazana je horizontalna amplifikacija za različite vrijednosti poroznosti  $n = 0,2, 0,3$  i  $0,4$ . Jasno je da s porastom poroznosti raste i amplituda vršnih vrijednosti uz pomak prema



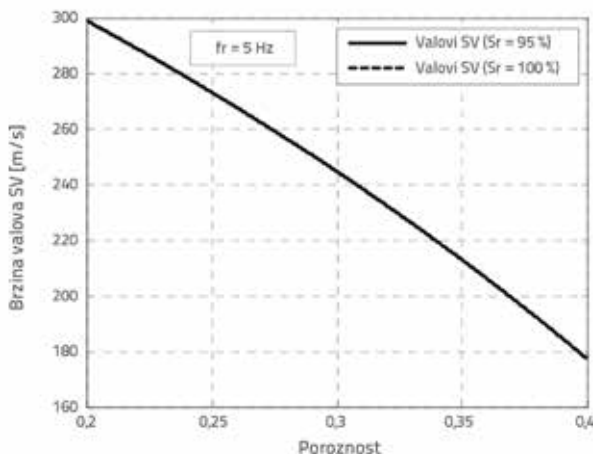
Slika 23. Utjecaj poroznosti  $n$  na vertikalnu amplifikaciju u slučajevima: a) djelomične zasićenosti; b) potpune zasićenosti ( $C_u = 5$ ,  $FC = 0\%$ )



Slika 24. Utjecaj vrijednosti  $n$  na brzinu valova  $P_1$ ; a) u djelomično zasićenom; b) u potpuno zasićenom poroznom tlu ( $\sigma'_o = 100$  kPa,  $C_u = 5$ ,  $FC = 0\%$ )

niskim frekvencijama. Isto vrijedi i za vertikalnu amplifikaciju koja je izraženija kod djelomično zasićenog tla u odnosu na potpuno zasićeno tlo (slika 23.).

Prije objašnjena pojava može se prikazati variranjem brzine valova. Na slici 24. vidi se da porast poroznosti znatno utječe na brzine valova  $P_1$ , koje se za djelomično zasićeno tlo smanjuju za 34,43 %, a za 19,2 % za potpuno zasićeno tlo. Uočava se i utjecaj na brzinu SV valova te je isti trend registriran za oba slučaja zasićenja (slika 25.).

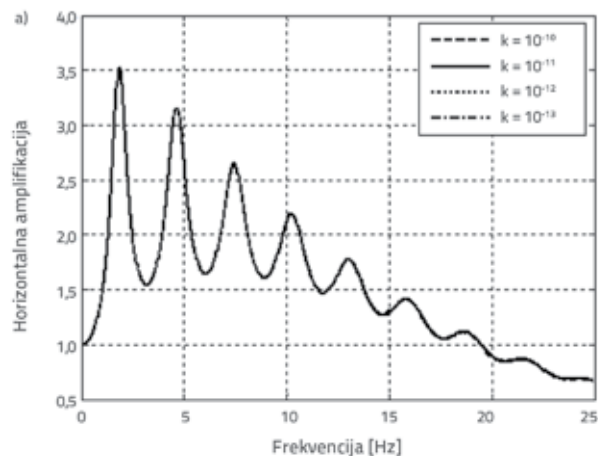


Slika 25. Utjecaj vrijednosti  $n$  na brzinu SV valova ( $\sigma'_0 = 100$  kPa,  $C_v = 5$ ,  $FC = 0$  %)

Rezultati analize vrijednosti  $C_v$  i  $FC$  pokazuju da promjena modula posmika ne utječe na brzinu valova  $P_1$  niti na vertikalnu komponentu amplifikacije u potpuno zasićenom tlu. Stoga se može zaključiti da u ovom slučaju utjecaj poroznosti ne može biti uzrokovan ovisnošću krutosti skeleta o poroznosti, već uvjetima strujanja koji su također ovisni o poroznosti.

#### 4.1.6. Utjecaj propusnosti

Očito je da je propusnost značajno svojstvo za disipaciju energije kroz zasićeni porozni medij gdje koeficijent rasapa  $b$  ( $b = \eta/k$ )



ovisi o intrinzičnoj propusnosti skeleta i o viskoznosti fluida. Ta disipacija proizlazi iz dinamičke interakcije čvrste i fluidne faze [22].

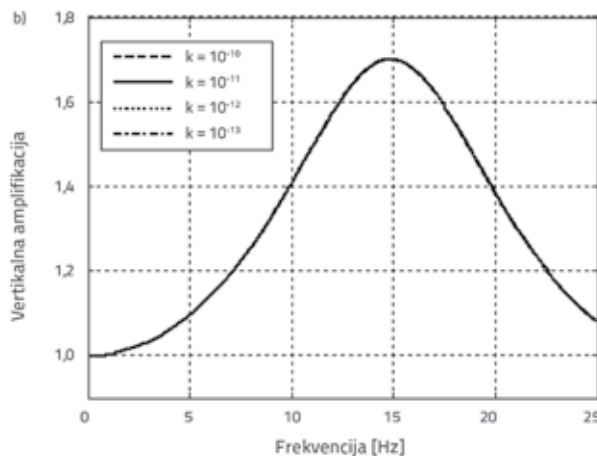
Kako bi se prikazao utjecaj propusnosti  $k$  ( $m^2$ ), na slici 26. prikazana je vertikalna i horizontalna amplifikacija u potpuno vodom zasićenom tlu za  $k = 10^{-10}$ ,  $10^{-11}$ ,  $10^{-12}$  i  $10^{-13} m^2$ . Kao što se može uočiti, na dvojni amplifikaciju ne utječe variranje propusnosti u tako niskom rasponu vrijednosti  $k$ , i to zbog malog relativnog protoka pornog fluida pri tako niskoj vrijednosti propusnosti.

#### 4.2. Analiza ekvivalentnog linearnog (EQL) odziva lokacije

U prethodnoj je točki naglasak stavljen na linearnu analizu amplifikacije poroviskoelastičnog profila tla, pri čemu je pretpostavljeno da su vrijednosti krutosti i prigušenja tog profila konstantne. Međutim, ponašanje tla može biti i nelinearno [5, 39, 40], a u takvim slučajevima dinamička svojstva tla (modul posmika,  $G$ , i stupanj prigušenja,  $D$ ) variraju ovisno o vrijednosti posmične deformacije.

U ovom se radu nelinearni odziv tla uzima u obzir primjenom ekvivalentnog linearnog pristupa u okviru kojeg se iterativnom analizom određuju parametri tla za svaki sloj, kompatibilnih s odgovarajućom razinom deformacije. Ovaj pristup je zapravo samo aproksimacija nelinearnog histereznog naponsko-deformacijskog ponašanja ciklički opterećenog tla.

Prema ekvivalentnom linearnom pristupu, odziv profila tla najprije se izračunava pomoću krutosti tla pri malim deformacijama i odgovarajućeg prigušenja, kao što je prije navedeno za linearnu analizu. Na temelju te inicijalne procjene, računa se povijest posmičnih deformacija ( $\gamma$ ) svakog sloja, te se vrijednost od 65 % vršne posmične deformacije seizmičkog gibanja usvaja kao efektivna posmična deformacija. Nakon toga se primjenjuje iterativni postupak kako bi se odredila svojstva poremećenog tla pomoću smanjenja posmičnog modula  $G/G_{max}$  i pomoću krivulja prigušenja ( $D$ ) za pijesak, kako je to prikazano na slikama 27. i 28., prema sljedećim modificiranim jednadžbama Hardina i Drnevicha [39] u analizi Wichtmanna i dr. [7, 8]:



Slika 26. Utjecaj propusnosti  $k$  na: a) horizontalnu amplifikaciju; b) vertikalnu amplifikaciju ( $C_v = 5$ ,  $FC = 5$  %,  $n = 0,3$ )

$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r} \left[ 1 + a_2 \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma_r}\right) \right]} \quad (30)$$

$$D = 0.006 + 0.314 \frac{\frac{\gamma}{\gamma_r} \left[ 1 - 0.64 \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma_r}\right) \right]}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r} \left[ 1 - 0.64 \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma_r}\right) \right]} \quad (31)$$

Parametar za prilagodbu krivulje  $a$  i referentna posmična deformacija  $\gamma_r$  definirani su kao

$$a_2 = 1.070 \ln(C_u) \exp(0.053 FC) \quad (32)$$

$$\gamma_r = \frac{\tau_{\max}}{G_{\max}} \quad (33)$$

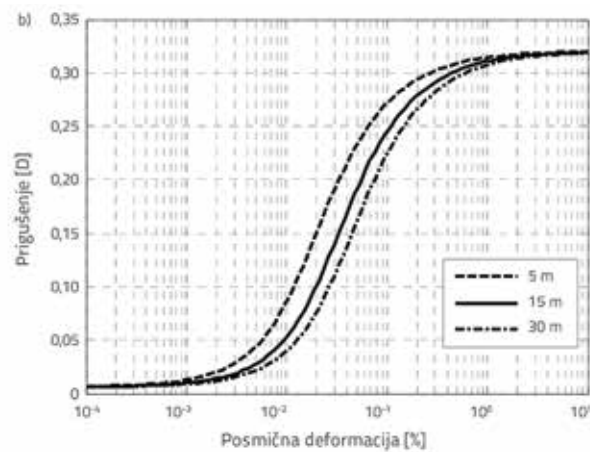
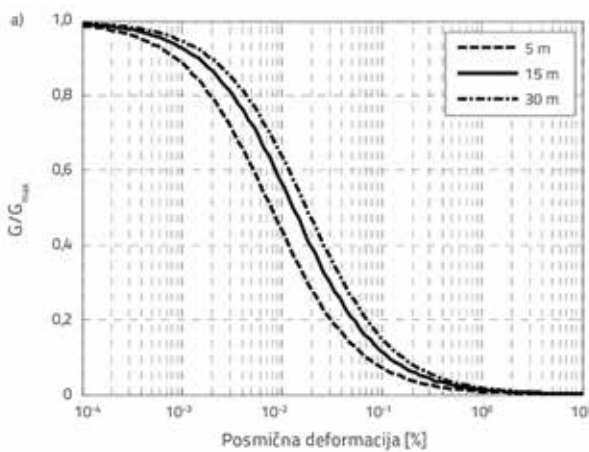
Za nekorentna tla se maksimalno posmično naprezanje  $\tau_{\max}$ , može izračunati iz :

$$\tau_{\max} = \sigma'_v \sqrt{\left(\frac{1+K_0}{2} \sin \phi'\right)^2 - \left(\frac{1-K_0}{2}\right)^2} \quad (34)$$

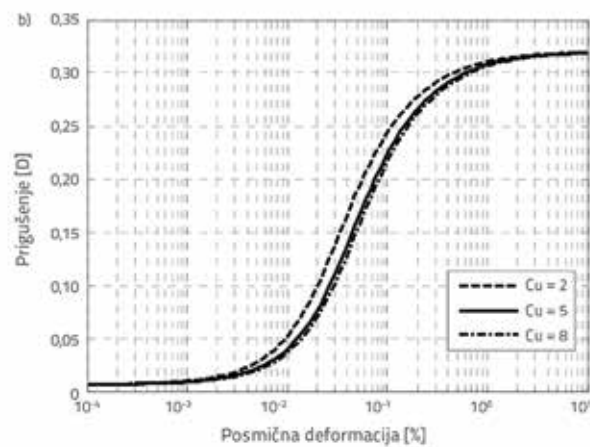
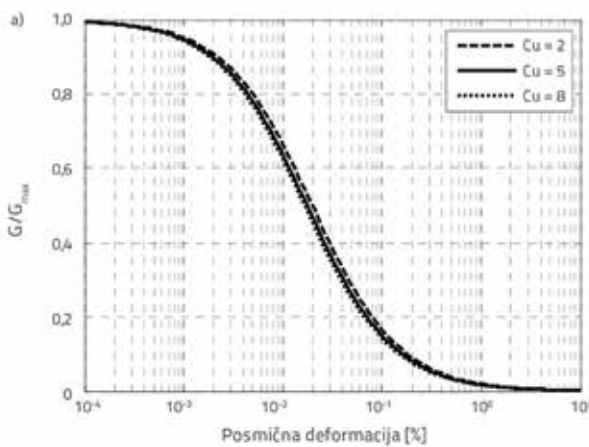
gdje je koeficijent bočnog pritiska  $K_0 = 1 - \sin \phi'$

Moguće je primijetiti da krivulje smanjenja modula posmika  $G/G_{\max}$  i prigušenja ( $D$ ) ovise o čelijskom tlaku  $\sigma'_0$  (slika 27.), granulometriji,  $C_u$  (slika 28.), i količinu nekoherentnih sitnih čestica,  $FC$  (slika 29.).

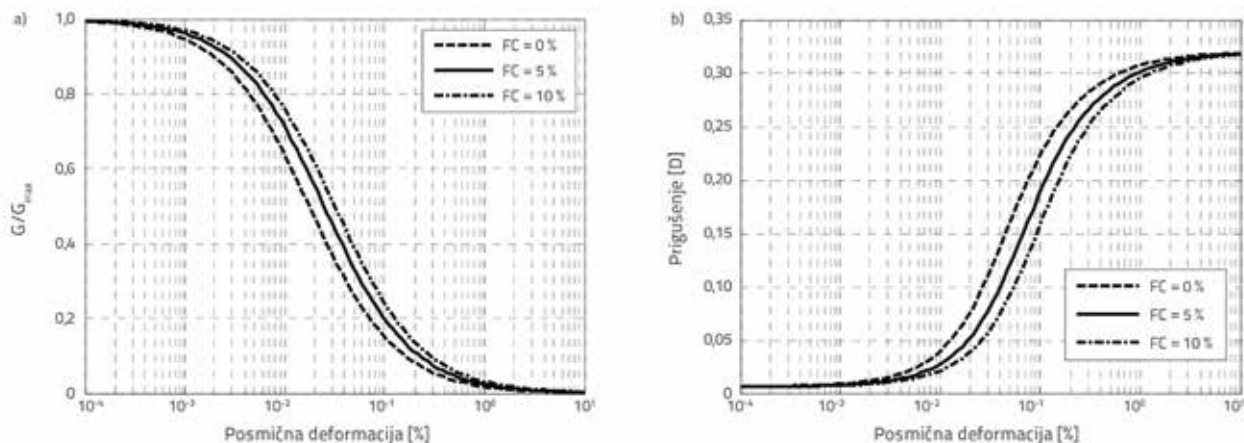
Tijekom potresa seizmičko opterećenje istovremeno se javlja i u horizontalnom i u vertikalnom smjeru. To znači da na profil tla istovremeno djeluju upadni P i SV valovi, iz čega se može zaključiti da se valovi  $P_1$  šire kroz profil tla s istim degradiranim modulom posmika zbog posmične deformacije uzrokovane širenjem SV valova. Na temelju ove pretpostavke, te uzimajući u obzir činjenicu da stupanj prigušenosti valova  $P_1$  još uvijek nije dovoljno razmotren, u ovom su radu za oba slučaja širenja valova (prigušenje i modul posmika) usvojeni jednaki terenski uvjeti.



Slika 27. Utjecaj čelijskog tlaka  $\sigma'_0$  na: a) krivulje smanjenja modula posmika; b) krivulje prigušenja



Slika 28. Utjecaj vrijednosti  $C_u$  na: a) krivulje smanjenja modula posmika; b) krivulje prigušenja



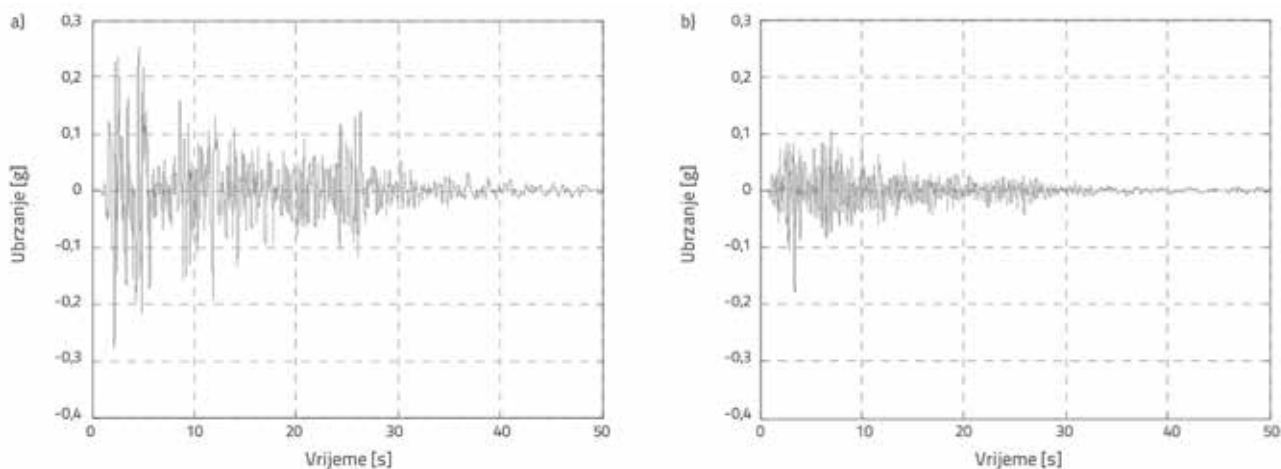
Slika 29. Utjecaj vrijednosti FC na: a) krivulje smanjenja modula posmika; b) krivulje prigušenja

### 4.2.1. Ulazno seizmičko gibanje

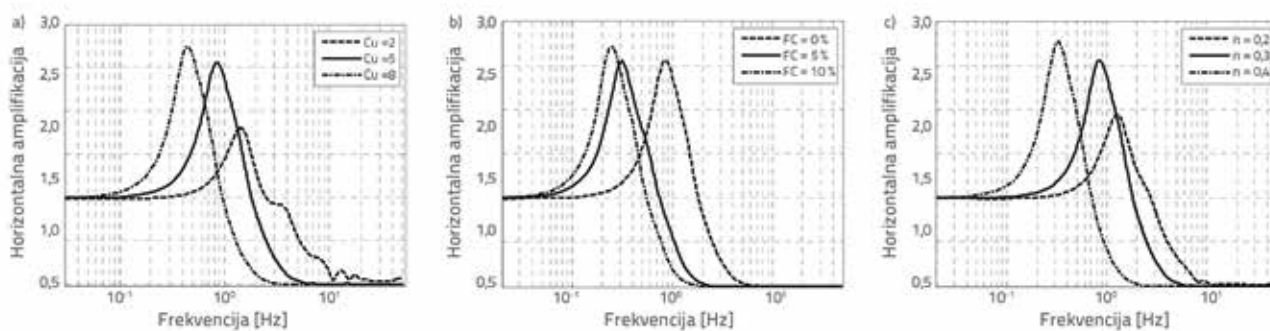
Kako bi se u obzir uzeo utjecaj svojstava tla na nelinearnu amplifikaciju zasićenog poroznog profila tla u horizontalnom i vertikalnom smjeru, u ovom su radu odabrane dvije komponente seizmičkih akceleroograma (smjerovi: sjever-jug i gore-dolje) kao gibanje stijenskog izdanka za pobuđivanje profila tla. Ti su pomaci zabilježeni tijekom potresa El Centro (1940.), kada su vrijednosti vršnog ubrzanja tla iznosile 0,28g u horizontalnom smjeru i 0.178g u vertikalnom smjeru (slika 30.).

### 4.2.2. Analiza amplifikacijskih funkcija

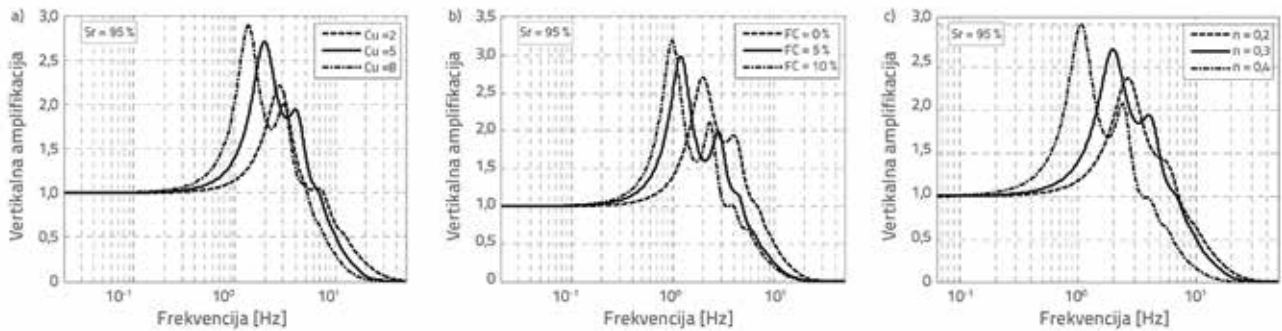
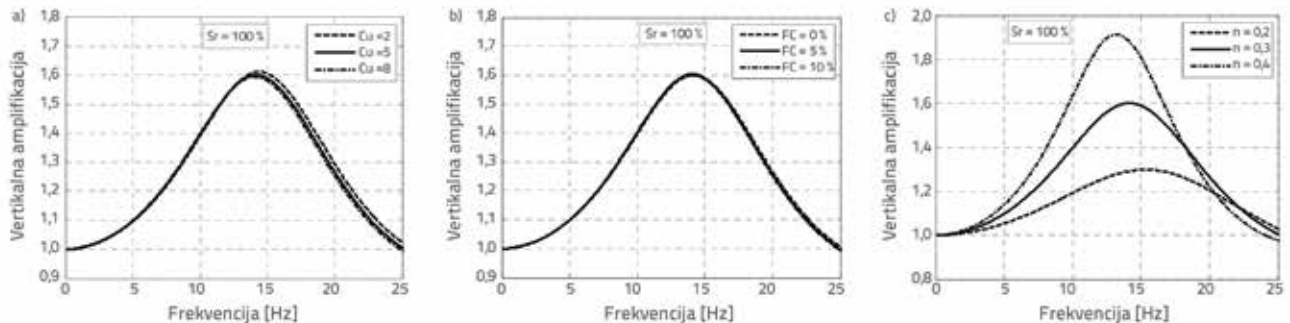
Ovdje se za približno ocjenjivanje nelinearnog odziva profila tla primjenjuje analiza ekvivalentnog linearnog odziva. Na slikama 31. i 32. vidimo da se povećanjem vrijednosti  $C_v$ ,  $FC$  i  $n$  povećavaju vršne amplitude uz pomak prema niskim frekvencijama za slučaj horizontalne amplifikacije, a isto se događa kod vertikalne amplifikacije kada se radi o djelomično zasićenom tlu. Na primjer, povećanjem vrijednosti  $C_v$  s  $C_v = 2$  na  $C_v = 8$  (slike 31.a i 32.a) povećava se amplituda prve vršne vrijednosti za 34,3 % i 23,87



Slika 30. Vremenski zapis ubrzanja u toku zemljotresa El Centro 1940.: a) horizontalna komponenta; b) okomita komponenta



Slika 31. Utjecaj vrijednosti na nelinearnu horizontalnu amplifikaciju: a) vrijednosti  $C_v$ ; b) vrijednosti  $FC$ ; c) vrijednosti  $n$

Slika 32. Utjecaj vrijednosti na nelinearnu vertikalnu amplifikaciju: a) vrijednosti  $C_u$ ; b) vrijednosti  $FC$ ; c) vrijednosti  $n$ Slika 33. Utjecaj vrijednosti na nelinearnu vertikalnu amplifikaciju (potpuno zasićeno tlo): a) vrijednosti  $C_u$ ; b) vrijednosti  $FC$ ; c) vrijednosti  $n$ 

% uz pomak prema niskim frekvencijama od 0.97 Hz i 1.43 Hz za horizontalnu odnosno vertikalnu amplifikaciju.

Osim toga, u slučaju potpuno zasićenog profila tla, na vertikalni odziv ne utječu sve vrijednosti  $C_u$  i  $FC$  (slike 33.a i 33.b). Dakle, povećanje poroznosti inducira povećanje amplitude uz pomak prema niskim frekvencijama (slika 33.c). Također je zanimljivo spomenuti da se vertikalni odziv ponaša isto kao i u linearnoj analizi, iz čega bi se moglo zaključiti da na vertikalnu amplifikaciju ne utječe nelinearno ponašanje u slučaju potpuno zasićenog profila tla.

## 5. Zaključak

U radu se istražuje utjecaj svojstava tla na linearnu i nelinearnu amplifikaciju nehomogenog poroviskoelastičnog profila tla u horizontalnom i vertikalnom smjeru. Pritom se koristi Biotova teorija o dvofaznim medijima i analitički pristup utemeljen na metodi precizne matrice krutosti, a pretpostavlja se da se ulazni seizmički valovi sastoje od kosih P-SV valova. Uzima se u obzir činjenica da mehanička svojstva rastu s porastom dubine prema Wichmannovom modelu koji razmatra utjecaj granulometrije, poroznosti i udjela sitnih čestica na modul posmika pri malim deformacijama, na smanjenje modula posmika te na krivulje prigušenja. Osnovni zaključci su sljedeći:

- Kada je u zasićenom poroznom mediju upadni kut različit od nule, tada funkcija horizontalne amplifikacije ima amplitudu koja je manja od one izračunane za jednofazni medij, a to se može objasniti generiranjem vala  $P_2$ . Utjecaj vertikalnog odziva na upadni kut je zanemariv.
- Osim toga, stupanj zasićenosti nije utjecao na horizontalnu amplifikaciju, ali je bitno utjecao na vertikalnu amplifikaciju gdje je mali pad ispod vrijednosti potpunog zasićenja doveo

do znatne amplifikacije i pomaka prema niskim frekvencijama. Takvo se ponašanje objašnjava jakim variranjem modula pornog fluida,  $K_f$  pri promjeni stupnja zasićenosti.

- Na dvojni amplifikaciju ne utječe variranje propusnosti u niskom rasponu vrijednosti  $k$ .
- Koeficijent jednolikosti,  $C_u$  i udjela sitnih čestica,  $FC$ , znatno utječu na vertikalnu amplifikaciju u djelomično zasićenom profilu tla pri linearnom i nelinearnom ponašanju tla; međutim, njihov utjecaj je zanemariv kada je  $S_r = 100\%$ .
- Poroznost također bitno utječe na vertikalni odziv u slučaju djelomičnog zasićenja; ipak, utjecaj poroznosti je manji u slučaju potpune zasićenosti.
- Ovi rezultati pokazuju da je variranje vertikalnog odziva i brzine  $P$  valova u slučaju djelomično zasićenog tla povezano s mehaničkim svojstvima; to je variranje u slučaju potpune zasićenosti uzrokovano uvjetima strujanja. Osim toga, zanimljivo je spomenuti da se nelinearni vertikalni odziv ponaša isto kao i u linearnoj analizi kada je  $S_r = 100\%$ , iz čega bi se moglo zaključiti da na vertikalni odziv ne utječe nelinearno ponašanje potpuno zasićenog profila tla.
- Koeficijent jednolikosti, udio sitnih čestica i poroznost također znatno utječu na horizontalnu amplifikaciju i to u slučaju kako linearnog tako i nelinearnog ponašanja tla.

Rezultati ovog rada pokazuju da lokalni uvjeti tla bitno utječu na poroviskoelastičnu amplifikaciju tla, i to i u vertikalnom tako i u horizontalnom smjeru. Ovo bi se istraživanje moglo dodatno poboljšati svestranijim ispitivanjem omjera spektralnog odziva ( $V/H$ ) te definiranjem svojstava tla kao prostornih slučajnih polja (*eng. spatial random field*).

## LITERATURA

- [1] Trifunac, M.D.: Site conditions and earthquake ground motion—A review, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 90 (2016), pp. 88–100, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.08.003>
- [2] Hardin, B.O., Black, W.L.: Vibration Modulus of Normally Consolidated Clays, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 94 (1968) 2, pp. 353–369.
- [3] Seed, H.B., Idriss, I.M.: Soil Modulus and Damping Factors for Dynamic Response Analysis, Technical Report EERC70–10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1970.
- [4] Stokoe, K.H., Woods, R.D.: In situ shear wave velocity by cross-hole method, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 98 (1972) 5, pp. 443–460.
- [5] Menq, F.Y.: Dynamic Properties of Sandy and Gravelly Soils, PhD thesis, Texas University, USA. 2003.
- [6] Wichtmann, T., Triantafyllidis, T.: On the influence of the grain size distribution curve of quartz sand on the small strain shear modulus  $G_{max}$ , *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135 (2009) 10, pp. 1404–1418.
- [7] Wichtmann, T., Triantafyllidis, T.: Small-strain constrained elastic modulus of clean quartz sand with various grain size distribution, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 55 (2013), pp. 130–139.
- [8] Wichtmann, T., Hernandez, M., Triantafyllidis, T.: On the influence of a non-cohesive fines content on small strain stiffness, modulus degradation and damping of quartz sand, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 69 (2015), pp. 103–114, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2014.10.017>
- [9] Idriss, I.M., Seed, H.B.: Seismic response of horizontal layers, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, 94(SM4): 1003–31 (1968).
- [10] Dobry, R., Whitman, R., Roesset, J.M.: Soil properties and the one-dimensional theory of earthquake amplification, Research Report R71–18, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 1971.
- [11] Gazetas, G.: Vibrational Characteristics of Soil Deposits with Variable Wave Propagation Velocity, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 6 (1982), pp. 1–20.
- [12] Hadid, M., Afra, H.: Sensitivity Analysis of Site Effects on Response Spectra of Pipelines, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 20 (2000), pp. 249–260.
- [13] Afra, H., Pecker, A.: Calculation of free field response spectrum of a non-homogeneous soil deposit from bed rock response spectrum, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22 (2002) 2, pp. 157–165.
- [14] Travasarou, T., Gazetas, G.: On the Linear Response of Soils with Modulus Varying as a Power of Depth—the Maliakos Marine Clay, *Soils and Foundations*, 44 (2004) 5, pp. 85–93.
- [15] Rovithis, E.N., Parashakis, H., Mylonakis, G.E.: 1D harmonic response of layered inhomogeneous soil: analytical investigation, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31 (2011), pp. 879–90, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2011.01.007>
- [16] Mylonakis, G.E., Rovithis, E., Parashakis, H.: 1D harmonic response of layered inhomogeneous soil: exact and approximate analytical solutions, In *Computational Methods in Earthquake Engineering*, pp. 1–32, Springer Netherlands, 2013.
- [17] Vrettos, C.: Dynamic response of soil deposits to vertical SH waves for different rigidity depth-gradients, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 47 (2013), pp. 41–50, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.04.003>
- [18] Durante, M.G., Karamitros, D., Di Sarno, L., Sica, S., Taylor, C.A., Mylonakis, G., Simonelli, A.L.: Characterisation of shear wave velocity profiles of non-uniform bi-layer soil deposits: analytical evaluation and experimental validation, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 75 (2015), pp. 44–54, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.03.010>
- [19] Jamshidi, C.R., Aminzadeh, B.T.S.: Site response of heterogeneous natural deposits to harmonic excitation applied to more than 100 case histories, *Earthquake Engineering And Engineering Vibration*, 15 (2016) 2, pp. 341–356, <https://doi.org/10.1007/s11803-016-0326-0>
- [20] Biot, M.A.: Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid—Low Frequency Range, *Journal of Acoustic Society of America*, 28 (1956) 2, pp. 168–178.
- [21] Biot, M.A.: Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid—Higher Frequency Range, *Journal of Acoustic Society of America*, 28 (1956) 2, pp. 179–191.
- [22] Biot, M.A.: Mechanics of Deformation and Acoustic Propagation in Porous Media, *Journal of Applied Physics*, 33 (1962) 4, pp. 1482–1498.
- [23] Ke, L.L., Wang, Y.S., Zhang, Z.M.: Propagation of Love waves in an inhomogeneous fluid-saturated porous layered half-space with properties varying exponentially, *Journal of Engineering Mechanics*, 131 (2005) 12, pp. 1322–1328, [https://doi.org/10.1061/ASCE0733-9399\(2005\)131:12\(1322\)](https://doi.org/10.1061/ASCE0733-9399(2005)131:12(1322))
- [24] Ke, L.L., Wang, Y.S., Zhang, Z.M.: Love wave in an inhomogeneous fluid-saturated porous layered half space with linearly varying properties, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26 (2006), pp. 574–581, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2006.01.010>
- [25] Zhou, F.X., Lai, Y.M., Song, R.X.: Propagation of plane wave in non-homogeneously saturated soils, *Science China Technological Sciences*, 56 (2013) 2, pp. 430–440, <https://doi.org/10.1007/s11431-012-5106-0>
- [26] Zhou, F.X., Ma, Q.: Propagation of Rayleigh waves in fluid-saturated non-homogeneous soils with the graded solid skeleton distribution, *International Journal For Numerical And Analytical Methods In Geomechanics*, 2016, <https://doi.org/10.1002/nag.2491>.
- [27] Zhou, F.X.: Transient Dynamic analysis of gradient-saturated viscoelastic porous media, *Journal of Engineering Mechanics*, 140 (2013) 4, pp. 1–9, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0000706](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000706)
- [28] Rajapakse, R.K.N.D., Senjuntichai, T.: Dynamic response of a multi-layered poroelastic medium, *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, 24 (1995), pp. 703–722.
- [29] Yang, J., Sato, T.: Influence of Viscous Coupling on Seismic Reflection and Transmission in Saturated Porous Media, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88 (1998) 5, pp. 1289–1299.
- [30] Lin, CH., Lee, V.W., Trifunac, M.D.: The reflection of plane waves in a poroelastic half-space saturated with inviscid fluid, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25 (2005), pp. 205–223, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2004.10.009>



- [31] Liang, J., Fu, J., Todorovska, M.I., Trifunac, M.D.: In-plane soil–structure interaction in layered, fluid-saturated, poroelastic half-space I: Structural response, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 81 (2016), pp. 84–111, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.10.018>
- [32] Wichtmann, T., Triantafyllidis, T.: On the influence of the grain size distribution curve on P-wave velocity, constrained elastic modulus  $M_{max}$  and Poisson's ratio of quartz sands, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30 (2010), pp. 757–766, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2010.03.006>
- [33] Argeso, H., Mengi, Y.: A frequency domain boundary element formulation for dynamic interaction problems in poroviscoelastic media, *Computational Mechanics*, 53 (2014) 2, pp. 215–237 (2014), <https://doi.org/10.1007/s00466-013-0903-2>
- [34] Yoshinori Iwasaki, and Masaru Tai.: Strong motion records at Kobe Port Island, *Soils and foundations*, pp. 29–40, 1996.
- [35] Jorge Aguirre.: Non-linear site effects at port island vertical array during 1995 Hyogo-Ken Nanbu earthquake, Eleventh world conference on earthquake engineering, 1996
- [36] Han, B., Zdravkovic, L., Kontoe, S.: Numerical and analytical investigation of compressional wave propagation in saturated soils, *Computers and Geotechnics*, 75 (2016), pp. 93–102, <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.01.019>
- [37] Polito, C.P.: The Effect of Non-plastic and Plastic Fines on the Liquefaction of Sandy Soils, PhD Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1999.
- [38] Belkhatir, M., Schanz, T., Arab, A., Della, N.: Experimental Study on the Pore Water Pressure Generation Characteristics of Saturated Silty Sands, *Arabian Journal for Science and Engineering* 39 (2014) 8, pp. 6055–6067, <https://doi.org/10.1007/s13369-014-1238-9>
- [39] Hardin, B.O., Drnevich, V.P.: Shear modulus and damping in soils: design equations and curves, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 98 (1972) SM7, pp. 667–92.
- [40] Darendeli, M.B.: Development Of A New Family Of Normalized Modulus Reduction And Material Damping Curves, Ph.D thesis, Texas University, USA, 2001.