

Slobodan Samardaković¹, Goran Šulović², Miroљub Samardaković¹

MEĐUSOBNE KORELACIJE MODULA DEFORMACIJE TLA MERENIH DINAMIČKIM I STATIČKIM OPITIMA KRUŽNOM PLOČOM

Rezime:

Posle sažetog opisa metoda za ispitivanje zbijenosti opitima kružnom pločom, od kojih je dinamički opit pločom sa padajućim tegom najracionalniji, u radu se predlažu moguće (teorijske) korelacije modula deformacije E_{vd} - E_{v1} - M_s sitnozrnog i krupnozrnog tla i upoređuju sa eksperimentalnom korelacijom za seriju uporednih ispitivanja na šljunku. Sve obimnija primena dinamičkog modula deformacije (E_{vd}) nameće potrebu standardizacije ovoga metoda i korelacije sa statičkim modulima, imajući u vidu teškoće poređenja inicijalnog dinamičkog i sekantnih statičkih modula i odsustvo konsolidacije slabije propusnog tla pod udarnim opterećenjem.

Кljučne riječi: zbijanje, opiti kružnom pločom, moduli deformacije tla

CORRELATION BETWEEN SOIL DEFORMATION MODULI MEASURED BY DYNAMIC AND STATIC CIRCULAR PLATE LOAD TESTS

Summary:

After brief description methods for soil compaction control by circular plate load tests, of which the dynamic test with light falling weight device is most rational, the paper suggests a possible correlation deformation moduli E_{vd} - E_{v1} - M_s of coarse- and fine-grained soil, compared with results series of comparative tests on gravel. The extensive use of dynamic deformation modulus (E_{vd}) imposes the need for standardization of this method and correlation with static moduli, given the difficulty of comparison due to the initial dynamic and secant statical moduli and the absence of consolidation of soil with less permeability under falling weight load.

Key words: soil compaction, circular plate load tests, soil deformation moduli

¹ Dipl.inž.građ., "GeoSol" DOO za građevinsku geotehniku, Niš

² Apsolv.građ., Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu

1 UVOD

Kako je poznato, generalno, zbijanjem se povećava gustina građevinskog tla (masa čvrstih čestica u jedinici zapremine), a otpor deformisanju raste, tako da se brojni metodi za kontrolu zbijenosti tla *in situ* mogu svrstati u grupe kojima se proverava (1) *gustina* tla u suvom stanju ili (2) *deformabilnost* tla pri utiskivanju standardnog krutog tela – merenjem otpora pri zadatoj dubini utiskivanja (iskazanim npr. vrednošću *CBR*) ili merenjem dubine utiskivanja pri zatom opterećenju i određivanjem *modula deformacije* u skladu sa primenjenim metodom ispitivanja. Prema domaćoj tehničkoj regulativi, moduli deformacije određuju se u geomehaničkoj praksi na osnovu rezultata dva metoda *opita opterećenja krutom kružnom pločom*, najčešće metodom prema srpskom standardu SRPS U.B1.046/1968 (tzv. švajcarski opit pločom, modul M_s) [9] i, znatno ređe, metodom prema SRPS U.B1.047/1997 (tzv. nemački opit pločom, moduli E_{v1} , E_{v2} , E_{v3}) [10]. Za oba metoda potreban je masivan kontrateret za opterećivanje ploče do kraja konsolidacionog sleganja tla, pa se dobijeni moduli mogu nazvati *statičkim* modulima deformacije tla za dati metod.

Zbog jednostavnog i brzog merenja bez kontratereta, čime je omogućen pristup svim pozicijama objekata, poslednjih godina se u domaćoj praksi sve više primenjuje još uvek nestandardizovani *opit opterećenja krutom kružnom pločom sa slobodno padajućim tegom*, pod čijim udarom se automatski meri sleganje ploče, na osnovu čega se dobija odgovarajući *dinamički* modul deformacije tla (E_{vd}). Ovaj noviji metod, razvijen u poslednje dve decenije, uvodi se u tehničku regulativu Nemačke [5,13] i Austrije [1,2] i širi se u internacionalnoj geomehaničkoj praksi, uz sve češće teorijsko-eksperimentalne analize [npr.1,2,4,15] i korelacije dinamičkog modula sa statičkim u domaćoj stručnoj javnosti [3,7,11,12,14]. Imajući u vidu da je dugogodišnja praksa sa statičkim modulima formirala pristup i osećaj inženjera za procenu potrebne projektovane i ostvarene vrednosti ovih modula za osnovne vrste tla u uobičajenim pozicijama i uslovima, za praktičnu primenu novijeg metoda potrebno je razjasniti ima li pouzdanih *teorijskih* i dovoljno *eksperimentalnih* korelacija dinamičkog i statičkih modula, što bi moralo da prethodi i standardizovanju metoda sa dinamičkim modulom u domaćoj regulativi.

Sa ciljem procene mogućnosti, pre svega kvalitativnih, korelacija dinamičkog i statičkih modula, u radu se, posle sažetog opisa napred navedenih metoda ispitivanja kružnom pločom, predlažu moguće korelacije njihovih rezultata za ploču prečnika 30 cm – na osnovu domaće i inostrane regulative i periodike, kao i uporednih ispitivanja zbijenosti slojeva rečnog peskovitog šljunka (na krutoj podlozi osnove 4×4 m, ukupne debljine 3 m ispod modela plitkog temelja), vršenih na GAF u Nišu, u okviru naučno-istraživačkog projekta TR-16021, finansiranog uz podršku Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Srbije.

2 SAŽETI OPIS METODA ISPITIVANJA KRUŽNOM PLOČOM

2.1 OPIT PLOČOM PREMA SRPS U.B1.046

Prema ovome (u detaljima zastarelom) standardu, krutom čeličnom kružnom pločom prečnika $D = 300$ mm (tačnije 298,6 mm, površine 700 cm²) pripremljeno tlo se opterećuje, zavisno od sastava i položaja sloja (npr. u kolovoznoj konstrukciji), do $p_{max} = 250, 450$ ili 550

kPa, stupnjevito, do konsolidacije tla pod svakim stupnjem opterećenja, a modul deformacije određuje se iz izraza

$$M_s = \frac{\Delta p}{\Delta s} D = \frac{p_2 - p_1}{s_2 - s_1} D \quad [\text{MPa}] \quad (1)$$

preko sleganja (s) izmerenih pod opterećenjima p_1 i p_2 , prikazanim u Tabeli 1. Rezultat ispitivanja trebalo bi prikazati na dijagramu (p, s), jer postoji mogućnost da su nagib krive i veličina modula zadovoljavajući, a sleganja nedozvoljeno velika. Relacije ovoga modula deformacije (stišljivosti) za efektivne napone u tlu i drugih modula (stišljivosti u edometru, ekvivalentnih modula elastičnosti u dreniranim i nedreniranim uslovima), koji važe za drugačije konturne uslove, prikazane su u ranijem radu koautora [8].

2.2 OPIT PLOČOM PREMA SRPS U.B1.047

Prema ovome standardu, kakav se široko primenjuje u Nemačkoj i Austriji, krutom čeličnom kružnom pločom prečnika $D = 300$ mm pripremljeno tlo se opterećuje, zavisno od sastava i položaja sloja, u 6-8 stupnjeva do $p_{\max} \approx 400-700$ kPa (što domaćim standardom nije jasno precizirano, a prema inostranim se odabira tako da maksimalno sleganje bude 2-5 mm ili $p_{\max} \geq 500$ kPa), do konsolidacije tla pod svakim stupnjem, a modul deformacije određuje se iz izraza

$$E_{v1} = 0,75 \frac{\Delta p}{\Delta s} D = 0,75 \frac{p_2 - p_1}{s_2 - s_1} D \quad [\text{MPa}] \quad (2)$$

preko sleganja (s) očitanih sa obaveznog dijagrama (p, s) za opterećenja $p_1 = 0,3p_{\max}$ i $p_2 = 0,7p_{\max}$, prikazanim u Tabeli 1. Zatim se ploča rasterećuje i *drugi put* opterećuje stupnjevima jednakim kao prvi put ali za jedan stupanj manje, pri čemu se određuje E_{v2} po istoj formuli, opet rasterećuje i opterećuje *treći put*, u 2-3 stupnja do prethodnog $p_{\max}$, pri čemu se određuje E_{v3} . Jasno je da je u prethodno bolje zbijenom tlu priraštaj modula od E_{v1} do E_{v2} po ponovljenom opterećenju manji, pa se za dovoljnu zbijenost zahtevaju što veće E_{v2} uz što manji odnos E_{v2}/E_{v1} , dok bi E_{v3}/E_{v2} trebalo da bude blisko 1. Upoređenjem sa teorijskim rešenjem za sleganje krute kružne ploče na homogenom, elastičnom i izotropnom poluprostoru

$$s = \frac{\pi}{4} \frac{1-\nu^2}{E} p D = 0,785(1-\nu^2) \frac{p}{E} D \quad \text{tj.} \quad E = 0,785(1-\nu^2) \frac{p}{s} D \quad (3)$$

vidi se da, za priraštaj opterećenja kojim se određuje, vrednost E_{v1} odgovara efektivnom ekvivalentnom modulu elastičnosti E' tla čiji je Poisson-ov koeficijent u dreniranim uslovima $\nu' = 0,21$ (kao u krupnozrnornom tlu). Može se uočiti da se metodi određivanja M_s i E_{v1} bitno ne razlikuju, osim po veličini i položaju $\Delta p = p_2 - p_1$, prikazanim u Tabeli 1 i na Sl.1, što za veće zakrivljenje eksperimentalnih krivih na dijagramu (p, s) uslovljava veće međusobne razlike ovih modula.

2.3 OPIT PLOČOM SA PADAJUĆIM TEGOM

U domaćoj geomehničkoj praksi sve šire se koriste modeli opreme ZFG-02, ZFG-04 i najnoviji ZFG-2000 proizvođača Zorn (Nemačka), a nešto manje i drugih proizvođača (*Controls* i dr.). Oprema i metod ispitivanja opisani su u domaćoj periodici [7,12].

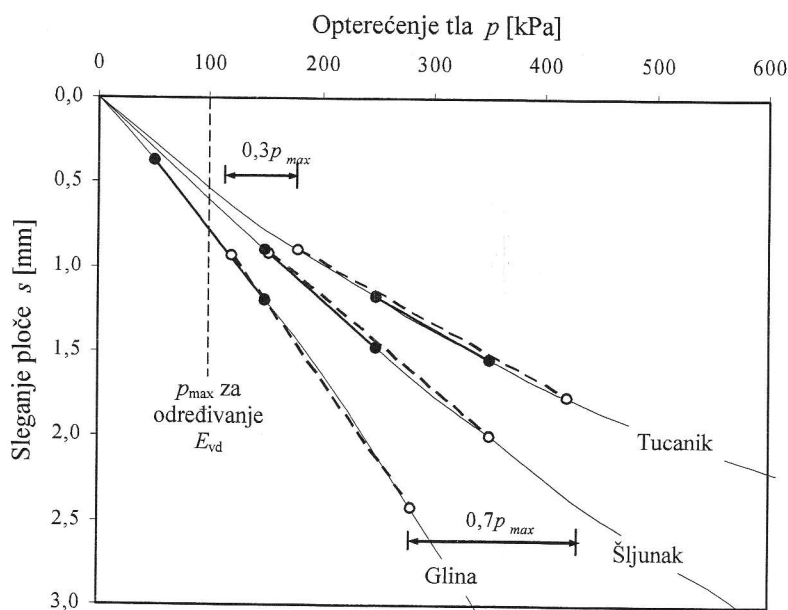
Sažeto, kruta čelična ploča prečnika 300 mm opterećuje se udarom tega mase 10 kg koji, ručno izdignut, sa kalibrisane visine niz vođicu slobodno pada na paket tanjirastih opruga, čime

3.2 KORELACIJE E_{v1} - M_s

Za oba metoda prema domaćim standardima, u *Tabeli 1* prikazane su merodavne vrednosti opterećenja za određivanje statičkih modula deformacije M_s i E_{v1} a na *Sl.1* tipični dijagrami (p,s) za uobičajene vrste tla.

Tabela 1 - Karakteristične vrednosti opterećenja za određivanje M_s i E_{v1}
Table 1 - Characteristic pressure values for M_s and E_{v1} determination

Metod za određivanje	M_s (SRPS U.B1.046)				E_{v1} (SRPS U.B1.047)			
Opterećenje [kPa]	p_{max}	p_1	p_2	Δp	p_{max}	$p_1=0,3p_{max}$	$p_2=0,7p_{max}$	Δp
Posteljica (glina)	250	50	150	100	400	120	280	160
DNS (šljunak)	450	150	250	100	500	150	350	200
NS (tucanik)	550	250	350	100	600	180	420	240
					700	210	490	280



Slika 1 - Tipični dijagrami (p,s) za uobičajene vrste tla, sa područjima za određivanje statičkih modula M_s (pune sečice) i E_{v1} (isprekidane sečice)
Figure 1 - Typical curves (p,s) for usual soils, with secants for determination of the M_s (continuous) and E_{v1} (broken)

Iz jednačina (1) i (2) proizilazi da je za pravolinijski dijagram $E_{v1} = 0,75M_s$ tj. $M_s = 1,33E_{v1}$, što za oblike krivih (p,s) kao na *Sl.1* znači da je za sitnozrna tla $M_s > 1,33E_{v1}$, a za krupnozrna $M_s < 1,33E_{v1}$. Imajući u vidu napred navedeno i realne oblike eksperimentalnih krivih, moguće korelacije su:

- za sitnozrno tlo do $M_s \leq 33$ MPa ($E_{v1} \leq 25$ MPa): $M_s = 1,4E_{v1}$ $E_{v1} = 0,71M_s$ (6')
- za krupnozrno tlo $M_s = 33-65$ MPa ($E_{v1} = 25-50$ MPa): $M_s = 1,3E_{v1}$ $E_{v1} = 0,77M_s$ (6'')
- $M_s > 65$ MPa ($E_{v1} > 50$ MPa): $M_s = 1,2E_{v1}$ $E_{v1} = 0,83M_s$ (6''')

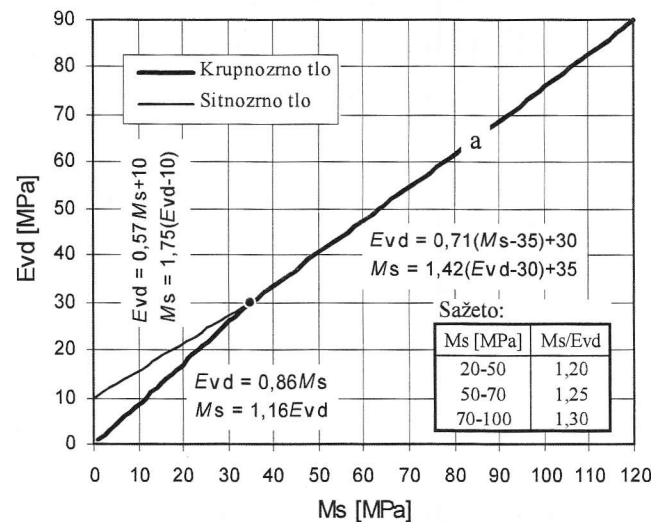
3.3 KORELACIJE E_{vd} -(E_{v1})- M_s

Na osnovu napred navedenog, uvođenjem relacija (5) u relacije (6) i posle 'peglanja' malih lokalnih skokova na dijagramu korelacije, za praksu se može predložiti, kao na Sl.2, za tlo:

– sitnozrno $E_{vd} \leq 30$ MPa ($M_s \leq 35$ MPa): $M_s = 1,75(E_{vd}-10)$ $E_{vd} = 0,57M_s+10$ (7')

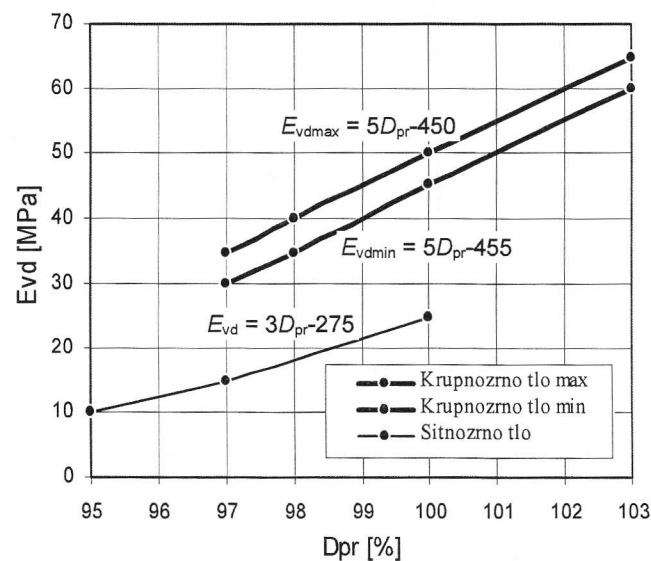
– krupnozrno $E_{vd} \leq 30$ MPa ($M_s \leq 35$ MPa): $M_s = 1,16E_{vd}$ $E_{vd} = 0,86M_s$ (7'')

$E_{vd} > 30$ MPa ($M_s > 35$ MPa): $M_s = 1,42(E_{vd}-30)+35$ $E_{vd} = 0,71(M_s-35)+30$ (7''')



Slika 2 - Dijagram korelacije E_{vd} - M_s prema (7)

Figure 2 - E_{vd} - M_s correlation chart by (7)



Sl.3 - Zahtevane vrednosti E_{vd} za zbijenost po Proctor-u (D_{pr}), prema nemačkim propisima

Fig.3 - Required values of the E_{vd} for density (D_{pr}) by Proctor, from German standards

Nemački i austrijski propisi za puteve se postepeno dopunjavaju vrednostima dinamičkog modula (E_{vd}) kao kriterijumom zbijenosti sitnozrnog i krupnozrnog tla u različitim slojevima uobičajenih konstrukcija, za koje su ranije zadate i granične vrednosti relativne zbijenosti (D_{pr}) prema Proctor-u. Uparivanjem ovakvih odgovarajućih vrednosti E_{vd} i D_{pr} iz više saglasnih propisa, na *Sl.3* smo grafički dobili *korelacije* $E_{vd}-D_{pr}$, praktično pravolinijske, analitički iskazane:

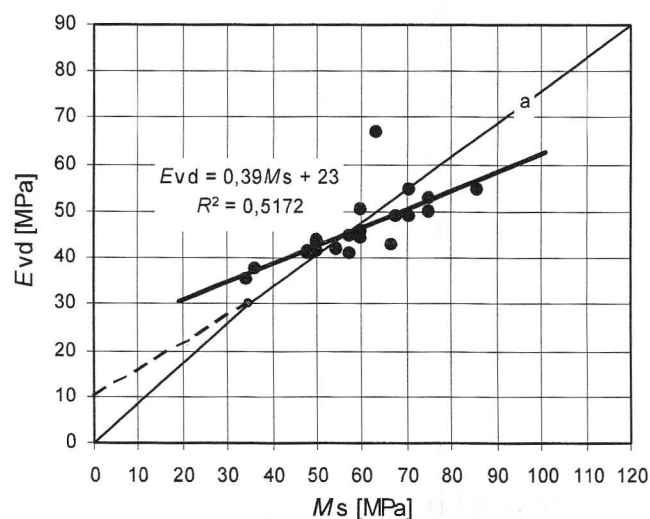
$$\text{– za sitnozrno tlo} \quad D_{pr} = 95-100 \% \quad E_{vd} = 3D_{pr} - 275 \quad [\text{MPa}] \quad (8)$$

$$\text{– za krupnozrno tlo} \quad D_{pr} = 97-103 \% \quad E_{vdmin} = 5D_{pr} - 455 \quad [\text{MPa}] \quad (9')$$

$$E_{vdmax} = 5D_{pr} - 450 \quad [\text{MPa}] \quad (9'')$$

3.4 KORELACIJE $E_{vd}-M_s$ NA OSNOVU UPOREDNIH ISPITIVANJA

Uporednim merenjima E_{vd} i M_s na slojevima zbijenog rečnog peskovitog šljunka (projektovane granulacije kao za DNS savremenih kolovoznih konstrukcija, $D_{max} = 31,5$ mm, dobro graduiran, ukupne debljine 3 m, na krutoj podlozi osnove $3,5 \times 3,5$ m, za ispitivanje modela plitkih temelja), izvršenim u okviru naučno-istraživačkog projekta TR -16021, na 21 mernom mestu dobijeni su rezultati prikazani na *Sl.4*.



Sl.4 - Empirijska korelacija $E_{vd}-M_s$ iz uporednog ispitivanja šljunka na 21 mernom mestu

Fig.4 - Empirical $E_{vd}-M_s$ correlation chart by 21 comparable tests on sandy-gravel

Kako se može videti, uz relativno nizak koeficijent korelacije (R), na uobičajenom peskovitom šljunku je u području izmerenih vrednosti $M_s = 35-85$ MPa dobijena veza

$$M_s = 2,545E_{vd} - 58 \quad \text{tj.} \quad E_{vd} = 0,39M_s + 23 \quad (10)$$

Prema takvoj empirijskoj korelaciji, izmerenim vrednostima $E_{vd} > 45$ MPa odgovaraju znatno veći moduli M_s nego prema predloženoj korelaciji (7'') i liniji "a" na *Sl.2* i *Sl.4*, ali su one međusobno dovoljno saglasne u području najčešće zahtevanog $M_s = 40-70$ MPa na ovakvom šljunku.

Rezultati ovih paralelnih opita (21) po obimu se ne mogu oceniti merodavnim za dovoljno sigurno zaključivanje ali su drugi domaći objavljeni kompetentni rezultati još malobrojniji.

4 ZAKLJUČAK

U skladu sa važećom regulativom i obimnim domaćim iskustvom u primeni tzv. švajcarskog statičkog modula M_s , izvesno je da će njegova primena ostati duže u praksi, pre svega za ispitivanja pozicija sa mogućim pristupom kontratereta. Znatno racionalniji metod merenja dinamičkog modula E_{vd} opitom pločom sa padajućim tegom biva sve aktuelniji (kao i savremene metode za kontinualna ispitivanja zbijenosti sa samohodnih mašina), pa su korelacije E_{vd} - M_s neophodne i zbog adaptacije kadrova na noviji metod.

Obrazložena korelacija E_{vd} - M_s , predložena izrazima (7) i na *Slici 2*, mogla bi se smatrati konzervativnom u odnosu na rezultate uporednih merenja na šljunku (*Slika 3*), pa se i zbog toga predlaže za geomehaničku praksu, mada se može oceniti da su empirijske korelacije sa *Sl. 4* logičnije saglasne sa nemačkim kriterijumima dovoljne zbijenosti na *Slici 3*.

Domaća praksa svakako nameće potrebu daljih usaglašavanja dinamičkog modula deformacije sa statičkim, a zatim i standardizaciju metoda sa padajućim tegom, imajući u vidu i druge, novije metode.

Dotle, uporedna ispitivanja za razne vrste i stanja tla i agregata nude najpouzdanija rešenja, pre svega zbog bitnih ograničenja u teorijskom poređenju dinamičkog inicijalnog i statičkih sekantnih modula deformacije i odsustva konsolidacije slabije propusnog (sitnozrnog) tla pod udarnim dinamičkim opterećenjem.

Na osnovu izloženog, u ovoj fazi je primena dinamičkog opita i predloženih korelacija znatno opravdanija za kontrolu zbijenosti drobljenih agregata i krupnozrnog tla (šljunak, pesak) – koji se, inače, u tekućoj geomehaničkoj praksi češće ispituju od sitnozrnog tla (glina).

LITERATURA

- [1] Adam,C.,Adam,D.(2003): *Modelling of the dynamic load plate test with the light falling weight device*, Asian Journal of Civil Engineering, Vol.4, 2-4, Tehran,73-89.
- [2] Adam,D.(2008): *Standardization, design, quality assurance and monitoring of earth works in road engineering in Austria*, Viena University of Technology, Wien.
- [3] Anagnosti,P.,Rašula,M.(2005): *Primena propisa nemačkih železnica za upotrebu dinamičkog mernog uređaja u oceni sabijenosti zemljanih materijala*, Zbornik radova I naučno-stručnog savetovanja "Geotehnički aspekti građevinarstva", SGITSCG, Beograd, 469-472.
- [4] Brandl,H.(2002): *Zbijanje tla i drugih zrnatih materijala za građevine*, Građevinar,54,9, Zagreb,513-527.
- [5] DB NGT 39 (1997): *Uputstvo za korišćenje lakog uređaja sa padajućim tegom za građevinske radove na železnici (na nemačkom)*, Nemačke železnice (DB).
- [6] *** (2008): *Operating Manual – Light Drop Weight Tester ZFG 2000*, Zorn Instruments, Stendal, pp.20.
- [7] Rašula,M.,Lolin,M.(2005): *Funkcionalno-tehničke karakteristike mernog uređaja ZFG-04 za kontrolu sabijenosti tla i nasutih materijala*, Zbornik radova I naučno-stručnog savetovanja "Geotehnički aspekti građevinarstva", SGITSCG, Beograd, 473-478.
- [8] Samardaković,M.(1999): *Određivanje pokazatelja deformabilnosti tla za analizu interakcije sa plitkim temeljima (I) - Ekvivalentne elastične konstante tla*, Zbornik radova XXI kongresa JUDIMK, JUDIMK, Beograd, str.211-216.

- [9] SRPS U.B1.046 (1968): *Geomehanička ispitivanja – Određivanje modula stišljivosti metodom kružne ploče*, Jugoslovenski zavod za standardizaciju, Beograd.
- [10] SRPS U.B1.047 (1997): *Geomehanička ispitivanja – Određivanje modula deformacije pomoću opterećenja kružnom pločom*, Savezni zavod za standardizaciju, Beograd.
- [11] *Stručna dokumentacija nacionalnog naučno-istraživačkog projekta TR-16021*, Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu, Niš, 2009.
- [12] Tošović, S., Čaki, L., Vujanić, V. (2005): *Dosadašnja iskustva ispitivanja upotrebom lakog uređaja sa padajućim tegom*, Zbornik radova I naučno-stručnog savetovanja "Geotehnički aspekti građevinarstva", SGITSCG, Beograd, 401-404.
- [13] TP BF-StB Teil B 8.3 (1996-2003): *Tehnički propisi za ispitivanje tla i stena u putogradnji – Dinamički opit kružnom pločom pomoću uređaja sa padajućim tegom (na nemačkom)*, Nemačke železnice (DB).
- [14] Filipović, V. (2005): *Uporedna kontrola zbijenosti materijala u trupu pruge preko modula stišljivosti (metodom kružne ploče) i preko dinamičkog modula deformacija (dinamičkim elektronskim mernim uređajem sa padajućim tegom ZFG-04)*, Zbornik radova I naučno-stručnog savetovanja "Geotehnički aspekti građevinarstva", SGITSCG, Beograd, 397-400.
- [15] Weingart, W. (1980): *Mogućnosti primene lakog uređaja sa padajućim tegom ZFG 2000 u putogradnji i zemljanim radovima*, Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift, 150, Wien, 111-116.