

Samardaković, S., Šulović, G., Samardaković, M. (2009): Međusobne korelacije modula deformacije E_{vd} - E_{v1} - M_s merenih opitima kružnom pločom, *Zbornik radova III naučno-stručnog savetovanja „Geotehnički aspekti građevinarstva“*, SGIS i dr., Zlatibor, str.97-102.

МЕЂУСОБНЕ КОРЕЛАЦИЈЕ МОДУЛА E_{vd} - E_{v1} - M_s МЕРЕНИХ ОПИТИМА КРУЖНОМ ПЛОЧОМ

Слободан Самардаковић*, Горан Шуловић**, Мирољуб Самардаковић**

* "GeoSol" ДОО за грађ. геотехнику, Б. Крсмановића 29, Ниш, geosolnis@yahoo.com

** Грађевинско-архитектонски факултет Универзитета у Нишу

РЕЗИМЕ: После сажетог описа метода за испитивање збијености опитима кружном плочом, од којих је динамички опит плочом са падајућим тегом најрационалнији али није обухваћен домаћом техничком регулативом, у раду се предлаже могућа корелација модула деформације E_{vd} - E_{v1} - M_s на ситнозрном и крупнозрном тлу и упоређује са резултатима серије упоредних испитивања на шљунку. Све обимнија примена динамичког модула деформације E_{vd} намеће потребу стандардизације овога метода, имајући у виду тешкоће због поређења иницијалног и секантних модула и одсуства консолидације слабије пропусног тла под ударним оптерећењем.

КЉУЧНЕ РЕЧИ: Показатељи збијености тла, опити кружном плочом, модули деформације тла.

CORRELATION BETWEEN E_{vd} - E_{v1} - M_s MODULI MEASURED BY CIRCULAR PLATE LOAD TESTS

ABSTRACT: 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 but not included in domestic technical regulations, 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, given the difficulty of comparison due to the initial and secant moduli and the absence of consolidation of less permeability soil under falling weight load.

KEYWORDS: Soil compaction control, circular plate load tests, deformation moduli of soil.

УВОД

Како је познато, генерално, збијањем се повећава густина грађевинског тла (маса чврстих честица у јединици запремине) а отпор деформисању расте, тако да се бројни методи за контролу збијености тла *in situ* могу сврстати у групе којима се проверава (1) густина тла у сувом стању или (2) деформабилност тла при утискивању стандардног крутог тела – мерењем отпора при задатој дубини утискивања (исказаним нпр. вредношћу *CBR*) или мерењем дубине утискивања при задатом оптерећењу и одређивањем модула деформације у складу са примењеним методом испитивања. Према домаћој техничкој регулативи, модули деформације одређују се у геомеханичкој пракси на основу резултата два метода *опита оптерећења крутом кружном плочом*, најчешће методом према српском стандарду SRPS U.B1.046/1968 (тзв. швајцарски опит плочом, модул M_s) [8] и, знатно ређе, методом према SRPS U.B1.047/1997 (тзв.

немачки опит плочом, модули E_{v1} , E_{v2} , E_{v3}) [9]. За оба метода потребан је масиван контратрет за оптерећивање плоче до краја консолидационог слегања тла па се добијени модули могу назвати *статичким* модулима деформације тла за дати метод.

Због једноставног и брзог мерења без контратрета, чиме је омогућен приступ свим позицијама објеката, последњих година се у домаћој пракси све више примењује још увек нестандардизовани *опит оптерећења крутом кружном плочом са слободно падајућим тегом*, под чијим ударом се аутоматски мери слегање плоче, на основу чега се добија одговарајући *динамички* модул деформације тла (E_{vd}). Овај новији метод, развијен у последње две деценије, уводи се у техничку регулативу Немачке [4,12] и Аустрије [1] и шири се у интернационалној геомеханичкој пракси, уз све чешће теоријско-експерименталне анализе [нпр.1,3,14] и корелације динамичког модула са статичким у домаћој стручној јавности [2,6,10,11,13]. Имајући у виду да је дугогодишња пракса са статичким модулима формирала приступ и осећај инжењера за процену потребне пројектоване и остварене вредности ових модула за основне врсте тла у уобичајеним позицијама и условима, за практичну примену новијег метода потребно је разјаснити има ли поузданих *теоријских* и довољно *експерименталних* корелација динамичког и статичких модула, што би морало да претходи и стандардизовању метода са динамичким модулом у домаћој регулативи.

Са циљем процене могућности, пре свега квалитативних, корелација динамичког и статичких модула, у раду се, после сажетог описа напред наведених метода испитивања кружном плочом, предлажу могуће корелације њихових резултата за плочу пречника 30 cm – на основу домаће и иностране регулативе и периодике, као и упоредних испитивања збијености слојева речног песковитог шљунка (укупне дебљине 3 m и основе 4×4 m, испод модела плитког темеља), вршених у оквиру научно-истраживачког пројекта TP-16021, финансираног од стране Министарства за науку и технолошки развој Србије.

САЖЕТИ ОПИС МЕТОДА ИСПИТИВАЊА КРУЖНОМ ПЛОЧОМ

ОПИТ ПЛОЧОМ ПРЕМА SRPS U.B1.O46. Према овоме (у детаљима застарелом) стандарду, крутом челичном кружном плочом пречника $D = 300$ mm (тачније 298,6 mm, површине 700 cm²) припремљено тло се оптерећује, зависно од састава и положаја слоја (нпр. у коловозној конструкцији), до $p_{max} = 250, 450$ или 550 kPa, ступњевито, до консолидације тла под сваким ступњем оптерећења, а модул деформације одређује се из израза

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

преко слегања (s) измерених под оптерећењима p_1 и p_2 , приказаним у Табели 1. Резултат испитивања требало би приказати на дијаграму (p, s), јер постоји могућност да су нагиб криве и величина модула задовољавајући а слегања недозвољено велика. Релације овога модула деформације (стишљивости) за ефективне напоне у тлу и других модула (стишљивости у едометру, еквивалентних модула еластичности у дренираним и недренираним условима), који важе за другачије контурне услове, приказане су у ранијем раду коаутора [7].

ОПИТ ПЛОЧОМ ПРЕМА SRPS U.B1.O47. Према овоме стандарду, какав се широко примењује у Немачкој и Аустрији, крутом челичном кружном плочом пречника $D = 300$ mm припремљено тло се оптерећује, зависно од састава и положаја слоја, у 6-8 ступњева до $p_{max} \approx 400-700$ kPa (што домаћим стандардом није јасно прецизирано а према иностраним се одабира тако да максимално слегање буде 2-5 mm или $p_{max} \geq 500$ kPa), до консолидације тла под сваким ступњем, а модул деформације одређује се из израза

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

преко слегања (s) очитаних са обавезног дијаграма (p, s) за оптерећења $p_1 = 0,3p_{\max}$ и $p_2 = 0,7p_{\max}$, приказаним у Табели 1. Затим се плоча растеређује и *други пут* оптеређује ступњевима једнаким као први пут али за један ступањ мање, при чему се одређује E_{v2} по истој формули, опет растеређује и оптеређује *трећи пут*, у 2-3 ступња до претходног p_{\max} , при чему се одређује E_{v3} . Јасно је да је у претходно боље збијеном тлу прираштај модула од E_{v1} до E_{v2} по поновљеном оптерећењу мањи, па се за довољну збијеност захтевају што веће E_{v2} уз што мањи однос E_{v2}/E_{v1} , док би E_{v3}/E_{v2} требало да буде блиско 1. Упоредњем са теоријским решењем за слегање круте кружне плоче на хомогеном, еластичном и изотропном полупростору

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

види се да, за прираштај оптерећења којим се одређује, вредност E_{v1} одговара ефективном еквивалентном модулу еластичности E' тла чији је Poisson-ов коефицијент у дренажним условима $\nu' = 0,21$ (као у крупнозрном тлу). Може се уочити да се методи одређивања M_s и E_{v1} битно не разликују, осим по величини и положају $\Delta p = p_2 - p_1$, приказаним у Табели 1 и на Сл.1, што за веће закривљење експерименталних кривих на дијаграму (p, s) условљава веће међусобне разлике ових модула.

ОПИТ ПЛОЧОМ СА ПАДАЈУЋИМ ТЕГОМ. У домаћој геомеханичкој пракси све шире се користе модели опреме ZFG-02, ZFG-04 и најновији ZFG-2000 произвођача Zorn (Немачка), а нешто мање и других произвођача. Опрема и метод испитивања описани су у домаћој периодици [6,11]. Сажето, крута челична плоча пречника 300 mm оптеређује се ударом тега масе 10 kg који, ручно издигнут, са калибрисане висине низ вођицу слободно пада на пакет тањирастих опруга, чиме се остварује највећи притисак на тло $p = 100 \text{ kPa}$, при чему на плочу каблом прикључени додатни електронски уређај мери њено највеће слегање (s), преко кога се, из израза као за E_{v1} , добија динамички модул деформације

$$E_{vd} = 0,75 \frac{p}{s} D = 0,75 \frac{0,100}{s} 300 = \frac{22,5}{s} \quad [\text{MPa}] \quad \text{за } s[\text{mm}] \quad (4)$$

Модул се читава и усваја директно са уређаја за мерење слегања, као средња вредност три уједначене пробе, на тлу припремљеном са финим изравнавајућим контактним слојем и три удара предоптерећења. Према наведеном, динамички модул деформације добија се за краткотрајно оптерећење (18 ms), *без могућности консолидације* ситнозрног тла, као тзв. *иницијални* модул са почетка замишљене криве (p, s), па би његова вредност могла да буде блиска вредности модула при одговарајућем вишеструко поновљеном (динамичком) оптерећењу и растеређењу тла.

МОГУЋЕ МЕЂУСОБНЕ КОРЕЛАЦИЈЕ РЕЗУЛТАТА

У домаћој геомеханичкој пракси, када се критеријуми довољне збијености исказују захтеваним вредностима статичког модула (готово искључиво M_s) а мерења врше плочом са падајућим тегом, потребно би било наћи довољно поуздане корелације $E_{vd}-M_s$ за типичне врсте тла и агрегата и њихова стања у одговарајућим подручјима напона. Корелације ових модула могле би бити тражене *теоријским* везама (које, очигледно, не постоје, пре свега због нелинеарности и променљивости својстава материјала) или *експериментално*, упоређењем довољно великог

броја резултата квалитетних опита према оба метода (којих још увек нема у довољном обиму). Трећи начин је преузимање иностране регулативе, пре свега домицилне (немачке и аустријске), која не даје везе $E_{vd}-M_s$ али уз E_{v2} уводи и критеријуме збијености преко E_{vd} , па би се могла установити корелација иностраних граничних вредности E_{vd} и домаћих M_s , као у раду [2].

У расположивим условима, овде предлажемо корелације $E_{vd}-M_s$ на основу веза $E_{vd}-E_{v1}$, приказаних у раду интернационално афирмисаног аутора у овој области [1], и веза $E_{v1}-M_s$ до којих се могло доћи анализом тока типичних дијаграма (p,s) за ова два статичка опита. Додатно се приказују и корелације $E_{vd}-M_s$ до којих се дошло упоредним испитивањима збијености шљунка у пројекту ТР-16021 на ГАФ у Нишу.

КОРЕЛАЦИЈЕ $E_{vd}-E_{v1}$. Као меродавна корелација може се одабрати предлог Adam(2008) [1] за аустријску регулативу, са табелом упоредних вредности E_{vd} и E_{v1} за ситнозрно и крупнозрно тло и њиховим аналитички приказаним корелацијама

$$\text{– за ситнозрно тло до } E_{vd} \leq 30 \text{ МПа } (E_{v1} \leq 25 \text{ МПа}): E_{v1} = 1,25(E_{vd} - 10) \quad (5')$$

$$\text{– за крупнозрно тло до } E_{vd} \leq 30 \text{ МПа } (E_{v1} \leq 25 \text{ МПа}): E_{v1} = 0,83E_{vd} \quad (5'')$$

$$E_{vd} > 30 \text{ МПа } (E_{v1} > 25 \text{ МПа}): E_{v1} = 1,25(E_{vd} - 10) \quad (5''')$$

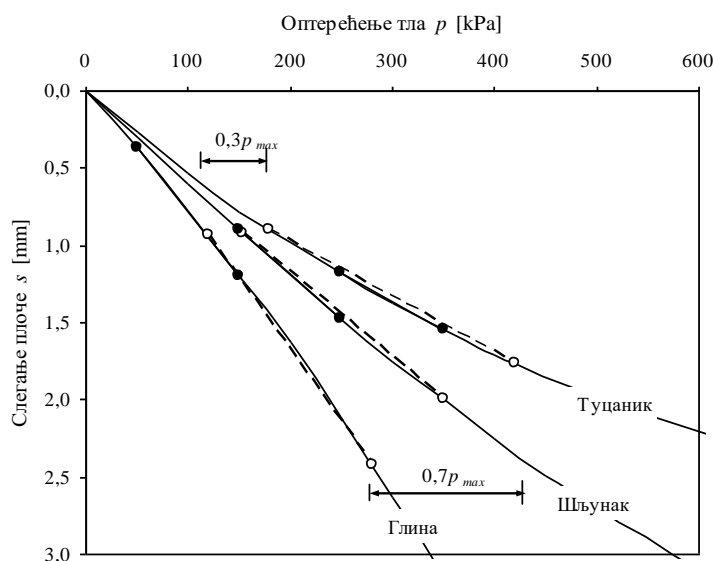
Како се може видети на Сл.1, ако се типичне криве (p,s) за динамички опит (до $p = 100$ кПа) и за статичке опите поклапају, на основу тока кривих морало би бити у глини E_{vd} веће од E_{v1} и M_s а у туцанику E_{vd} мање од E_{v1} и M_s , што је сагласно са наведеним корелацијама.

КОРЕЛАЦИЈЕ $E_{v1}-M_s$. За оба метода према домаћим стандардима, у Табели 1 приказане су меродавне вредности оптерећења за одређивање статичких модула деформације M_s и E_{v1} а на Сл.1 типични дијаграми (p,s) за уобичајене врсте тла.

Табела 1. Карактеристичне вредности оптерећења за одређивање M_s и E_{v1}

Table 1. Characteristic pressure values for M_s and E_{v1} determination

Метод за одређивање	M_s (SRPS U.B1.046)				E_{v1} (SRPS U.B1.047)			
Оптерећење [кПа]	p_{max}	p_1	p_2	Δp	p_{max}	$p_1=0,3p_{max}$	$p_2=0,7p_{max}$	Δp
Постељница (глина)	250	50	150	100	400	120	280	160
ДНС (шљунак)	450	150	250	100	500	150	350	200
НС (туцаник)	550	250	350	100	600	180	420	240
					700	210	490	280



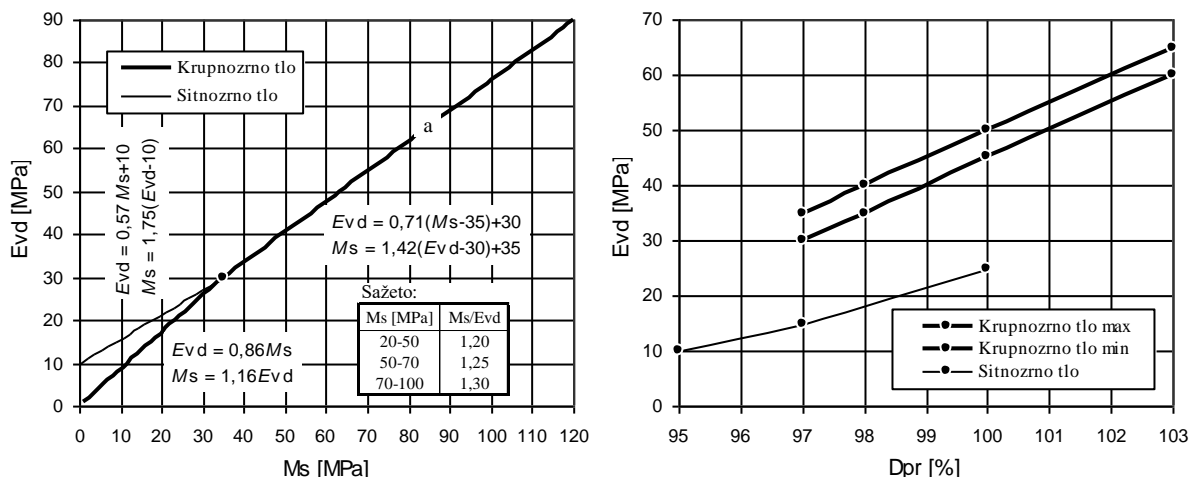
Сл.1. Типични дијаграми (p,s) за уобичајене врсте тла, са подручјима за одређивање статичких модула M_s (пуне сечице) и E_{v1} (испрекидане сечице)
Fig.1. Typical curves (p,s) for usual soils, with secants for determination of the M_s (continuos) and E_{v1} (broken)

Из једначина (1) и (2) произилази да је за праволинијски дијаграм $E_{v1} = 0,75M_s$ тј. $M_s = 1,33E_{v1}$, што за облике кривих (p, s) као на Сл.1 значи да је за ситнозрна тла $M_s > 1,33E_{v1}$ а за крупнозрна $M_s < 1,33E_{v1}$. Имајући у виду напред наведено и реалне облике експерименталних кривих, могуће корелације су

- за ситнозрно тло до $M_s \leq 33$ МПа ($E_{v1} \leq 25$ МПа): $M_s = 1,4E_{v1}$ $E_{v1} = 0,71M_s$ (6')
- за крупнозрно тло $M_s = 33-65$ МПа ($E_{v1} = 25-50$ МПа): $M_s = 1,3E_{v1}$ $E_{v1} = 0,77M_s$ (6'')
- $M_s > 65$ МПа ($E_{v1} > 50$ МПа): $M_s = 1,2E_{v1}$ $E_{v1} = 0,83M_s$ (6''')

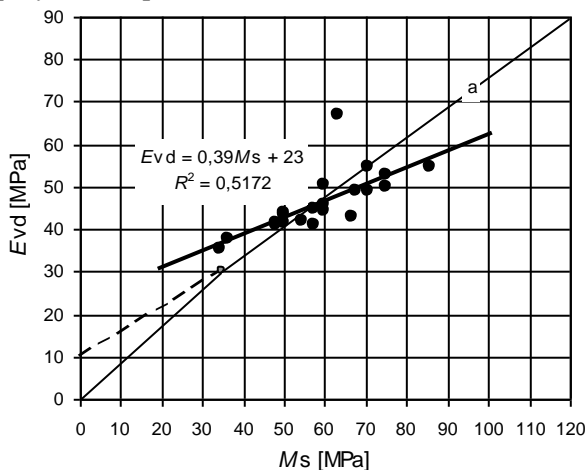
КОРЕЛАЦИЈЕ $E_{vd}-(E_{v1})-M_s$. Увођењем релација (5) у (6), после 'пеглања' малих локалних скокова на дијаграму корелације, за праксу се може предложити, као на Сл.2, за:

- ситнозрно тло $E_{vd} \leq 30$ МПа ($M_s \leq 35$ МПа): $M_s = 1,75(E_{vd}-10)$ $E_{vd} = 0,57M_s+10$ (7')
- крупнозрно тло $E_{vd} \leq 30$ МПа ($M_s \leq 35$ МПа): $M_s = 1,16E_{vd}$ $E_{vd} = 0,86M_s$ (7'')
- $E_{vd} > 30$ МПа ($M_s > 35$ МПа): $M_s = 1,42(E_{vd}-30)+35$ $E_{vd} = 0,71(M_s-35)+30$ (7''')



Сл.2. Дијаграм корелације E_{vd} и M_s према (7) – лево, и графички приказ граничних дозвољених вредности E_{vd} и релативне збијености по Proctor-у (D_{pr}) према немачким прописима – десно
Fig.2. E_{vd} - M_s correlation chart by (7) – left, and limit values of the E_{vd} and D_{pr} from German standards – right

КОРЕЛАЦИЈЕ $E_{vd}-M_s$ НА ОСНОВУ УПОРЕДНИХ ИСПИТИВАЊА. Упоредним мерењима E_{vd} и M_s на слојевима збијеног речног песковитог шљунка (гранулације као за ДНС савремених коловозних конструкција, укупне дебљине 3 m и основе 4×4 m, за модел плитког темеља), вршених у оквиру научно-истраживачког пројекта ТР-16021, на 21 мерном месту добијени су резултати приказани на Сл.3. Како се може видети, уз релативно низак коефицијент корелације,



на шљунку су у подручју $M_s = 35-85$ МПа измерене корелације

$$M_s = 2,545E_{vd}-58 \quad \text{тј.} \quad E_{vd} = 0,39M_s+23 \quad (8)$$

према којима, за $M_s > 55$ МПа, измереној вредности E_{vd} одговара знатно већи модул M_s него према корелацији предложеној у (7''') и линијом **a** на Сл.2 и 3, али је и са њом довољно сагласан.

Сл.3. Дијаграм корелације E_{vd} и M_s на основу упоредног испитивања шљунка на 21 мерном месту
Fig.3. E_{vd} - M_s correlation chart by 21 comparable tests on sandy-gravel

ЗАКЉУЧАК

У складу са важећом регулативом и обимним домаћим искуством у примени тзв. швајцарског статичког модула M_s , извесно је да ће његова примена остати дуже у пракси, пре свега за испитивања позиција са могућим приступом контратерета. Знатно рационалнији метод мерења динамичког модула E_{vd} опитом плочом са падајућим тегом бива све актуелнији (као и савремене методе за континуална испитивања збијености са самоходних машина), па су корелације $E_{vd}-M_s$ неопходне и због адаптације кадрова на новији метод. Образложена корелација $E_{vd}-M_s$, предложена изразима (7) и на Сл.2-лево, могла би се сматрати конзервативном у односу на резултате упоредних мерења на шљунку (Сл.3), па се и због тога предлаже за геомеханичку праксу, ма да се може оценити да су емпиријске корелације са Сл.3 логичније сагласне са немачким критеријумима довољне збијености на Сл.2-десно. Домаћа пракса свакако намеће потребу даљих усаглашавања динамичког модула деформације са статичким, а затим и стандардизацију метода са падајућим тегом, имајући у виду и друге, новије методе. Дотле, упоредна испитивања за разне врсте и стања тла и агрегата нуде најпоузданија решења, уз битна ограничења због поређења иницијалног и секантних модула деформације и одсуства консолидације слабије пропусног тла под ударним оптерећењем.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Adam,D.(2008): *Standardization, design, quality assurance and monitoring of earth works in road engineering in Austria*, Viena University of Technology, Wien.
- [2] Анагности,П.,Рашула,М.(2005): Примена прописа немачких железница за употребу динамичког мерног уређаја у оцени сабијености земљаних материјала, Зборник радова *Геотехнички аспекти грађевинарства*, СГИТСЦГ, Београд, 469-472.
- [3] Brandl,H.(2002): Zbijanje tla i drugih zrnatih materijala za gradevine, *Gradevinar*,54,9,Zagreb,513-527.
- [4] DB NGT 39 (1997): *Упутство за коришћење лаког уређаја са падајућим тегом за грађевинске радове на железници*, Немачке железнице (DB).
- [5] ***(2008): *Operating Manual – Light Drop Weight Tester ZFG 2000*, Zorn Instruments, Stendal, pp.20.
- [6] Рашула,М.,Лолин,М.(2005): Функционално-техничке карактеристике мерног уређаја ZFG-04 за контролу сабијености тла и насутих материјала, Зборник радова *Геотехнички аспекти грађевинарства*, СГИТСЦГ, Београд, 473-478.
- [7] 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.
- [8] SRPS U.B1.046 (1968): *Geomehanička ispitivanja – Određivanje modula stišljivosti metodom kružne ploče*, Jugoslovenski zavod za standardizaciju, Beograd.
- [9] SRPS U.B1.047 (1997): *Geomehanička ispitivanja – Određivanje modula deformacije pomoću opterećenja kružnom pločom*, Savezni zavod za standardizaciju, Beograd.
- [10] Стручна документација националног научно-истраживачког пројекта TP-16021, Грађевинско-архитектонски факултет Универзитета у Нишу, Ниш, 2009.
- [11] Тошовић,С.,Чаки,Л.,Вујанић,В.(2005): Досадашња искуства испитивања употребом лаког уређаја са падајућим тегом, Зборник радова *Геотехнички аспекти грађевинарства*,СГИТСЦГ,Београд,401-404.
- [12] TP BF-StB Teil B 8.3 (1996-2003): *Технички прописи за испитивање тла и стена у путоградњи – Динамички опит кружном плочом помоћу уређаја са падајућим тегом*, Немачке железнице (DB).
- [13] Филиповић,В.(2005): Упоредна контрола збијености материјала у трупцу пруге преко модула стишљивости (методом кружне плоче) и преко динамичког модула деформација (динамичким електронским мерним уређајем са падајућим тегом ZFG-04), Зборник радова *Геотехнички аспекти грађевинарства*, СГИТСЦГ, Београд, 397-400.
- [14] Weingart,W.(1980): *Могућности примене лаког уређаја са падајућим тегом ZFG 2000 у путоградњи и земљаним радовима*, Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift, 150, Wien, 111-116.