

ODREĐIVANJE MODULA SMICANJA TLA PRI MALIM DEFORMACIJAMA

Sanja Jocković*, Mirjana Vukićević*

* *Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, borovina@grf.bg.ac.rs*

REZIME

U radu su prikazane neke empirijske relacije za određivanje modula smicanja tla G_{\max} , pri malim deformacijama, $\gamma < 10^{-5}$ (0.001%), u funkciji od koeficijenta poroznosti, srednjeg glavnog efektivnog napona, indeksa plastičnosti i stepena prekonsolidacije. Takođe su date neke relacije između G_{\max} i in-situ parametara. Poslednjih godina se sve više koristi bender element za laboratorijsko određivanje brzine prostiranja smičućih talasa kroz uzorak tla, u cilju određivanja modula smicanja tla pri malim deformacijama. Sistem se sastoji od dva bender elementa, predajnika koji emituje smičući talas i prijemnika na suprotnom kraju, kojim se registruje vreme prolaska talasa kroz uzorak. Na osnovu dobijenog vremena i pređenog puta talasa (između dva bender elementa), računa se brzina prostiranja smičućeg talasa kroz uzorak tla. Brzina smičućeg talasa može da se kreće u širokim granicama, u zavisnosti od usvojene metode za identifikaciju tačnog trenutka dolaska talasa do prijemnog elementa. U radu su prikazane neke od metoda za rešavanje ovog problema.

KLJUČNE REČI: modul smicanja tla pri malim deformacijama, empirijske relacije, bender element, brzina prostiranja smičućih talasa.

ESTIMATION OF SMALL STRAIN SHEAR MODULUS OF SOIL

ABSTRACT

The paper presents some empirical relations for estimation the small strain shear modulus G_{\max} $\gamma < 10^{-5}$ (0.001%). This empirical relations express the small strain shear modulus, in terms of void ratio, mean effective confining pressure, soil's plasticity index and overconsolidation ratio. Also, some relationships between G_{\max} and in situ parameters are given. Bender element have become more and more commonly used for laboratory measuring the shear wave velocity in soli specimens, with the purpose of estimating the small strain shear modulus. A pair of in-line bender elements is usually used, where one acts as transmitter sending of the shear waves, while the other on the opposite end, captures the arriving waves. The shear wave velocity is derived by dividing the travel distance (between the transmitter and receiver), with the arrival time. The shear wave velocity can vary over the wide range, depending on the method adopted to identify the arrival time. Here are presented some technics to solve this problem.

KEYWORDS: small strain shear modulus, empirical relations, bender element, shear wave velocity.

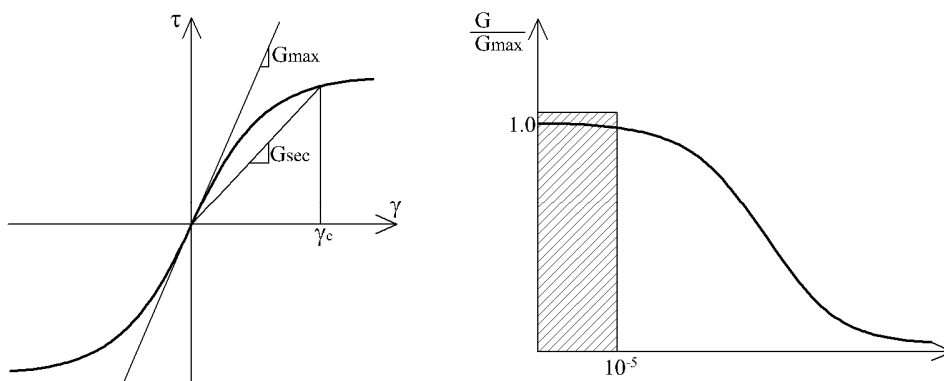
UVOD

Naponsko deformacijske karakteristike tla, pri dinamičkom opterećenju najviše zavise od veličine amplitude deformacije smicanja. Ti efekti su prikazani na slici 1. Pri vrlo malim deformacijama, manjim od 10^{-5} (0.001%), ponašanje tla je potpuno elastično. Za deformaciju smicanja u rasponu od 10^{-4} do 10^{-2} (0.01-1%), pojavljuju se osim elastičnih, još i plastične deformacije. Kod većih deformacija, tlo dolazi u stanje loma. Sa porastom deformacije smicanja raste i složenost ponašanja tla, a time i matematički opis tog ponašanja, izražen preko konstitutivnih jednačina ili modela tla. Tako za male deformacije zadovoljava linearno elastični model, za srednje deformacije pogodan je elastičan model sa histerezisnim prigušenjem, a za velike deformacije neophodan je složeno elasto-plastični model.

Smičuća deformacija	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}
	Male deformacije		Srednje deformacije	Velike deformacije		Lom
Elastično						
Elasto-Plastično						
Lom						

Slika 1. Ponašanje tla u zavisnosti od veličine deformacije
Figure 1. Soil behaviour with shear strain amplitude

Uticaj amplitude deformacije smicanja γ na sekantni modul smicanja tla, može se opisati skeletnom krivom - *backbone curve*, slika 2a. Tangentni modul smicanja uz tačku promene smera opterećenja predstavlja maksimalni sekantni modul smicanja G_{\max} , odnosno modul smicanja tla pri malim deformacijama, $\gamma < 10^{-5}$ (0.001%). Iz praktičnih razloga je pogodnije skeletnu krivu prikazati u normalizovanom obliku, pomoću normalizovanog modula smicanja G/G_{\max} - *modulus reduction curve*, slika 2b.



Slika 2. a) skeletna kriva b) redukciona kriva za modul smicanja
Figure 2. a) backbone curve b) modulus reduction curve

EMPIRIJSKE RELACIJE ZA ODREĐIVANJE MODULA SMICANJA TLA PRI MALIM DEFORMACIJAMA

Maksimalni modul smicanja G_{\max} , najpouzdanije je odrediti na osnovu kvalitetnih geofizičkih ispitivanja (*in situ*), mereći brzinu prostiranja smičućih talasa, dok se redukcija modula smicanja sa porastom deformacija određuje laboratorijskim ispitivanjima:

$$G_{\max} = \rho v_s^2$$

gde je ρ gustina tla. Naročita se pažnja pridaje pravilnoj interpretaciji brzine smičućih talasa, pogotovu ako je merenje izvršeno na tlu sa anizotropnim naponskim stanjem, što može da izazove da brzine smičućih talasa variraju sa pravcem propagiranja talasa i kretanja zrna tla (Roesler 1979).

Ako nisu poznate brzine prostiranja smičućih talasa, maksimalni modul smicanja se može odrediti na osnovu laboratorijskih ispitivanja, koristeći empirijske relacije. Laboratorijska ispitivanja pokazuju da na krutost tla, pored amplitude deformacije smicanja utiče: koeficijent poroznosti, srednji glavni efektivni napon, indeks plastičnosti, stepen prekonsolidacije, kao i broj ciklusa opterećivanja, (Hardin, 1978):

$$G_{\max} = 625F(e)(OCR)^k p_a^{1-n} (\sigma'_m)^n$$

gde su:

$F(e)$ – funkcija koeficijenta poroznosti,

$$F(e) = \frac{1}{0.3 + 0.7e^2} \quad (\text{Hardin, 1978}),$$

$$F(e) = \frac{1}{e^{1.3}} \quad (\text{Jamiołkowski, 1991}),$$

OCR – stepen prekonsolidacije

k – eksponent koji zavisi od indeksa plastičnosti I_p (Hardin i Drnevich, 1972), tabela 1:

Tabela 1. Vrednosti eksponenta k u zavisnosti od indeksa plastičnosti

Table 1. Values of exponent k with plasticity index

I_p (%)	0	20	40	60	80	≥ 100
k	0.00	0.18	0.30	0.41	0.48	0.50

$$\sigma'_m = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3}{3} = \frac{\sigma'_v + 2\sigma'_h}{3} \quad \text{– srednji glavni efektivni napon}$$

n – eksponent, obično se uzima da je $n=0.5$

p_a – atmosferski pritisak, u istim jedinicama kao G_{\max} i σ'_m

Za normalno konsolidovana tla ($OCR=1$), G_{\max} ne zavisi od plastičnosti tla, dok za prekonsolidovana tla G_{\max} raste sa porastom indeksa plastičnosti tla. Navedeni izraz važi uglavnom za sitnozrne materijale, dok je za pesak (Hardin i Richart, 1963):

$$G_{\max} = 6906 \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} (\sigma'_m)^{0.5} \quad [\text{kPa}] \quad \text{– za pesak sa okruglim zrnima}$$

$$G_{\max} = 3230 \frac{(2.97 - e)^2}{1 + e} (\sigma'_m)^{0.5} \quad [\text{kPa}] \quad \text{– za pesak sa uglastim zrnima}$$

Na osnovu širokog pregleda podataka iz literature o ponašanju peskova, kao i serije ispitivanja na šljuncima, Seed i dr. (1986), predlažu empirijsku relaciju za modul smicanja tla pri malim deformacijama kao:

$$G_{\max} = 1000K_{2,\max} (\sigma'_m)^{0.5} \quad [\text{lb/ft}^2]$$

$K_{2,\max}$ zavisi od koeficijenta poroznosti e ili od relativne zbijenosti D_r , tabela 2:

Tabela 2. Vrednosti koeficijenta $K_{2,\max}$ u zavisnosti od koeficijenta poroznosti i relativne zbijenosti
Table 2. Values of coefficient $K_{2,\max}$ with void ratio and relative density

e	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
$K_{2,\max}$	70	60	51	44	39	34
$D_r(\%)$	30	40	45	60	75	90
$K_{2,\max}$	34	40	43	52	59	70

Vrednosti koeficijenta $K_{2,\max}$ date u tabeli 2 se odnose na pesak, dok su za šljunak veće za oko 1.35-2.5 puta.

Dobry i Vučetić (1987) daju detaljan pregled raznih aspekata ponašanja gline u dinamičkim uslovima. Pregled se prvenstveno odnosi na normalno do malo prekonsolidovane gline, tabela 3.

Tabela 3. Efekat povećanja pojedinih faktora na G_{\max}
Table 3. Effect of increase of various factors on G_{\max}

Povećanje faktora	G_{\max}
Vertikalni napon	Raste
Koeficijent poroznosti	Opada
Geološka starost	Raste
Kohezija	Raste
OCR	Raste
I_p	Raste za $OCR > 1$, ne menja se za $OCR = 1$
Amplituda smičuće deformacije	Opada
Brzina deformacije	Raste
Broj ciklusa opterećenja	Gline - opada nakon N ciklusa, ali se kasnije povraća Pesak - raste nakon N ciklusa

Maksimalni modul smicanja se može preliminarno proceniti na osnovu parametara određenih u standardnom penetracionom opitu (SPT) i opitu statičke penetracije (CPT) i to:

za pesak (Seed i dr., 1986) :

$$G_{\max} = 20000(N_1)_{60}^{0.333} (\sigma'_m)^{0.5} \quad [\text{lb/ft}^2]$$

za pesak (Imai i Tonouchi, 1982) :

$$G_{\max} = 325N_{60}^{0.68} \quad [\text{kip/ft}^2]$$

za kvarcni pesak (Rix i Stokoe, 1991) :

$$G_{\max} = 1634(q_c)^{0.25} (\sigma'_v)^{0.375} \quad [\text{kPa}]$$

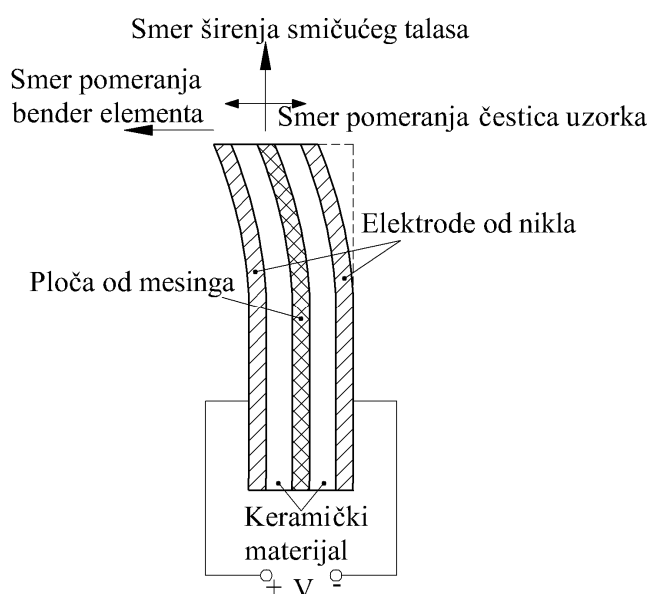
za gline (Mayne i Rix, 1993) :

$$G_{\max} = 406(q_c)^{0.695} e^{-1.130} \quad [\text{kPa}]$$

gde je $(N_1)_{60}$ korigovani broj udaraca u SPT opitu, na normalni napon od 100 kPa i 60% energetske efikasnosti, a q_c otpor vrha statičkog penetrometra u CPT opitu.

ODREĐIVANJE MODULA SMICANJA TLA PRI MALIM DEFORMACIJAMA KORISTEĆI BENDER ELEMENT

Bender element test je relativno jednostavan, nedestruktivan metod za laboratorijsko određivanje maksimalnog modula smicanja tla. Tehniku su razvili Shirley i Hampton (1977). Bender element je elektro-mehanički pretvarač koji se sastoji od dve tanke piezo-keramičke ploče, čvrsto spojene na centralnu metalnu ploču. Sa spoljne strane piezo-keramičkih ploča pričvršćene su dve elektrode, slika 3. Kada je elektroda pod naponom, polarizacija uzrokuje savijanje elementa i generiše se smičući talas koji putuje kroz uzorak. Izrađuju se u dve verzije, koje se razlikuju samo u načinu električnog spajanja polarizovanih ploča, serijski ili paralelno. Bender element se može ugraditi u aparaturu za direktno smicanje, edometar, ali se najčešće koristi u triaksijalnom aparatu.



Slika 3. Konstrukcija bender elementa
Figure 3. Construction of bender element

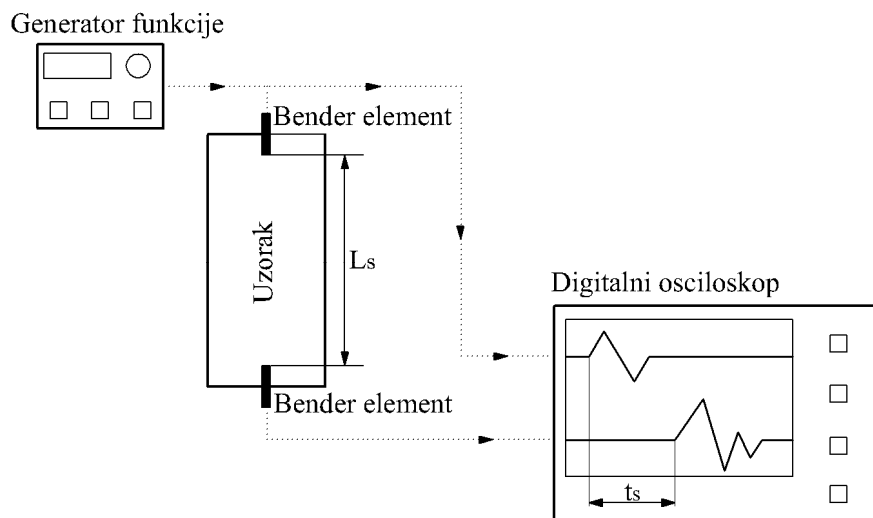
Na slici 4 je dat šematski prikaz određivanja maksimalnog modula smicanja tla, koristeći bender element. Sistem se sastoji od dva bender elementa, predajnika i prijmnika, postavljenih na krajevima uzorka, a svaka ploča ulazi u uzorak po 3 mm. Proizvođači često preporučuju da se bender elementi paralelnog tipa koriste kao predajnici, a serijski kao prijmnici. Predajnik je povezan sa generatorom funkcije. Napon inicira savijanje bender elementa i generiše se smičući talas koji putuje kroz uzorak. Kao inicijalni talas, koristi se sinusni ili kvadratni talas. Kada talas stigne do prijmnika, dolazi do savijanja prijmnika, usled čega nastaje mali napon. Svaki talas koji stigne do prijmnika, registruje digitalni osciloskop. Vremenski interval od početka inicijalnog talasa, do početka prijmnog talasa je vreme t_s . Ako se sa L_s označi rastojanje između bender elemenata, brzina prostiranja smičućeg talasa kroz uzorak se računa kao:

$$v_s = \frac{L_s}{t_s}$$

Maksimalni modul smicanja tla se zatim dobija kao:

$$G_{\max} = \rho v_s^2$$

gde je ρ gustina tla.



Slika 4. Šematski prikaz bender element testa
Figure 4. Schematic diagram of bender element test

Metoda ispitivanja maksimalnog modula smicanja tla koristeći bender element se bazira na pojednostavljenim pretpostavkama, koje su osnova za metode koje koriste teoriju propagacije talasa kroz tlo:

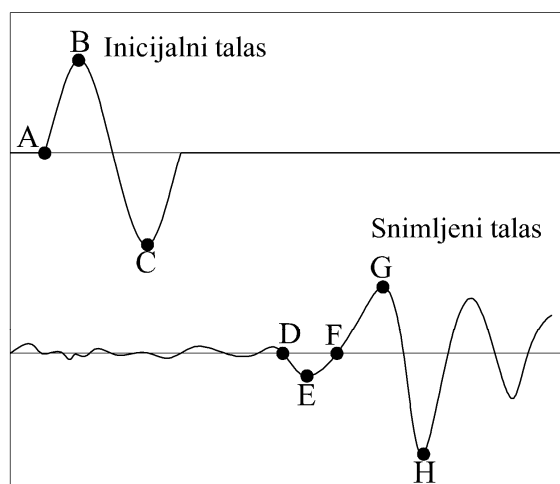
1. Deformacije indukovane u tlu su vrlo male, tj. pretpostavlja se elastičan odgovor tla na dinamičko opterećenje
2. Put koji inicijalni talas treba da pređe je rastojanje između bender elementa-predajnika i bender elementa-prijemnika
3. Indukuju se samo smičući talasi kroz uzorak tla
4. Za datu konfiguraciju predajnik-prijemnik, uzorak tla predstavlja beskonačnu sredinu, odnosno, talasi reflektovani od granica uzorka stižu kasnije do prijemnika nego direktni talasi emitovani od strane predajnika.

Osnovni problem u ovoj metodi je subjektivnost kod određivanja vremena putovanja talasa kroz uzorak t_s . Početak transmisije smičućeg talasa je tačno definisan, ali njegov tačni dolazak do prijemnog elementa nije. Uobičajena je praksa da se očitava vreme od početka transmisije smičućeg talasa do nailaska prvog talasa odnosno vreme A-D, slika 5. Međutim, mnoga istraživanja su pokazala (Salinero i dr. 1986) da prva deformacija talasa, tačka D, nije proizvod nailaska smičućeg talasa, već nailazak komponente tzv. "bliskog polja", koja putuje brzinom kompresijskog talasa, što dovodi u pitanje validnost treće i četvrte pretpostavke. Obično se definiše parametar R_d kao :

$$R_d = \frac{d}{\lambda} = \frac{d f}{v_s}$$

gde su: d - udaljenost bender elemenata, λ - talasna dužina inicijalnog talasa, a f - frekvencija inicijalnog talasa. Parametarske studije prolaska elastičnih talasa kroz elastični medij (Mancuso i dr. 1988) pokazuju da efekat bliskog polja može zamaskirati nailazak smičućeg talasa kada je rastojanje od izvora talasa do prijemnika između 0.25-4 talasne dužine inicijalnog talasa, odnosno kada je $R_d < 4$. Ti podaci pokazuju da je, za dobijanje čitkih rezultata, bez efekta "bliskog polja", potrebno koristiti

dovoljno veliku frekvenciju inicijalnog talasa. Međutim, povećanje frekvencije je opravdano do određene granice, jer se kod visokih frekvencija i čvršćih materijala može dogoditi tzv. "nadvišenje" (overshooting). Granična frekvencija, kod koje se događa "nadvišenje" zavisi od impedancije tla i elementa. Ako dođe do "nadvišenja", zapis osciloskopa je takav da je praktično je nemoguće očitati tačan trenutak dolaska smičućeg talasa.



Slika 5. Inicijalni i snimljeni talasi u bender element testu
Figure 5. Input and output waves from bender element test

U slučaju da se merenjima dobije deformacija DEF, slika 5, kao referentnu vrednost potrebno je uzeti vrednost u tački F (Lee i dr. 2005). Da bi se izbegla nesigurnost kod određivanja prvog nailaska talasa, neki istraživači vreme putovanja inicijalnog talasa kroz uzorak, određuju kao udaljenost između maksimuma inicijalnog i prijemnog talasa, B-G ili C-H. Poslednjih godina, dolazak inicijalnog talasa se procenjuje pomoću korelacije između inicijalnog i snimljenog talasa.

*U okviru tehnološkog projekta broj 36046 (2011-2014), *Istraživanje uticaja vibracija od saobraćaja na zgrade i ljude u cilju održivog razvoja gradova*, planirano je ispitivanje modula smicanja tla pri malim deformacijama, uglavnom za sitnozrne materijale, koristeći bender elemente. Ispitivanja će se vršiti u Laboratoriji za mehaniku tla Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu.

ZAKLJUČAK

Za rešavanje mnogih problema u dinamici tla, potrebno je pouzdano i tačno utvrditi naponsko deformacijske karakteristike tla pri malim deformacijama, $\gamma < 10^{-5}$ (0.001%). Modul smicanja tla pri malim deformacijama G_{max} , najpouzdanije je odrediti na osnovu kvalitetnih geofizičkih ispitivanja (*in situ*), mereći brzinu prostiranja smičućih talasa, dok se redukcija modula smicanja sa porastom deformacija određuje laboratorijskim ispitivanjima. U nedostatku in-situ parametara, maksimalni modul smicanja se može proceniti i na osnovu konvencionalnih laboratorijskih ispitivanja, koristeći empirijske relacije. Laboratorijska ispitivanja pokazuju da na krutost tla, pored amplitude deformacije smicanja, utiče: koeficijent poroznosti, srednji glavni efektivni napon, indeks plastičnosti, stepen prekonsolidacije, geološka starost, brzina deformacije, kao i broj ciklusa opterećivanja. Poslednjih godina, sve intenzivnije se koristi *bender element test*. To je relativno jednostavan, nedestruktivan metod za laboratorijsko određivanje maksimalnog modula smicanja tla, koji se zasniva na teoriji propagacije talasa kroz tlo. Na osnovu izmerenog vremena prolaska smičućeg talasa kroz uzorak, računa se brzina prostiranja smičućih talasa, a zatim i maksimalni modul smicanja. Osnovne teškoće,

pri korišćenju ove metode su kod određivanja vremena prolaska inicijalnog talasa kroz uzorak. Bender element se može ugraditi u aparaturu za direktno smicanje, edometar, ali se najčešće koristi u triaksijalnom aparatu.

LITERATURA

1. Aničić Dražen, Fajfar Peter, Petrović Boško, Szavits-Nossan Antun, Tomažević Miha (1990), *Zemljotresno inženjerstvo-visokogradnja*, dip „Građevinska knjiga“, Beograd.
2. Dobry R., Vučetić M. (1987), *Dynamic properties and seismic response of soft clay deposits*, Proceedings, International Symposium on Geotechnical Engineering of soft soils, Mexico City, Vol. 2, pp. 51-87.
3. Hardin B.O., Drnevich V.P. (1972), *Shear modulus and damping in soils: design equations and curves*, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 98, No. SM7, pp.667-692.
4. Hardin, B.O., Richart, F.E. (1963) *Elastic wave velocities in Granular soils*, Journal of Soil Mechanics and Foundations Divisions, Proceedings of ASCE, Vol. 89, No. SM1, Feb., pp. 33-65.
5. Imai T., Tonouchi K. (1982), *Correlation of N-value with s-wave velocity and shear modulus*, Proceedings, 2nd European Symposium on Penetration Testing, Amsterdam, pp. 57-72.
6. Jamiolkowski M., Leroueil S., LoPresti D.C.F. (1991), *Theme lecture: Design parameters from theory to practise*, Proceedings, Geo-Coast '91, Yokohama, Japan, pp.1-41.
7. Kramer Steven (1996), *Geotechnical earthquake engineering*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey 07458.
8. Lee, J. S., Santamarina J.C. (2005), *Bender elements: Performance and signal interpretation*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 131(9), pp. 1063-1070.
9. Mancuso C., Vinale F. (1988), Propagazione delle onde sismiche: teoria e misura in sito. Atti del Convegno del Gruppo Nazionale di Coordinamento per gli Studi di Ingegneria Geotecnica, Monselice, Italy. pp. 115–138. [In Italian.]
10. Mayne P.W., Rix G.J. (1993), *G_{max} - q_c relationship for clays*, Geotechnical Testing Journal, ASTM, Vol. 16, No. 1, pp. 54-60.
11. Rix G.J., Stokoe K.H. (1991), *Correlation of initial tangent modulus and cone penetration resistance*, International Symposium on Calibration Chamber Testing, A.B. Huang.ed., Elsevier Publishing, New York, pp. 351-362.
12. Roesler S.K (1979), *Anisotropic stress modulus due to stress anisotropy*, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 105, No. GT7, pp. 871-880.
13. Sánchez-Salinero I., Roesset J.M., Stokoe II K.H. (1986) *Analytical studies of wave propagation and attenuation*, Geotechnical report.
14. Seed H.B., Wong R.T, Idriss I.M., Tokimatsu K. (1986), *Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils*, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 112, No. GT11, pp. 1016-1032.
15. Vilhar Gregor and Jovičić Vojkan (2009)/2, *Measurement and interpretation of the small strain stiffness of Boštanj silty sand*, Acta Geotechnica Slovenica, 57-75.