

UNIVERZITET U BEOGRADU
RUDARSKO-GEOLOŠKI FAKULTET

Milan R. Bogdanović

KORELACIONE ZAVISNOSTI PARAMETARA ZBIJANJA I
NOSIVOSTI DONJIH SLOJEVA SAOBRAĆAJNICA

doktorska disertacija

Beograd, 2024.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MINING AND GEOLOGY

Milan R. Bogdanović

CORRELATION DEPENDENCES OF COMPACTION
PARAMETERS AND BEARING CAPACITY OF THE
LOWER LAYERS OF ROADS

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2024

Mentor:

Prof. dr Dragoslav Rakić, redovni profesor

Uža naučna oblast: Inženjerska geologija, geomehanika i geotehničko inženjerstvo
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

Članovi komisije:

Prof. dr Gordana Hadži-Niković, redovni profesor

Uža naučna oblast: Inženjerska geologija, geomehanika i geotehničko inženjerstvo
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

Doc. dr Dušan Berisavljević, docent

Uža naučna oblast: Inženjerska geologija, geomehanika i geotehničko inženjerstvo
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

Prof. dr Dragan Lukić, redovni profesor u penziji

Uža naučna oblast: Saobraćajnice, Geotehnika
Univerzitet u Novom Sadu, Građevinski fakultet, Subotica

Datum odbrane: _____

ZAHVALNICA

Ovim putem želim da iskažem iskrenu i srdačnu zahvalnost:

Mentoru Prof. dr Dragoslavu Rakiću, na podršci i razumevanju, pozitivnom pristupu prilikom odobravanja teme i stvaranju opštih uslova za realizaciju disertacije. Posebno sam mu zahvalan što je uvek bio na raspolaganju kad god mi je bio potreban i što je savetima uvek znao da me usmeri i vrati na pravi put. Njegove sugestije i ideje su doprinele kvalitetu disertacije.

Prof. dr Gordani Hadži-Niković, Doc. dr Dušanu Berisavljeviću i Prof. dr Draganu Lukiću što su prihvatili da budu članovi komisije i što su svojim znanjem i iskustvom iz predmetne problematike kao i svojim sugestijama i primedbama doprineli poboljšanju krajnje verzije disertacije.

Nastavno-naučnom osoblju katedre za geotehniku Rudarsko-geološkog fakulteta, za podršku tokom postdiplomskih studija, saveta prilikom izrade disertacije posebno tokom laboratorijskih i terenskih istraživanja.

Zahvaljujem se kolegama iz kompanije Strabag koji su preuzeli na sebe deo posla prilikom vršenja terenskih dodatnih ispitivanja na različitim lokacijama donjih slojeva saobraćajnica.

Milošu Stevanoviću dipl.ing.geol., na dugogodišnjoj uspešnoj naučnoj i stručnoj saradnji kao i pomoći koja se odnosi na deo laboratorijskih ispitivanja koja su obavljena u kompaniji TPA za obezbeđenje kvaliteta i inovacije d.o.o. u Beograd.

Roditeljima i sestri koji su verovali u mene i bili konstantna podrška tokom osnovnih i postdiplomskih studija.

Na kraju, najveću zahvalnost dugujem svojoj porodici supruzi Snežani, ćerki Petri i sinu Aleksi koji su mi bili najveći oslonac, koji su me najbolje razumeli i bez čije višegodišnje podrške izrada ove disertacije ne bi bila moguća.

KORELACIONE ZAVISNOSTI PARAMETARA ZBIJANJA I NOSIVOSTI DONJIH SLOJEVA SAOBRAĆAJNICA

Rezime:

Disertacija se bavi korelacionim zavisnostima parametara zbijanja i nosivosti podloge (donji slojevi saobraćajnica), izgrađene od prirodnih sitnozrnih i krupnozrnih materijala. Cilj istraživanja je bio utvrđivanje pouzdanih korelacija između izabranih parametara materijala koji opisuju stanje slojeva podloge što je doprinelo predlogu načina upotrebe i definisanju vrednosti dinamičkog CBR uređaja (CBR_d).

Ova disertacija prikazuje rezultate opsežnih laboratorijskih i *in situ* ispitivanja u kojima se procenjuje nosivost materijala pomoću navedenih metoda. Ogromna baza podataka omogućila je razvoj nekih korelacija između različitih statičkih i dinamičkih parametara. Za odabrani prirodni materijal pokazano je da se laboratorijski dinamički CBR_{dl} može koristiti kao metoda procene zbijanja i nosivosti, odnosno da se može dobro korelisati sa parametrima standardnih i modifikovanih Proktorovih ispitivanja kao i sa laboratorijskim ispitivanjem statičkog CBR-a. Uporednim ispitivanjima ustanovljeno je da postoji jaka međusobna zavisnost između terenskog dinamičkog CBR_{dt} sa vrednostima terenskih ispitivanja modula E_{v1} - E_{v2} i E_{vd} .

Verifikacija parametara zbijanja i nosivosti, obavljena je na osnovu poređenja sa rezultatima koji su prikazani u literaturi. Uspostavljene zavisnosti koje se odnose na parametre nosivosti dobijene na donjim slojevima saobraćajnica, dale su dobro slaganje sa predloženim literaturnim korelacijama.

Navedene korelacione zavisnosti se mogu primeniti za određene tipove prirodnih materijala i pružaju realna rešenja za širok spektar *in situ* problema. Ove korelacije mogu ponuditi trenutnu odličnu inženjersku procenu i pomoći u brzom procesu donošenja odluka za strukturnu procenu kolovoza u fazama pre, tokom i nakon izgradnje kolovoznog sistema.

Ključne reči:

korelacija parametara zbijanja i nosivosti, donji slojevi saobraćajnica, laboratorijska i terenska ispitivanja, dinamički kalifornijski indeks nosivosti CBR_d

Naučna oblast: Geološko inženjerstvo

Uža naučna oblast: Geotehničko inženjerstvo

UDK: 624.131.5:625.7(043.3)

CORRELATION DEPENDENCES OF COMPACTION PARAMETERS AND BEARING CAPACITY OF THE LOWER LAYERS OF ROADS

Abstract:

The dissertation is about the correlation dependences of compaction parameters and bearing capacity of the subgrade constructed from natural fine-grained and coarse-grained materials. The aim of the determination of reliable correlations between the selected material parameters describing the state of the substrate contributed to the proposal of the method of use and the definition of the values of the dynamic CBR device (CBR_d).

This dissertation presents the results of extensive laboratory and in situ tests in which the bearing capacity of the material is evaluated using the presented methods. The huge database allowed the development of some correlations between various static and dynamic parameters. For the selected natural material, it has been shown that the laboratory dynamic CBR_{ld} can be used as a method of estimating compaction and bearing capacity, i.e. that it can correlate well with the parameters of standard and modified Proctor compaction tests as well as with laboratory testing of static CBR. Comparative tests have shown that there is correlation between the field dynamic CBR_{ld} and the values of field tests of the modulus E_{v1} - E_{v2} and E_{vd} .

Verification of the parameters of compaction and bearing capacity was performed on the basis of a comparison with the results presented in the literature. The established dependencies related to the bearing capacity parameters obtained on the lower layers of traffic roads, gave a good agreement with the proposed literature correlations.

The above correlation can be applied for certain types of natural materials and provide realistic solutions for a wide range of in situ problems. These correlations can offer instant excellent engineering assessment and help in a rapid decision-making process for pavement structural evaluation in the phase of before-construction, during, and post-construction of a pavement system.

Key words:

correlation of compaction parameters and bearing capacity, lower layers of roadways, laboratory and field tests, dynamic California bearing capacity index CBR_d

Scientific field: Geological engineering

Scientific subfield: Geotechnical engineering

UDK: 624.131.5:625.7(043.3)

SADRŽAJ:

SPISAK TABELA.....	vii
SPISAK SLIKA.....	x
1. UVOD	1
1.1 Uvodna razmatranja	1
1.2 Predmet i ciljevi istraživanja	3
1.3 Metode istraživanja	4
1.4 Primena rezultata istraživanja.....	5
1.5 Pregled sadržaja disertacije po poglavljima.....	6
2. DONJI SLOJEVI SAOBRAĆAJNICA.....	8
2.1 Konstruktivni elementi građevinskog objekta	8
2.2 Pogodnost prirodnih materijala za ugradnju.....	9
2.2.1 Vrste i svojstva materijala.....	10
2.2.2 Kontrola kvaliteta.....	14
2.3 Iskop, transport, ugradnja i zbijanje materijala.....	15
3. LABORATORIJSKA I TERENSKA ISPITIVANJA ZBIJANJA I NOSIVOSTI	17
3.1 Zbijanje materijala – opšti principi	17
3.1.1 Proktorov opit.....	18
3.1.2 Optimalno zbijanje sitnozrnih i krupnozrnih materijala.....	19
3.1.3 Faktori koji utiču na zbijanje	21
3.2 Zbijanje tla kao građevinskog materijala.....	22
3.3 Kontrola zbijanja	25
3.3.1 Kriterijumi zbijenosti i nosivosti donjih slojeva saobraćajnica	26
3.3.2 Određivanje suve zapreminske težine i vlažnosti (γ_d , w)	28

3.3.3	Određivanje Kalifornijskog indeksa nosivosti (CBR).....	28
3.3.4	Određivanje modula deformacije (E_{v1} - E_{v2})	30
3.3.5	Određivanje modula stišljivosti (M_s)	33
3.3.6	Određivanje dinamičkog modula deformacije (E_{vd}).....	34
3.4	Dinamički CBR uređaj	35
3.4.1	Primena i tehničke informacije o uređaju	36
3.4.2	Vrsta materijala podobna za ispitivanje.....	38
3.4.3	Postupak izvođenja CBR_d opita i prikaz rezultata.....	38
4.	PRIKAZ REZULTATA ISPITIVANJA	42
4.1	Prikupljeni podaci parametara zbijanja i nosivosti	42
4.1.1	Sitnozrni materijal	43
4.1.1.1	Lokacija 1. (L1-C) - Državni put Ib reda broj 22	44
4.1.2	Krupnozrni materijali	47
4.1.2.1	Lokacija 2. (L2-S) - Robna kuća IKEA, Beograd	49
4.1.2.2	Lokacija 3. (L3-S) - Intermodalni terminal "Batajnica"	52
4.1.2.3	Lokacija 4. (L4-G) - Petlja Batajnica (Autoput E75)	54
4.1.2.4	Lokacija 5. (L5-G) - Autoput E-80: Deonica Merošina – Merošina 1	56
4.2	Dodatna ispitivanja.....	58
4.2.1	Laboratorijska ispitivanja.....	60
4.2.1.1	Definisanje fizičko-mehaničkih karakteristika.....	61
4.2.1.2	Priprema uzoraka i postupak ispitivanja	62
4.2.1.3	Ponovljivost laboratorijskog CBR_{dl} ispitivanja.....	63
4.2.2	Terenska ispitivanja.....	64
4.2.2.1	Vrste i postupak <i>in situ</i> ispitivanja	65

5. DEFINISANJE PARAMETARA ZBIJANJA I NOSIVOSTI KORIŠĆENJEM STATISTIČKIH ANALIZA	66
5.1 Osnovni statistički podaci.....	66
5.2 Statistički pokazatelji parametara zbijanja i nosivosti.....	69
5.2.1 Rezultati laboratorijskih i <i>in situ</i> ispitivanja	69
5.2.1.1 Sitnozrni materijal	69
5.2.1.2 Krupnozrni materijal.....	71
5.2.2 Zbirni prikaz srednjih vrednosti rezultata ispitivanja.....	76
5.3 Statistički pokazatelji parametara zbijanja i nosivosti dodatnih ispitivanja	78
6. LITERATURNI PREGLED POSTOJEĆIH KORELACIONIH ZAVISNOSTI PARAMETARA ZBIJANJA I NOSIVOSTI	83
6.1 Postojeće korelacione zavisnosti između konvencionalnih parametara.....	83
6.2 Korelacione zavisnosti između dinamičkog CBR _d i parametara konvencionalnih ispitivanja zbijanja i nosivosti.....	92
7. RAZVOJ I VERIFIKACIJA KORELACIONIH ZAVISNOSTI.....	100
7.1 Opšte o korelacionim zavisnostima.....	100
7.2 Korelacione zavisnosti parametara zbijanja i nosivosti.....	101
7.2.1 Korelacione zavisnosti između parametara zbijanja i nosivosti dobijenih laboratorijskim i <i>in situ</i> ispitivanjima.....	103
7.2.1.1 Sitnozrni materijal - glina prašinasta	103
7.2.1.2 Krupnozrni materijal - pesak.....	109
7.2.1.3 Krupnozrni materijal – šljunak.....	109
7.2.2 Korelacione zavisnosti između parametara zbijanja i nosivosti dobijenih dodatnim laboratorijskim i <i>in situ</i> ispitivanjima	110
7.2.2.1 Procena parametra dinamičkog CBR _{dl} korišćenjem parametara (w , γ_d i CBR) u laboratorijskim uslovima.....	111
7.2.2.2 Procena parametara zbijanja i nosivosti (E_{v1} - E_{v2} , E_{vd}) korišćenjem parametara CBR _{dt} na posteljičnom sloju.....	114
7.3 Verifikacija dobijenih korelacionih zavisnosti	118

7.3.1	Korelacione zavisnosti između konvencionalnih prametara (E_{v1} - E_{v2} , E_{vd} i M_s)	119
7.3.2	Korelacione zavisnosti između dinamičkog CBR_d i konvencionalnih prametara.....	125
8.	ZAKLJUČAK I PREPORUKE ZA DALJA ISTRAŽIVANJA.....	131
8.1	Zaključna razmatranja	131
8.2	Preporuke za dalja istraživanja	133
LITERATURA		135
BIOGRAFIJA		143

SPISAK TABELA

Tabela 2.1 Razvrstavanje zemljanih materijala (Tehnički uslovi za građenje puteva u Republici Srbiji, 2-2 radovi, 2012).....	10
Tabela 2.2 Srpski standardi za klasifikaciju materijala.....	11
Tabela 2.3 Uticaj svojstava materijala na stabilnost slojeva podloge kolovozne konstrukcije (NZ Forest Road Engineering Manuel, February 2012, ISBN 978-0-473-50661-2 PDF).....	13
Tabela 2.4 Predhodna ispitivanja materijala i učestalost ispitivanja pri unutrašnjoj kontroli za donje slojeve saobraćajnica (Tehnički uslovi građenja puteva u Republici Srbiji).....	14
Tabela 3.1 Parametri koji utiču na površinsko zbijanje tokom izgradnje donjih slojeva saobraćajnica.....	20
Tabela 3.2 Zahtevane vrednosti za zbijenost i nosivost – temeljno tlo, nasip, zasip i posteljica (Tehnički uslovi građenja puteva u Republici Srbiji, 2-2 Zemljani radovi, 2012 god.).....	27
Tabela 4.1 Detalji izvedenih lokacija donjih slojeva saobraćajnica.....	42
Tabela 4.2 L1-C, Probna deonica, prikaz rezultata ispitivanja stepena zbijenosti i vlažnosti.....	45
Tabela 4.3 L1-C, Probna deonica, prikaz rezultata ispitivanja modula stišljivosti i deformacije.....	45
Tabela 4.4 L1-C, Vrste i obim tekućih ispitivanja nasipa izgrađenog državnog puta Ib reda broj 22.....	46
Tabela 4.5 Klasifikacija materijala.....	48
Tabela 4.6 Tabelarni prikaz fizičko-mehaničkih svojstava materijala.....	49
Tabela 4.7 L2-S, Vrste i obim tekućih ispitivanja nasipa izgrađenih pristupnih saobraćajnica i parking prostora na lokaciji Robne kuće IKEA, Beograd.....	49
Tabela 4.8 Rezultati ispitivanja, stepen zbijenosti (R_c) i vlažnosti (w) na probnoj deonici....	51
Tabela 4.9 L3-S, Probna deonica, prikaz rezultata ispitivanja modula deformacije.....	53
Tabela 4.10 L3-S, Vrste i obim tekućih ispitivanja završnog sloja nasipa izgrađenog Intermodalnog Terminala u Batajnici.....	53
Tabela 4.11 Rezultati ispitivanja modula (E_{v1} - E_{v2}) na probnoj deonici posteljičnog sloja.....	55

Tabela 4.12 L4-G, Vrste i obim ispitivanja posteljičnog sloja izgrađene Petlje Batajnica (Autoput E75) u Beogradu.....	56
Tabela 4.13 L5-G, Vrste i obim ispitivanja završnog sloja nasipa na lokaciji autoputa E-80 Niš-Merdare, Deonica Merošina – Merošina 1 od km 3+900 do 4+750.....	58
Tabela 4.14 Vrste i obim dodatnih ispitivanja posteljičnog sloja izgrađenog na lokaciji Petlja Batajnica (Autoput E75) u Beogradu.....	60
Tabela 5.1 L1-C, sitnozrni materijal (glina-prašinasta).....	70
Tabela 5.2 Statistički parametri promenljivih, L2-S, krupnozrni materijal (pesak).....	71
Tabela 5.3 Statistički parametri promenljivih, L3-S, krupnozrni materijal (refulisani pesak)...	71
Tabela 5.4 Statistički parametri promenljivih, L4-G, krupnozrni materijal (šljunak-peskovit)	74
Tabela 5.5 Statistički parametri promenljivih, L5-G, krupnozrni materijal (šljunak-peskovit)	74
Tabela 5.6 L4-G, krupnozrni materijal (šljunak) - dodatna laboratorijaka ispitivanja.....	79
Tabela 5.7 L4-G, krupnozrni materijal (šljunak), posteljični sloj – dodatna <i>in situ</i> ispitivanja	82
Tabela 6.1 Tlo kao građevinski materijal.....	83
Tabela 6.2 Rezultati još nekih prethodnih korelacija i odgovarajući statistički parametri.....	85
Tabela 6.3 Odnos nosivosti parametara podloge (Priručnik za projektovanje puteva u Republici Srbiji, 2012).....	86
Tabela 6.4 Procena vrednosti CBR (Priručnik za projektovanje puteva u Republici Srbiji, 2012).....	86
Tabela 6.5 Klase nosivosti podloge kolovozne konstrukcije (Švajcarski standard SN 640 317 b).....	86
Tabela 6.6 Odnos između modula deformacije E_{v1} - E_{v2} i CBR vrednosti (Floss, 1973).....	87
Tabela 6.7 Uspostavljene zavisnosti između modula deformacija E_{v2} i CBR vrednosti (sastavio na osnovu literaturnih podataka, Weingart 1998).....	88
Tabela 6.8 Korelacije za sitnozrne i krupnozrne materijale, između modula deformacije E_{v2} i dinamičkog modula deformacije E_{vd}	89
Tabela 6.9 Korelacije za krupnozrna, sitnozrna i mešana tla, modul deformacije E_{v2} , dinamički modul deformacije E_{vd} i stepen zbijenosti R_c (prilagođeno iz priručnika za laki deflektometar – LWD, ZFG 3.0, Zorn, 2016).....	91
Tabela 7.1 Ocena jačine veze između parova vrednosti dve promenjive (Chadockova skala)	102
Tabela 7.2 Ocena Koeficijenta korelacije (r) između CBR-a i odgovarajućih parametara glinovitog materijala (L1-C).....	103

Tabela 7.3 Korelacione zavisnosti između CBR vrednosti i parametara fizičko-mehaničkih karakteristika materijala (L1-C).....	105
Tabela 7.4 Regresiona statistička analiza, procena statističkih parametara između CBR vrednosti i parametara fizičko-mehaničkih karakteristika materijala (L1-C).....	106
Tabela 7.5 Regresiona statistička analiza, procena statističkih parametara između statičkih modula M_s i E_{v1} - E_{v2}	108
Tabela 7.6 Ocena Koeficijenta korelacije (r) između <i>in situ</i> parametara nosivosti šljunkovitog materijala (L4-G).....	115
Tabela 7.7 Regresiona statistička analiza, procena koeficijenata korelacije (r) između modula deformacije E_{vd} i E_{v1} - E_{v2}	118

SPISAK SLIKA

Slika 1.1 Proces zbijanja tokom izgradnje posteljičnog sloja na lokaciji Petlje Batajnica - Autoput E75 u Beogradu (2020).....	1
Slika 2.1 Opšta struktura višeslojne kolovozne konstrukcije u Srbiji (Tehnički uslovi za građenje puteva u Republici Srbiji, 2-4 Kolovozne konstrukcije, 2012).....	8
Slika 2.2 Osnovne vrste prirodnih „zemljanih“ materijala a) Humusni materijal b) Sitnozrni vezani materijal, c) krupnozrni nevezani materijal.....	11
Slika 2.3 Dobro granulisan materijal – šljunak na lokaciji Petlje Batajnica - Autoput E75 u Beogradu (2020).....	12
Slika 2.4 Elementi materijala izdvojeni na faze od iskopa do ugradnje – Tipične promene zapremine pojedinih komponenti materijala pri iskupu i transportu - povećanje zapremine kao i ugradnji i zbijanju - smanjenje zapremine (Gazi Ferooz Rahman i dr., 2011).....	15
Slika 3.1 Standardni i modifikovan Proktorov opit (standard SRPS U.B1.038).....	19
Slika 3.2 Prilagođavanje mehanizacije za zbijanje vrsti materijala (Schroeder, 1975).....	21
Slika 3.3 Krive zbijanja, uticaj vlažnosti na postignutu zbijenost, izraženu kroz suhu zapreminsku težinu materijala, pri različitoj energiji zbijanja E. Razlika između tipičnih kriva: a) nevezani - krupnozrni materijali; (b) vezani - sitnozrni materijali (Schroeder, 1975)	22
Slika 3.4 Struktura tla: a) Nevezani materijal različite krupnoće zrna; b) Vezani – koherentni materijal (pahuljičasta struktura).....	23
Slika 3.5 Princip zbijanja - suva zapreminske težina i vlažnosti tla (Braja M. Das, 2015).....	24
Slika 3.6 Odnos suve zapreminske težine (γ_d) i vlažnosti (w) tla, ilustrujući najefikasnije uslove zbijanja „in situ“ (Seed, 1964).....	25
Slika 3.7 Određivanje zapreminske mase na terenu – lokacija objekta Autoput E-80: Niš (Merošina) - Pločnik (Beloljin) a) uređaj sa konusom; b) uređaj sa tankozidnim cilindrom....	28
Slika 3.8 Statičko (klasično) CBR ispitivanje.....	29
Slika 3.9 Prikaz rezultata CBR vrednosti (S.Maraš-Dragojević, 2022).....	30
Slika 3.10 Merenje modula deformacije – (E_{v1} - E_{v2}), sloj nasipa na lokaciji objekta Intermodalni terminal "Batajnica" u Beogradu.....	31
Slika 3.11 Primer iz prakse: prikaz stupnjeva „opterećenje – rasterećenje“ i odnosa kriva „pritisak – sleganje“.....	32
Slika 3.12 Moduli deformacije E_{v1} i E_{v2} - dijagram zavisnosti pritiska i sleganja.....	32

Slika 3.13 Merenje modula stišljivosti - M_s , sloj posteljice na lokaciji izgrađenog državnog puta Ib reda broj 22.....	33
Slika 3.14 Tipičan dijagram (p,s) za uobičajene vrste tla, sa područjima za određivanje statičkih modula M_s - pune linije i E_{v1} - isprekidane linije (M. Stanković, 2021).....	34
Slika 3.15 Merenje dinamičkog modula deformacije - E_{vd} pomoću uređaja sa padajućim tegom, posteljični sloj na lokaciji objekta Autoput E-80: Niš (Merošina) - Pločnik (Beloljin)	35
Slika 3.16 Šematski prikaz opreme za prodor CBR_d klipa; b) CBR_d Klip ($\varnothing$ 50 mm); c) Uređaj za opterećenje i elektronski uređaj za merenje sa modelom ZFG 3.0 LWD.....	37
Slika 3.17 a) CBR_d kalup ($\varnothing$ 150 mm) i prateće komponente b) Kružna ploča sa vođicom za CBR_d klip ($\varnothing$ 300 mm).....	37
Slika 3.18 Dinamičko CBR_d ispitivanje, korišćenje uređaja sa padajućim tegom LWD za izazivanje definisanog udarnog opterećenja na CBR_d klip a) CBR_{dl} – Laboratorijsko ispitivanje b) CBR_{dt} – „In situ“ ispitivanje.....	39
Slika 3.19 Postupci pripreme i zbijanja uzorka u kalupu za izvođenje CBR_d – ispitivanja u laboratorijskim uslovima (https://www.zorn_instruments.de/fallgewichtsgeraete/cbr-dyn/)...	40
Slika 4.1 Granulometrijski sastav i učešće određenih čestica sitnozrnog materijala (L1-C)....	43
Slika 4.2 a) Šematski prikaz kolovozne konstrukcije sa podlogom; b) Izgled probne deonice (Državni put Ib reda broj 22, 2018)	44
Slika 4.3 Grafički prikaz rezultata stepena zbijenosti (R_c) u zavisnosti od broja prelaza valjka (L1-C)	46
Slika 4.4 Granulometrijski sastav – reprezentativna analiza krupnozrnih materijala.....	47
Slika 4.5 Granulometrijski sastav – učešće frakcija krupnozrnih materijala.....	48
Slika 4.6 Šematski prikaz izgleda probnog polja (Robna kuća IKEA, 2016).....	50
Slika 4.7 Grafički prikaz rezultata dinamičkog i statičkog modula (E_{vd} , M_s i E_{v2}) u zavisnosti od broja prelaza valjka.....	51
Slika 4.8 a) Šematski prikaz kolovozne konstrukcije sa podlogom; b) Pripreme sloja nasipa na probnoj deonici pristupne saobraćajnice (Intermodalni terminal "Batajnica", 2020).....	52
Slika 4.9 Ispitivanje stepena zbijenosti (R_c) raspored mernih mesta zbijenog sloja nasipa (I sloj) na pronaj deonici.....	53
Slika 4.10 Šematski prikaz kolovozne konstrukcije sa podlogom i izgled pripremljenog posteljičnog sloja na Petlji Batajnica (Autoput E75).....	54
Slika 4.11 Grafički prikaz rezultata modula deformacije (E_{v1} - E_{v2}) u zavisnosti od broja prelaza valjka.....	55

Slika 4.12 Šematski prikaz kolovozne konstrukcije sa podlogom i izgled pripremljenog sloja završnog sloja nasipa na Deonica Merošina – Merošina 1.....	57
Slika 4.13 Grafički prikaz rezultata stepena zbijenosti (R_c) u zavisnosti od broja prelaza valjka (L5-G)	57
Slika 4.14 Privremena deponija materijala – gradilište Petlja Batajnica (Autoput E75).....	59
Slika 4.15 Uređaji za određivanje statičkog CBR-a i dinamičkog CBR_{dl} , TPA laboratorija u Beogradu.....	61
Slika 4.16 Granulometrijski sastav i učešće krupnozrnog materijala uzorkovanog za potrebe dodatnih ispitivanja sa lokacije gradilišta Petlja Batajnica (Autoput E75).....	61
Slika 4.17 Pojedinačni koraci pripreme uzoraka i postupka ispitivanja dinamičkog CBR_{dl} u laboratoriji TPA u Beogradu.....	62
Slika 4.18 Uticaj broja udaraca padajućeg tega na laboratorijske dinamičke vrednosti CBR_{dl} pri različitim sadržajima vode peskovitog uzorka (Dina Kuttah, 2019).....	63
Slika 4.19 Uticaj uzastopnih udaraca padajućeg tega na laboratorijske dinamičke vrednosti CBR_{dl} pri različitim sadržajima vode, L4-G.....	63
Slika 4.20 Korišćena oprema za određivanje parametara E_{v1} - E_{v2} , E_{vd} i CBR_{dt} pripremljenog sloja posteljice na lokaciji objekta Petlja Batajnica (Autoput E75) u Beograd.....	64
Slika 4.21 Raspored dodatnih ispitivanja na svakoj mikrolokaciji „in situ“.....	65
Slika 5.1 Standardna normalna raspodela - procenat površine ispod Gaussove krive (Tvrtnko Tadić, 2017)	67
Slika 5.2 Opšti prikaz histograma sa noramlnom raspodelom (http://www.matf.bg.ac.rs).....	68
Slika 5.3 Učestalost i distribucija „in situ“ parametara na završnom sloju nasipa, lokacija L1-C (a) modul deformacije E_{v1} ; (b) modul deformacije E_{v2} ; (c) E_{v2}/E_{v1} ; (d) modul stišljivosti M_s	70
Slika 5.4 Učestalost i distribucija „in situ“ parametara na II sloju nasipa, lokacija L2-S (a) modul deformacije E_{v1} ; (b) modul deformacije E_{v2} ; (c) E_{v2}/E_{v1} ; (d) modul stišljivosti M_s	72
Slika 5.5 Učestalost i distribucija „in situ“ parametara na završnom sloju nasipa, lokacija L3-S (a) modul deformacije E_{v1} ; (b) modul deformacije E_{v2} ; (c) E_{v2}/E_{v1} ; (d) stepen zbijenosti R_c	73
Slika 5.6 Učestalost i distribucija „in situ“ parametara na posteljičnom sloju, lokacija L4-G (a) modul deformacije E_{v1} ; (b) modul deformacije E_{v2} ; (c) E_{v2}/E_{v1} ; (d) stepen zbijenosti R_c ...	75
Slika 5.7 Učestalost i distribucija „in situ“ parametara na završnom sloju nasipa, lokacija L5-G (a) modul deformacije E_{v1} ; (b) modul deformacije E_{v2} ; (c) E_{v2}/E_{v1} ; (d) din. modul deformacije E_{vd}	76

Slika 5.8 Zbirni prikaz srednjih vrednosti granulometrijskih sastava materijala uzorkovanih sa različitih lokacija tokom izgradnje donjih slojeva saobraćajnica.....	77
Slika 5.9 Zbirni prikaz srednjih vrednosti zapreminskih težina (γ , γ_d , γ_{dmax}) dobijenih u laboratorijskim i in situ uslovima tokom izgradnje donjih slojeva saobraćajnica.....	77
Slika 5.10 Zbirni prikaz rezultata srednjih vrednosti sadržaja vlage.....	78
Slika 5.11 Zbirni prikaz srednjih vrednosti parametara nosivosti predmetnih lokacija donjih slojeva saobraćajnica.....	78
Slika 5.12 Dodatna laboratorijska ispitivanja - vrednosti parametara zbijanja (w , γ_d).....	80
Slika 5.13 Dodatna laboratorijska ispitivanja - vrednosti parametara nosivosti (CBR, CBR _{dl})	80
Slika 5.14 Učestalost i distribucija „in situ“ parametara na posteljičnom sloju, lokacija L4-G (a) dinamički modul deformacije E_{vd} ; (b) dinamički terenski kalifornijski indeks nosivosti CBR _{dt}	81
Slika 5.15 Učestalost i distribucija in situ parametara na posteljičnom sloju, lokacija L4-G(a) modul deformacije E_{v1} ; (b) modul deformacije E_{v2} ; (c) E_{v2}/E_{v1} ; (d) stepen zbijenosti R_c ;	81
Slika 6.1 Korelaciona zavisnost između vrednosti CBR i modula deformacije E_{v2} (sastavio na osnovu literaturnih podataka, Weingart 1998)	87
Slika 6.2 Korelacione zavisnosti između vrednosti E_{v2} i E_{vd} za sitnozrne i krupnozrne materijale na osnovu literaturnih podataka (Tompai, 2008).....	89
Slika 6.3 Korelacione zavisnosti između vrednosti E_{v2} i E_{vd} za sitnozrne i krupnozrne materijale (Lehmann, 2011)	90
Slika 6.4 Uprošćene korelacione zavisnosti između vrednosti E_{v2} i E_{vd} (Lehmann, 2011).....	90
Slika 6.5 Korelaciona zavisnost između vrednosti modula deformacije E_{v1} i dinamičkog modula deformacije E_{vd} (RVS, Austrijske specifikacije).....	92
Slika 6.6 Proktorove krive za različite uslove zbijanja sitnozrnog tla sa pripadajućim vrednostima CBR _d , (Schmidt i Volm, 2000).....	93
Slika 6.7 Korelacione zavisnosti statičkih i dinamičkih CBR ispitivanja za koherentno sitnozrno tlo (Schmidt i Volm, 2000)	94
Slika 6.8 Poređenje rezultata CBR ispitivanja na uzorcima pepela u odnosu na vlažnost pri sabijanju: MP - modifikovana, SP - standardna energija zbijanja - Zbijanje po Proktoru; (Zabielska-Adamska, K. i Sulewska, M. J., 2015)	95
Slika 6.9 Korelaciona zavisnost između parametara „in situ“ dinamičkog CBR _d i CBR _{dl} u odnosu na vlažnost i suhu zapreminsku težinu (Kuttah, 2019).....	96
Slika 6.10 Granulometriski sastav ipitivanih materijala (Henzinger, C. i Vogt, S., 2019).....	97

Slika 6.11 Korelaciona zavisnost između suve zapreminske težine (γ_d) i: a) Konvencionalnog-statičkog CBR-a; b) Dinamičkog CBR _{dl,1} ; c) Dinamičkog CBR _{dl,2} ; (Henzinger, C. i Vogt, S., 2019)	97
Slika 6.12 Korelaciona zavisnost između „in situ“ dinamičkog CBR _d i modula deformacije E _{v1} (Floss, 1997)	98
Slika 6.13 Korelacione zavisnosti između „in situ“ dinamičkog CBR _d , modula deformacije E _{v2} i dinamičkog modula deformacije E _{vd} , za krupnozrno tlo (Zorn, 2016).....	98
Slika 7.1 Uspostavljene korelacije izmerenih vrednosti CBR-a u odnosu na: a) Sadržaj gline (GL); b) Granicu tečenja (WL); C) Indeks plastičnosti (Ip); d) Optimalnu vlažnost (w _{opt}).....	104
Slika 7.2 Uspostavljene korelacije izmerenih vrednosti: a) CBR-a u odnosu na zapreminsku težinu čvrstih čestica (γ_s); b) CBR-a u odnosu na max.zapreminsku težinu (γ_{dmax}).....	105
Slika 7.3 Uspostavljena korelacija izmerenih vrednosti CBR-a u odnosu na faktor konsistencije (Fc)	107
Slika 7.4 Korelaciona zavisnost „in situ“ parametara, modula deformacije E _{v1} -E _{v2} i modula stišljivosti Ms na završnom sloju nasipa, lokacija L1-C.....	108
Slika 7.5 Korelaciona zavisnost „in situ“ parametara, modula deformacije E _{v1} -E _{v2} i modula stišljivosti Ms na II sloju nasipa, lokacija L2-S.....	109
Slika 7.6 Korelaciona zavisnost „in situ“ parametara, modula deformacije E _{v1} -E _{v2} i dinamičkog modula deformacije E _{vd} na završnom sloju nasipa, lokacija L5-G.....	110
Slika 7.7 Korelaciona zavisnost između vrednosti CBR _{dl} dobijenih iz prvog i drugog udarca padajućeg tega CBR _d uređaja.....	111
Slika 7.8 Dinamički kalifornijski indeks nosivosti CBR _{dl} u odnosu na vlažnost u kalupu uzorka (w)	112
Slika 7.9 Korelaciona zavisnost laboratorijskih parametara, dinamičkog kalifornijskog indeksa nosivosti (CBR _{dl}) i suve zapreminske težine (γ_d).....	113
Slika 7.10 Korelaciona zavisnost laboratorijskih parametara, dinamičkog (CBR _{dl}) i statičkog (CBR) za opseg vlažnosti od 6 % do 12%.....	114
Slika 7.11 Korelaciona zavisnost „in situ“ parametara, modula deformacije E _{v1} i dinamičkog CBR _{dt} na posteljičnom sloju, lokacija L4-G.....	115
Slika 7.12 Korelaciona zavisnost „in situ“ parametara, modula deformacije E _{v2} i dinamičkog CBR _{dt} na posteljičnom sloju, lokacija L4-G.....	116
Slika 7.13 Korelaciona zavisnost „in situ“ parametara, dinamičkog modula deformacije E _{vd} i dinamičkog CBR _{dt} na posteljičnom sloju, lokacija L4-G.....	117
Slika 7.14 Korelaciona zavisnost „in situ“ parametara, modula deformacije E _{v1} - E _{v2} i dinamičkog modula deformacije E _{vd} na posteljičnom sloju, lokacija L4-G.....	117

Slika 7.15 Korelaciona zavisnost između E_{v1} - E_{v2} i E_{vd} (L4-G).....	119
Slika 7.16 Korelaciona zavisnost između E_{v1} - E_{v2} i E_{vd} (L5-G).....	119
Slika 7.17 Uporedni prikaz korelacionih zavisnosti između parametara E_{v2} i E_{vd} predloženih u disertaciji i literaturnih podataka.....	120
Slika 7.18 Zbirni prikaz parametara nosivosti E_{v1} i E_{vd} dobijenih na donjim slojevima saobraćajnica (L4-G i L5-G) i literaturnih podataka (RVS, Austrijske specifikacije).....	121
Slika 7.19 Uporedni prikaz korelacionih zavisnosti između parametara E_{v1} i E_{vd} predloženih u disertaciji i literaturnih podataka (RVS, Austrijske specifikacije).....	122
Slika 7.20 Zbirni prikaz korelacionih zavisnosti između E_{v1} - E_{v2} , E_{vd} i M_s	122
Slika 7.21 Zbirni prikaz korelacionih zavisnosti između E_{v1} - E_{v2} , E_{vd} i M_s	123
Slika 7.22 Uporedni prikaz korelacionih zavisnosti između parametara E_{v1} i M_s predloženih u disertaciji i literaturnih podataka (Samardaković, 2009).....	123
Slika 7.23 Uporedni prikaz korelacione zavisnosti između modula E_{vd} i M_s (L1-C) predložene u ovom radu i literaturnih podataka.....	124
Slika 7.24 Uporedni prikaz korelacione zavisnosti između modula E_{vd} i M_s (L2-S) predložene u ovom radu i literaturnih podataka.....	124
Slika 7.25 Zbirni prikaz između vrednosti CBR_{dl} dobijenih iz privog ($CBR_{dl,1}$) i drugog ($CBR_{dl,2}$) udarca padajućeg tega za krupnozrne materijale i literaturnih podataka.....	125
Slika 7.26 Zbirni prikaz između vrednosti $CBR_{dl,2}$ i γ_d (L4-G) sa literaturnim postojećim vrednostima za krupnozrne materijale (Henninger i Vogt, 2019).....	126
Slika 7.27 Zbirni prikaz između statičke (klasične) vrednosti CBR-a i dubine penetracije ($s_{d,2}$) dinamičkog CBR-a za šljunkoviti materijal oznake L4-G sa literaturnim podacima.....	127
Slika 7.28 Uporedni prikaz korelacionih zavisnosti vrednosti statičkog CBR-a i dubine penetracije ($s_{d,2}$) dinamičkog CBR-a za šljunkoviti materijal oznake L4-G sa postojećim korelacijama.....	127
Slika 7.29 Uporedni prikaz korelacione zavisnosti E_{v1} u odnosu na CBR_{dt} sa postojećom korelacijom (Floss, 1997).....	128
Slika 7.30 Zbirni prikaz parametara dinamičkog modula deformacije E_{vd} , modula deformacije E_{v2} i dinamičkog CBR_{dt} sa literaturnim podacima (Zorn, 2016).....	129
Slika 7.31 Uporedni prikaz korelacione zavisnosti E_{v2} u odnosu na CBR_{dt} sa postojećom korelacijom (Zorn, 2016).....	129
Slika 7.32 Uporedni prikaz korelacione zavisnosti E_{vd} u odnosu na CBR_{dt} sa postojećom korelacijom (Zorn, 2016).....	130

1. UVOD

1.1 Uvodna razmatranja

Putna infrastruktura igra značajnu ulogu u ekonomiji zemlje obezbeđujući efikasne i najjeftinije transportne saobraćajne objekte kako u razvijenim tako i u zemljama u razvoju. Kolovoz je jedan od primarnih elemenata i važna komponenta putne infrastrukture, koji obezbeđuje nesmetano, bezbedno i efikasno kretanje vozila.

Donji slojevi saobraćajnica čine podlogu kolovozne konstrukcije koja je sastavni deo kolovoznog sistema. Završni sloj podloge – posteljica, igra glavnu ulogu u obezbeđivanju čvrste i izdržljive površine osnove kolovozne konstrukcije. Posteljica se definiše kao zbijeni sloj prirodnog lokalnog tla ili materijala iz pozajmišta, neposredno ispod nevezanih nosećih slojeva, pružajući odgovarajući temelj kolovozu (Slika 1.1). Podloga igra važnu ulogu u davanju strukturalne stabilnosti i čvrstoće kolovoznoj konstrukciji zbog toga što prima dinamička prolazna opterećenja koja joj nameće saobraćaj vozila. Ova saobraćajna opterećenja moraju se sistematski prenositi na način da deformacija podloge bude u granicama elastičnosti, a razvijene smičuće sile u granicama sigurnosti pod nepovoljnim klimatskim uslovima i saobraćajnim opterećenjima.



*Slika 1.1. Proces zbijanja tokom izgradnje posteljičnog sloja na lokaciji
Petlje Batajnica -Autoput E75 u Beogradu (2020)*

Stanje podloge kolovozne konstrukcije generalno zavisi od dve međusobno povezane karakteristike:

- Nosivosti - podloga mora imati sposobnost da izdrži dinamička opterećenja koja se prenose sa gornjih slojeva kolovozne konstrukcije. Na ovu nosivost često utiču stepen zbijenosti, sadržaj vlage i tip materijala. Podloga koja može da izdrži veliko opterećenje bez prekomerne deformacije smatra se dobrom.
- Promena zapremine - većina materijala podleže određenim zapreminskim promenama usled promene sadržaja vlage i temperaturnih uslova. Visoko plastični materijali se skupljaju i bubre u zavisnosti od sadržaja vlage, tla sa većim sadržajem finozrne frakcije mogu biti podložna mrazu u hladnim regionima.

Kvalitet kolovoznih konstrukcija u velikoj meri zavise od karakteristika materijala i načina izgradnje slojeva podloge. Izgradnja donjih slojeva saobraćajnica sa adekvatnim nosivim

karakteristikama zahteva korišćenje odgovarajućih metoda izgradnje i poštovanje odgovarajućih procedura kontrole kvaliteta. Procedure kontrole kvaliteta koje se često koriste tokom zemljanih radova uključuju pravilan izbor i identifikaciju materijala, kontrolu debljine ugrađenih materijala i sadržaja vlage i korišćenje odgovarajuće opreme za zbijanje koja pogoduje uslovima na terenu. Usklađenost zbijenih slojeva na osnovu pretpostavljenih „zahtevanih“ vrednosti (npr. zbijenost, nosivost) se obično proverava izvođenjem terenskih i laboratorijskih ispitivanja koja služe za obezbeđenje kvaliteta *in situ*.

Podloga se najčešće sastoji od zemljanih materijala kao što su šljunak, pesak, prašina i glina koji utiču na strukturni kapacitet kolovoznog sistema. Zbijenost i nosivost prirodnih materijala su najvažniji pokazatelji koje treba zadovoljiti tokom izgradnje donjih slojeva saobraćajnica. Trajnost i stabilnost čitave konstrukcije zavisi od kvaliteta obavljenog zbijanja, pa se provera inženjerskih svojstava dobija na osnovu kontrole zbijenosti i deformabilnosti ugrađenih materijala. Postupci kontrole se koriste da bi se osigurao kvalitet građenja, poštujući kriterijume definisane određenim propisima, specifikacijama i standardima koji se koriste u projektovanju. Pored kontrole zbijenosti, kao osnovno merilo kvaliteta izgradnje koristi se i nosivost završnog sloja podloge (posteljice) preko kojeg se gradi kolovozna konstrukcija (noseći slojevi i slojevi asfalta i betona).

U okviru ove doktorske disertacije vršena je analiza dobijenih parametara zbijanja i nosivosti donjih slojeva saobraćajnica kao važnih konstruktivnih elemenata.

Izgradnja savremenih saobraćajnica podrazumeva i strožije zahteve vezane za kontrolu građenja. Prilikom kontrole kvaliteta izgradnje donjih slojeva saobraćajnica – podloge kolovozne konstrukcije, određuju se fizičko-mehanički parametri tla korišćenjem različitih terenskih i laboratorijskih ispitivanja. Pored toga, terenskim i laboratorijskim ispitivanjima, utvrđuje se i podobnost materijala za izgradnju podloge kolovozne konstrukcije. Vrednosti fizičko-mehaničkih parametara zavise i od brojnih faktora kao što su: osnovna svojstva ugrađenog materijala (litološki sastav, mineraloška građa, hemijski sastav, granulometrijski sastav i dr.), kvalitet i način ugradnje. Ovako dobijeni rezultati zahtevaju i kvalitetnu obradu, interpretaciju i sistematizaciju. Kao krajnji rezultat toga je uspostavljanje korelacija između karakterističnih parametara koje se mogu primenjivati prilikom rešavanja praktičnih problema.

Procena nosivosti konstrukcije odnosno čvrstoće sloja podloge obuhvata različite vrste laboratorijskih i terenskih ispitivanja za određivanje fizičkih-mehaničkih svojstava i svojstava čvrstoće. Svako ispitivanje ima svoj značaj u proceni konstruktivne nosivosti kolovozne konstrukcije.

Određivanje parametara zbijanja i nosivosti podloge zahteva različita laboratorijska ispitivanja kao što su standardni i modifikovani Proktorov opit, laboratorijsko ispitivanje statičkog kalifornijskog indeksa nosivosti (CBR), ispitivanja *in situ* modula deformacije (E_{v1} - E_{v2}), modula stišljivosti (M_s), dinamičkog modula deformacije (E_{vd}) i stepena zbijenosti (R_c). Svaki parametar ima svoju primenu. Na primer, CBR vrednost je dominantni parametar u projektovanju kolovoza u mnogim zemljama, čak kao preporučena metoda za karakterizaciju podloga. Modul deformacije (E_{v1} - E_{v2}) je dominantni parametar nosivosti tokom i nakon izgradnje donjih slojeva kolovoznog sistema a (R_c) je dominantni parametar koji se koristi za kontrolu zbijanja. Određivanje gore navedenih parametara je dugotrajno i skupo.

U inženjerskoj praksi, izgradnja donjih slojeva saobraćajnica zahteva odgovarajuću zbijenost slojeva, koja se obično definiše preko standardnog i modifikovanog Proktorovog opita. Pri tome treba voditi računa da se ne koristi stepen zbijenosti (R_c) kao jedini parametar za procenu zbijanja materijala.

U poslednjih nekoliko godina u svetu je počeo da se koristi i dinamički CBR uređaj, koji je od skoro u upotrebi i u Srbiji. Kako je u pitanju uređaj sa kojim se ispitivanja mogu obavljati u laboratorijskim uslovima, ali i na terenu, rezultati će omogućiti njihovo međusobno poređenje i dobijanje zavisnosti između parametara kojima se ocenjuje podobnost korišćenja materijala i parametara zbijanja i nosivosti koji su postignuti na terenu izgradnjom podloge kolovozne konstrukcije. U vezi sa tim u laboratoriji i na konkretnoj lokaciji (Autoput E75 - Petlja Batajnica) izvršena su merenja pomoću ovog uređaja. Na osnovu dobijenih rezultata priložene su određene

korelacione zavisnosti sa parametrima dobijenim standardnim postupcima, što predstavlja poseban doprinos, jer upotreba ovog novog uređaja još uvek nije standardizovana.

Brza i laka procena parametara zbijanja i nosivosti tokom različitih faza (kao što su faze pre, tokom i posle izgradnje) je primarni zadatak u razvijenim zemljama. Efikasna upotreba inženjerske opreme kao što je dinamički CBR uređaj je poželjna za upotrebu uz razvijanje različitih empirijskih korelacija za određivanje parametara nosivosti podloge.

Dinamičko CBR ispitivanje, koristeći uređaj LWD (light weight deflectometer), trebalo bi da se široko koristi zbog svoje brzine i lakoće istraživanja kao alternativni metod klasičnim metodama kontrole kvaliteta u procesu zbijanja ili proceni nosivosti podloge (*Zabielska-Adamska, K. i Sulewska, M. J., 2015*).

Za potrebe izrade ove disertacije izvršeno je sistematsko sakupljanje, obrada i analiza brojnih podataka o kvalitetu različitih prirodnih materijala, koji su usklađeni sa potrebama izgradnje donjih slojeva saobraćajnica. U pojedinim slučajevima izvršena je kompleksna analiza korišćenih materijala. Da bi se uspostavile nove i potvrdile postojeće korelacije između parametara zbijanja i nosivosti, u okviru disertacije analizirani su rezultati laboratorijskih i terenskih ispitivanja pojedinih vrsta prirodnih materijala ugrađenih na različitim lokacijama tokom građenja donjih slojeva saobraćajnica (slojevi nasipa i posteljice).

Prikazane su različite korelacije između parametara dobijenih laboratorijskim ispitivanjima koja su vršena radi definisanja podobnosti za ugradnju određenog prirodnog materijala sa parametrima zbijanja i nosivosti ispitanog sloja podloge. Pored analize postojećih podataka, izvršena je i obrada parametara dodatnih laboratorijskih i terenskih ispitivanja.

Sva ispitivanja su izvedena u laboratoriji TPA, kao i *in situ* na različitim lokacijama u Srbiji.

1.2 Predmet i ciljevi istraživanja

Postojanje različitih metoda za definisanje parametara zbijanja i nosivosti donjih slojeva saobraćajnica, često inženjerima predstavlja problem prilikom njihovog izbora. Pored toga, korišćenjem različitih metoda vrlo često se dobijaju i različite vrednosti parametara zbijanja i nosivosti. Laboratorijska i terenska ispitivanja su izvršena sa adekvatnom i savremenom opremom u skladu sa važećim nacionalnim standardima odnosno relevantnim standardima i preporukama drugih zemalja, tako da predmet istraživanja u ovoj disertaciji obuhvata:

- Detaljan opis postojećih metoda i relevantnih fizičko-mehaničkih parametara koji se koriste za kontrolu zbijanja i nosivosti donjih slojeva saobraćajnica
- Mogućnost primene dinamičkog CBR uređaja za potrebe kontrole građenja donjih slojeva saobraćajnica u laboratorijskim i terenskim uslovima
- Detaljne analize rezultata ispitivanja u zavisnosti od vrste materijala od kojeg su izgrađeni donji slojevi saobraćajnica, tipa kolovozne konstrukcije i kvaliteta pripremljenih slojeva
- Definisanje teorijske osnove za dopunu nacionalnih propisa i standarda primenom dinamičkog CBR uređaja

Primarni cilj ove doktorske disertacije je formiranje određenih korelacionih zavisnosti parametara zbijanja i nosivosti za procenu kvaliteta podloge kolovozne konstrukcije, kako bi se ubrzao proces donošenja odluka o projektovanju kolovoza i pojednostavila procena obezbeđenja kvaliteta i kontrole kvaliteta kolovoznog sistema.

Ovo istraživanje je preduzeto sa osnovnim ciljem formiranja određenih korelacionih zavisnosti između laboratorijskih i terenski dobijenih parametara, koje su neophodne u geotehničkim analizama vezanim za izbor i način građenja donjih slojeva saobraćajnica od prirodnih materijala.

Obzirom na različite tipove kolovoznih sistema, način primene prirodnih materijala u slojevima podloge, način pripreme pojedinačnih slojeva, kao i činjenicu da svojstva materijala nisu jedinstvena ili konstantna, ispitivanjima se ne može pouzdano utvrditi neka opšta vrednost

pojedinih parametara. Iz tih razloga dobijene vrednosti se ne mogu koristiti za sve donje slojeve saobraćajnica, tako da se neki od kontrolnih fizičko-mehaničkih parametara određuju na više načina, kako bi se postigla veća pouzdanost prilikom izbora. U slučaju, kada različiti izvori daju različite vrednosti parametara, mora se proceniti kojem ispitivanju treba dati veći značaj (tj. oceniti ga kao pouzdanije) ili u nedostatku boljeg, izabrati najnepovoljniju vrednost.

Neposredni ciljevi istraživanja sprovedeni u okviru ove disertacije su:

- Analiza postojeće literature i prikupljanje podataka tekućih ispitivanja tokom izgradnje podloge saobraćajnica na različitim lokacijama u Srbiji
- Dodatna laboratorijska i *in situ* ispitivanja za potrebe razvoja korelacionih zavisnosti parametara zbijanja i nosivosti donjih slojeva saobraćajnica
- Definisanje korelacionih zavisnosti na osnovu sistematski prikupljenih laboratorijskih i terenskih podataka koji se odnose na identifikaciono-klasifikacione pokazatelje ugrađenih prirodnih materijala u slojeve podloge, kao i na parametre zbijanja i nosivosti
- Predlog načina upotrebe i definisanje vrednosti nestandardizovanog dinamičkog CBR uređaja (CBR_d) u laboratorijskim i terenskim uslovima, u zavisnosti od vrste prirodnog materijala kao i kvaliteta pripremljenog donjeg sloja saobraćajnice, na osnovu poređenja sa rezultatima dobijenim istovremenim ispitivanjima pomoću standardnih laboratorijskih i terenskih metoda
- Definisanje inženjerskih parametara prirodnih materijala koji utiču na kvalitet građenja, sigurnost i isplativije projektovanje donjih slojeva saobraćajnica

1.3 Metode istraživanja

Istraživanja u disertaciji su zasnovana na analizi postojećih podataka, na primerima iz prakse koji se mogu naći u domaćoj i stranoj literaturi kao i na novim rezultatima istraživanja koja su sprovedena u okviru ovoga rada. Primjenjene su sledeće metode istraživanja:

- Teorijske analize, koje se odnose na proučavanje i primenjivost dosadašnjih teorijskih ispitivanja i najnovijih saznanja vezanih za predmet doktorske disertacije
- Prikupljanje, obrada i analiza podataka koji se odnose na pripremu i izvođenje terenskih i laboratorijskih ispitivanja
- Metode laboratorijskih ispitivanja (identifikaciono-klasifikaciona ispitivanja i ispitivanja zbijanja i nosivosti) odabranih prirodnih materijala radi ugradljivosti u donje slojeve saobraćajnica
- Metode terenskih ispitivanja zbijanja i nosivosti izgrađenih slojeva podloge kolovozne konstrukcije
- Statistička obrada podataka koja je omogućila da se na osnovu laboratorijskih i terenskih ispitivanja usvoje reprezentativni parametri, kao i proceni kvalitet dobijenih vrednosti
- Komparativne analize kojima se izvršilo upoređivanje i definisanje korelacionih zavisnosti rezultata laboratorijskih i terenskih ispitivanja za različite vrste prirodnih materijala

Za definisanje fizičko-mehaničkih karakteristika prirodnih materijala kao i definisanje parametara nosivosti i zbijanja izvedenih slojeva podloge kolovozne konstrukcije, primenjene su konvencionalne laboratorijske i terenske metode ispitivanja.

Svojstva zbijenosti određena su standardnim i modifikovanim Proktorovim ispitivanjima u skladu sa standardima SRPS U.B1.038 – povučen i SRPS EN 13286-2. Ispitivanja su urađena zbijanjem pripremljenih uzoraka u cilindričnim kalupima prečnika 10 i 15 cm.

Laboratorijska CBR ispitivanja, dinamičkom i statičkom – klasičnom metodom, sprovedena su kako bi se utvrdila veza između odnosa nosivosti i zbijenosti nevezanog prirodnog šljunkovitog materijala. Paralelno sa izradom epruveta uzoraka za ispitivanje laboratorijskog dinamičkog

kalifonijskog indeksa nosivosti (CBR_{dl}) vršena je izrada epruveta uzoraka za ispitivanje statičkog CBR-a (CBR). Za obe metode ispitivanja priprema reprezentativnih uzoraka je vršena pri istoj standardnoj i modifikovanoj energiji zbijanja (Zbijanje po Proktoru), sa istim sadržajem vode.

U ovom radu posebna pažnja je posvećena uspostavljanju korelacija parametara *in situ* ispitivanja: modula deformacije (E_{v1} - E_{v2}), dinamičkog modula deformacije (E_{vd}) i terenskog dinamičkog kalifonijskog indeksa nosivosti (CBR_{dt}) pri definisanom stepenu zbijenosti (R_c). Ispitivanja su urađena na sloju posteljice izgrađenoj od prirodnog kamenog agregata – šljunak, na lokaciji objekta Petlja Batajnica (Autoput E75) u Beogradu.

1.4 Primena rezultata istraživanja

Rezultati ovog rada su poslužili za formiranje korelacionih zavisnosti parametara zbijanja i nosivosti koji su neophodni u geotehničkim analizama vezanim za izbor i način građenja donjih slojeva saobraćajnica od prirodnih materijala. Pored toga ukazano je na značaj ugradljivosti i kontrole materijala na kojima se vrše ispitivanja, a posebno sa aspekta interpretacije CBR_d rezultata dobijenih metodom dinamičkog CBR uređaja.

Na osnovu primenjenih metoda, analize postojećih podataka iz svetske literature i rezultata istraživanja koji su sprovedeni u okviru ove disertacije ostvareni su sledeći rezultati:

- Prikupljen je i obrađen veliki broj parametara zbijanja i nosivosti odabranih prirodnih materijala dobijenih ispitivanjima izvedenih u laboratoriji TPA, kao i *in-situ* na lokacijama u Srbiji.
- Definisanje fizičko-mehaničkog ponašanja prirodnih materijala iz donjih slojeva saobraćajnica na osnovu različitih standardnih i nestandardnih laboratorijskih i terenskih ispitivanja, kao i ponašanje istih u zavisnosti od uslova ugradnje (načina zbijanja, promene vlažnosti, stepena zbijenosti, primenjenih kontrolnih metoda i sl.).
- Proširenje postojećih saznanja i mogućnosti primene dinamičkog CBR-a prilikom izbora krupnozrnih prirodnih materijala za potrebe građenja kao i tokom izgradnje donjih slojeva saobraćajnica. U vezi sa tim definisan je primenljiv opseg merenja za karakteristične parametre zbijanja i nosivosti. To će omogućiti efikasnije i praktičnije vršenje ispitivanja, bez korišćenja teške mehanizacije naročito na slabo pristupačnim terenima.
- Za odabrani prirodni materijal pokazano je da se laboratorijski dinamički kalifornijski indeks nosivosti (CBR_{dl}) može koristiti kao metoda procene zbijanja i nosivosti, odnosno da se može dobro korelisati sa parametrima standardnih i modifikovanih Proktorovih ispitivanja kao i sa parametrom laboratorijskog statičkog ispitivanja kalifornijskog indeksa nosivosti (CBR).
- Uporednim ispitivanjima na donjem sloju saobraćajnice izgrađene od prirodnog šljunkovitog materijala ustanovljeno je da postoji dobra međusobna zavisnost između terenskog dinamičkog kalifornijskog indeksa nosivosti (CBR_{dt}) sa vrednostima terenskih ispitivanja modula deformacije (E_{v1} - E_{v2}) i dinamičkog modula deformacije (E_{vd}).
- Formiranje novih korelacionih zavisnosti između parametara dobijenih laboratorijskim i terenskim standardnim i nestandardnim metodama ispitivanja pored naučnog imaju i praktičan značaj. Iste omogućavaju da se broj kompleksnih i skupih ispitivanja znatno smanji, a ranije dobijeni rezultati ispitivanja takođe iskoriste za definisanje određenih fizičko-mehaničkih parametara koji tada nisu određeni.

- Unapređenje teorijskih i praktičnih saznanja na osnovu uporednih rezultata merenja različitim laboratorijskim i terenskim ispitivanjima tokom izgradnje donjih slojeva saobraćajnica preuzetih iz domaće i strane literature.

Želja autora je da pojedini rezultati prikazani u disertaciji, zasnovani na korelacionim zavisnostima parametara zbijanja i nosivosti donjih slojeva saobraćajnica nađu praktičnu primenu od strane inženjera geotehnike u našoj zemlji.

1.5 Pregled sadržaja disertacije po poglavljima

Sadržaj doktorske disertacije je izložen u osam poglavlja:

U Poglavlju 1, daju se opšte napomene koje se odnose na značaj istraživanja i formiranja korelacionih zavisnosti između parametara zbijanja i nosivosti kao najvažnijih pokazatelja izgradnje donjih slojeva saobraćajnica. Istaknuti su predmet i ciljevi istraživanja, korišćene metode i primena rezultata u geotehničke svrhe.

U Poglavlju 2, opisuje se značaj karakteristika materijala kod projektovanja i izgradnje donjih slojeva saobraćajnica kao elemenata građevinskog objekta. Poseban akcenat je stavljen na pogodnost, iskop, transport, ugradnju i zbijanje materijala.

U Poglavlju 3, daje se pregled opštih podataka o zbijanju tla kao građevinskom materijalu i laboratorijskim i *in situ* ispitivanjima. Podeljeno je u dva dela: u prvom delu su opisani aspekti koji se odnose na zbijanje materijala, a drugi deo razmatra aspekte koji se odnose na kontrolu zbijanja i nosivosti donjih slojeva saobraćajnica. U ovom poglavlju je prikazan detaljan opis dinamičkog CBR uređaja, date su osnove merenja za dobijanje dinamičkog kalifornijskog indeksa nosivosti (CBR_d) u laboratorijskim i terenskim uslovima kao i faktori koji utiču na izmerenu vrednost.

U Poglavlju 4, se govori o prikupljenim podacima sa pet (5) lokacija izgradnje saobraćajnica izvedenih po različitim projektima u Republici Srbiji. Pomenuti podaci predstavljaju parametre zbijanja i nosivosti sitnozrnih i krupnozrnih materijala određenih pre i tokom izgradnje donjih slojeva saobraćajnica (nasip, posteljica). U nastavku su detaljno opisana dodatna laboratorijska i terenska ispitivanja. U delu laboratorijska ispitivanja definisane su fizičko-mehaničke karakteristike. Prikazan je način formiranja i priprema uzoraka i detaljno opisan postupak ispitivanja. U delu terenskih ispitivanja definisana je konstrukcija, ispitna deonica i postupak određivanja različitih parametara zbijanja i nosivosti.

U Poglavlju 5, izvršena je detaljna statistička analiza i prikaz rezultata laboratorijskih i terenskih ispitivanja za pet različitih materijala. Pored prikazanih parametara dobijenih laboratorijskim ispitivanjima za definisanje podobnosti materijala prikazani su i *in situ* parametri zbijanja i nosivosti dobijeni na pripremljenim donjim slojevima saobraćajnica koje su i predmet ove disertacije (zapreminska težina i vlažnost (γ_d , w), kalifornijski indeks nosivosti (CBR), modul deformacije (E_{v1} - E_{v2}), modul stišljivosti (M_s) i dinamički modul deformacije (E_{vd}). Prikazani su i rezultati dinamičkog kalifornijskog indeksa nosivosti (CBR_d) dobijeni u laboratorijskim i terenskim uslovima za unapred definisan krupnozrni materijal (šljunak). Pomenuti rezultati ispitivanja su prikazani tabelarno i grafički.

U Poglavlju 6, daje se detaljan pregled i analiza literature postojećih korelacionih zavisnosti parametara zbijanja i nosivosti u cilju donošenja određenih zaključaka kao i razumevanja savremenih istraživačkih problema.

Poglavlje 7, je vezano za razvoj i verifikaciju korelacionih zavisnosti. Rezultati ispitivanja koji su prikazani u prethodnim poglavljima iskorišćeni za međusobno poređenje, tj. definisane su korelacione zavisnosti između parametara zbijanja i nosivosti dobijenih u laboratorijskim uslovima kao i *in situ* na pojedinim izvedenim donjim slojevima saobraćajnica u Srbiji. U nastavku je izvršena verifikacija uspostavljenih korelacionih zavisnosti koje su dobijene za potrebe ove doktorske disertacije sa svetskom literaturom. Objašnjene su sličnosti i razlike u dobijenim korelacijama sa navođenjem osnovinih razloga za eventualna ostupanja.

Poglavlje 8, predstavlja završno poglavlje doktorske disertacije gde su sumirani zaključci i doprinosi. Nakon ovoga date su preporuke za dalja istraživanja.

Doktorska disertacija se završava spiskom korišćene literature i kraćom biografijom autora

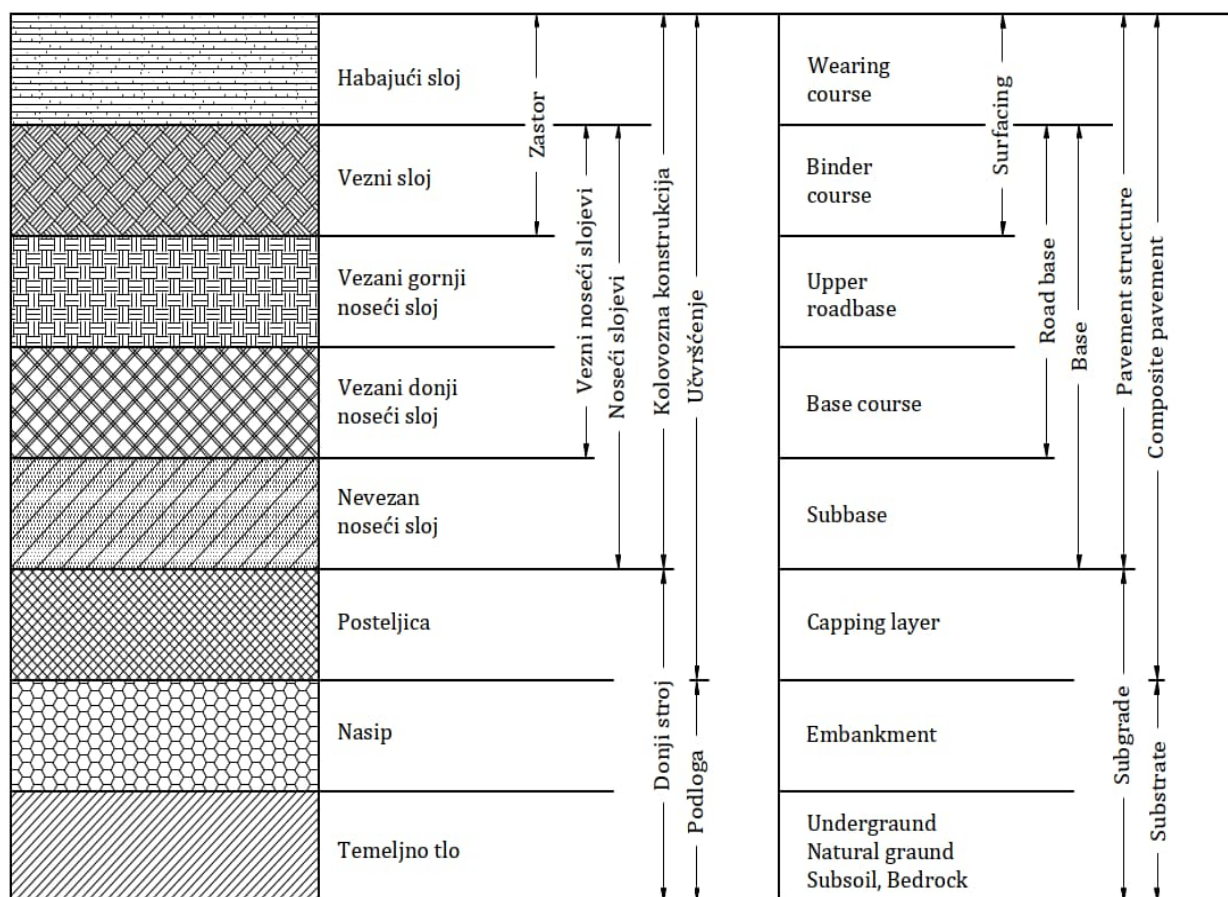
2. DONJI SLOJEVI SAOBRAĆAJNICA

U današnjem smislu, putevi su građevinski objekti namenjeni kretanju drumskih vozila. To su drumske saobraćajnice koje povezuju različite teritorije, odnosno međusobno povezuju naseljena mesta ili međusobno povezuju delove pojedinih naseljenih mesta.

Put kao građevinski objekat, pored ekonomskog i ekološkog aspekta, treba da ispuni i opšte tehničke zahteve za izgradnju. To podrazumeva i poštovanje odgovarajućih propisa i standarda koji regulišu ovu oblast i koji se stalno menjaju i vremenom postaju znatno strožiji. Paralelno sa tim, menjaju se i usavršavaju projektna rešenja koja uključuju primenu različitih građevinskih materijala, tehnologije izvođenja, kontrole kvaliteta izrade kao i kvaliteta primenjenih materijala.

2.1 Konstruktivni elementi građevinskog objekta

Karakteristike materijala igraju ključnu ulogu za projektovanje i izgradnju donjih slojeva saobraćajnica – podloge kolovozne konstrukcije. E. J. Yoder i M. W. Witczak (1975) ističu da je adekvatna priprema podloge od suštinskog značaja za izgradnju dugotrajnih i ekonomičnih kolovoznih konstrukcija. Opšta struktura višeslojne kolovozne konstrukcije za projektovanje u sklopu novogradnje u Srbiji je prikazana na Slici 2.1.



Slika 2.1. Opšta struktura višeslojne kolovozne konstrukcije u Srbiji
(Tehnički uslovi za građenje puteva u Republici Srbiji, 2-4 Kolovozne konstrukcije, 2012)

Podloga je sastavni deo kolovozne konstrukcije jer predstavlja temelj kolovozu. Osnovna funkcija je da obezbedi adekvatnu osnovu kolovozu i za to treba da ima dovoljnu stabilnost u nepovoljnim klimatskim uslovima i uslovima opterećenja. Zbog toga je veoma važno na koji način se procenjuju

odnosno određuju parametri zbijanja i nosivosti pre, tokom i nakon izgradnje slojeva podloge sprovođenjem laboratorijskih i terenskih ispitivanja.

Svaki sloj ima nekoliko različitih uloga u obezbeđivanju funkcije kolovozne konstrukcije. Glavni koncept porojektovanja standardne fleksibilne kolovozne konstrukcije je da treba obezbedi višeslojni sistem sa krutim materijalima na vrhu gde je intenzitet naprezanja visok i slabijim materijalima (u pogledu čvrstoće i kvaliteta) na dnu gde je intenzitet naprezanja nizak, (Huang, 2004).

Sa aspekta građevinskog inženjerstva put kao objekat sastoji se od dva osnovna konstruktivna elementa: donjeg stroja i kolovozne konstrukcije (Slika 2.1). Ti delovi se grade poštujući veliki broj funkcionalnih i konstruktivnih zahteva i karakteristika.

Donji stroj puta obuhvata zemljani trup (temeljno tlo - podtlo, nasip i posteljicu) i veštačke objekte. Gradi se u zemlji ili na zemlji, pa se radovi na njegovoj izgradnji svrstavaju u grupu geotehničkih ili takozvanih zemljanih radova. On je onaj deo konstrukcije koji ima zadatak da preko oformljene ravne površine (posteljice), preuzme saobraćajno opterećenje i celu kolovoznu konstrukciju. Ujedno ima funkciju nivelacionog regulatora odnosa sa okolinom.

Zemljani trup koga čine donji slojevi saobraćajnica koji je i predmet istraživanja disertacije, predstavlja veštačku konstrukciju koja se najčešće gradi od prirodnih materijala (zemljani materijal, pesak, šljunak, kamen itd.), po odgovarajućim geotehničkim kriterijumima. Prema položaju terena može biti u nasipu, useku, zaseku i galeriji.

2.2 Pogodnost prirodnih materijala za ugradnju

Prirodni sitnozrni i krupnozrni materijali se u najvećoj meri koriste kao osnovni građevinski materijali pri izgradnji podloga kolovoznih konstrukcija. U ovim slučajevima poželjno je da materijal koji se koristi *in situ* ima zadovoljavajuće karakteristike, a u suprotnom bi materijal morao da se poboljša (mešanje sa drugim i sl.). Treba da ima dovoljnu čvrstoću, da bude slabo nestišljiv, tako da buduće sleganje ne bude preterano, da održava konstantnu promenu zapremine u odnosu na promenljivi sadržaj vode kao i da poseduje odgovarajuću propustljivost. Zahtevi se najbolje mogu postići preciznim odabirom vrste materijala za nasipanje i pravilnom primenom. Osnovna svojstva materijala mogu se proveriti nezavisno, međutim, poželjne karakteristike, kao što su visoka čvrstoća, niska kompresibilnost i stabilnost su obično povezane sa vrednostima gustine (ili jedinične težine) koje se mogu poboljšati dobrim zbijanjem.

Većina prirodnih materijala se može ugraditi u donje slojeve saobraćajnica, poteškoće u zadovoljenju potrebnih kriterijuma kao što su nosivost, zbijenost, vodopropusnost, osetljivost na promenu vlage izazvane vremenskim prilikama, mogućnost prilagođavanja vlažnosti sušenjem ili kvašenjem radi postizanja optimalnih uslova za ugradnju kao i relativna cena tih radova čine neke materijale pogodnijim za ugradnju u određenim okolnostima od drugih. Izbor materijala za ugradnju zavisi od udaljenosti mesta iskopa, raspoloživoj količini, kao i drugim ekonomskim i tehnološkim okolnostima nasuprot pogodnosti za ugradnju i pogodnosti fizičko-mehaničkih svojstava relevantnih za određeni kolovozni sistem kao i kvalitet izgrađenih slojeva podloge (temeljno tlo, nasip, zasip, posteljica) koji se želi postići.

U svakom slučaju i bez obzira na pogodnosti treba se ispitivanjem i odgovarajućim analizama dokazati da predviđeni materijal za ugradnju zadovoljava predviđena svojstva korišćena u analizama dokazivanja pouzdanosti budućeg objekta - saobraćajnice obzirom na moguća granična stanja nosivosti i upotrebljivosti.

Pri izboru raspoloživih vrsta materijala pri izgradnji slojeva podloge kolovozne konstrukcije može poslužiti ocena upotrebljivosti pojedinih vrsta materijala razvrstanih prema uobičajenim kategorijama na osnovu njihovih karakteristika, prikazana u Tabeli 2.1. Podatke iz ove tabele treba koristiti samo kao okvirne pokazatelje koje treba potvrditi odgovarajućim ispitivanjima u svakom pojedinačnom slučaju.

Tabela 2.1. Razvrstavanje zemljanih materijala
(Tehnički uslovi za građenje puteva u Republici Srbiji, 2-2 Zemljani radovi, 2012)

Kat.	Naziv kategorije	Opis materijala	Veličina zrna materijala	Način iskopavanja	Ocena upotrebljivosti
1	plodno tlo	nalazi se na površini terena: humus i busen, sa primesama šljunka, peska, prašine i gline	-	buldožer, bager	prikladno samo kao osnova za zelene površine; nije nosivo, stabilno niti otporno na eroziju
2	slabo nosivo tlo	lakognječive do žitke konsistencije ($I_c \leq 0,5$); može da sadrži organske materije (treset, trulež)	više od 15 mas.-%, ϕ manje od 0,063 mm	buldožer, bager	u prirodnom stanju nije upotrebljivo
3	koherentni materijal	nalazi se ispod plodnog tla u srednjegnječivoj do čvstoj konzistenciji (zemlja, trulež) ili	više od 15 mas.-%, ϕ veći od 0,063 mm	buldožer, bager	u prirodnom stanju i odgovarajućem vremenu upotrebljiv za nasipe; nosivost i stabilnost zavise od spoljašnjih uticaja
	nekoherentni materijal	u sabijenom stanju (sitnež, tucanik, šljunak, jalovina)	manje od 15-% ϕ veći od 0,063 mm manje od 30 %, ϕ veći od 63 mm	buldožer sa rijačem (povremen)	

2.2.1 Vrste i svojstva materijala

Za procenu podobnosti tla kao prirodnih materijala za izvršenje zemljanih radova, tj. iskopa, utovara, transporta, ugrađivanja i zbijanja, kao i podobnosti tla kao terena na kome će se graditi donji slojevi saobraćajnica, sve „zemljane“ materijale, bilo da su na trasi puta ili da se nalaze u pozajmištu, svrstavamo u sledeće osnovne vrste (Slika 2.2):

Humusni materijal

Površinski sloj terena bogat organskim materijama koje potiču od vegetacije, prašinasto-glinovite granulacije. Ovaj materijal se ne koristi za izradu donjih slojeva saobraćajnica, skida se i uklanja sa površina na kojima će se graditi podloga kolovozne konstrukcije. Debljina humusnog materijala koji treba ukloniti određuje se prethodnim ispitivanjem i kontroliše se tokom građenja.

Sitnozrni vezani materijali

U ovu vrstu spadaju svi vezani materijali kao što su gline, prašine, prašinate gline, peskovite prašine i les. Osnovna karakteristika ovih materijala je plastičnost, tj. promena konzistencije sa promenom vlažnosti, koja potiče od finih čestica gline i prašine. Vezani, viskoplastični materijali se često teško zbijaju i poprime konzistenciju tvrdu kao kamen kada su suvi, ali imaju manju nosivost od nevezanih materijala. Neke gline se šire kada su vlažne i skupljaju se kada su suve, što ih čini posebno teškim kao materijal za podlogu. Najbolji način za rešenje ovog problema je prvo dobro zbijanje, a zatim ne dozvoliti da se pokvase (obezbeđivanjem drenaže).



Slika 2.2. Osnovne vrste prirodnih „zemljanih“ materijala
a) Humusni materijal b) Sitnozrni vezani materijal, c) krupnozrni nevezani materijal

Krupnozrni nevezani materijali

Nevezani materijali kao što su pesak i šljunak, odnosno njihove mešavine čine ovu vrstu. Lako se mogu videti pojedinačne čestice i voda prilično lako otiče iz njih. Osnovne karakteristike ovih materijala su neplastičnost koja potiče od krupnih čestica, lakoća pri zbijanju i dobra nosivost.

Mešoviti materijali

Mešoviti materijali predstavljaju mešavinu nevezanih krupnozrnih i zemljanih sitnozrnih materijala. Vrste tla kao prirodnog građevinskog materijala za izgradnju donjih slojeva saobraćajnica u prirodi su veoma različite. Zato je uočena potreba da se definiše neki sistem kako bi se pojedine vrste tla svrstale u grupe, klase ili kategorije, sa sličnim osobinama.

Tačan opis materijala mora biti zasnovan na njegovoj fizičkoj analizi. Ova analiza uključuje informacije o klasifikacionim pokazateljima pre svega veličini zrna a zatim i njegovoj eventualnoj plastičnosti, koji se dobijaju laboratorijskim opitima. Raspodela veličine zrna krupnozrnih frakcija materijala se procenjuje pomoću seta sita, dok se hidrometarski opit koristi za sitnozrne klasifikovane materijale (određivanje granulometrijskog sastava materijala). Konzistentnost karakterišu Aterbergove (Atterberg) granice – granica tečenja (w_L ili LL), plastičnosti (w_p ili PL) i skupljanja (w_s ili SL).

Srpski standardi za svaki od ovih opita definisani su u Tabeli 2.2, njihovi rezultati se koriste kao ulazni podaci u sistemima klasifikacije materijala.

Tabela 2.2. Srpski standardi za klasifikaciju materijala

Vrsta opita	Srpski standardi
Geomehanička ispitivanja - Određivanje granulometrijskog sastava	SRPS U.B1. 018 - povučen
Geotehničko istraživanje i ispitivanje - Laboratorijsko ispitivanje tla - Deo 4: Određivanje granulometrijskog sastava	SRPS EN ISO 17892-4
Geomehanička ispitivanja - Određivanje konzistencije tla - Aterbergove granice	SRPS U.B1. 020 - povučen
Geotehničko istraživanje i ispitivanje - Laboratorijsko ispitivanje tla - Deo 12: Određivanje tečenja i plastičnosti tla	SRPS EN ISO 17892-12

Postoji nekoliko sistema klasifikacije, a jedan od najčešće korišćenih od strane geotehničkih inženjera je Jedinstveni sistem klasifikacije tla (USCS) razvijen 1952. godine, a opisan od strane Američkog društva za ispitivanje materijala (ASTM), u standardu D2487-11.

U pojedinim zemljama primenjuju se različite varijacije ovog klasifikacionog sistema, ali je osnovni princip veoma sličan, a često i indentičan sa izvornim: svaki tip tla se može opisati sa dva slova, dve oznake, a mogu se upotrebiti i dvojni simboli.

U Srbiji se koriste SRPS U.B1.001 – opšta klasifikacija tla i SRPS U.B1.002 - Klasifikacija tla i mešavine tla i agregata za puteve.

Nedavno je Evropski komitet za normalizaciju (CEN) razvio novi sistem nazvan Evropski sistem klasifikacije tla (ESCS), koji je predstavljen u ISO14688-2, njemu indentičan Srpski standard je SRPS EN ISO 14688-2.

Sistemi klasifikacije se mogu koristiti za dobijanje pojednostavljenog opisa iz svojstava tla – materijala. Ove informacije mogu biti korisne u bilo kojoj vrsti geotehničkog inženjerskog projekta. Međutim, trebalo bi da se koristi samo kao indikator ponašanja tla, pošto se njegovo ponašanje ne može predvideti bez *in situ* i laboratorijskih ispitivanja.



Slika 2.3. Dobro granulisan materijal – šljunak na lokaciji Petlje Batajnica - Autoput E75 u Beogradu (2020)

Svojstva materijala su najvažniji faktori kada se odlučuje koji materijal će se koristiti za izgradnju donjih slojeva saobraćajnica. Često se materijal bira kao kompromis između postizanja željenih svojstava i prihvatljivih ukupnih troškova. U idealnom slučaju, najbolji materijal je dobro granulisan, sa brojnim hrapavim površinama, tvrd i niske stope upijanja vode.

Svojstvo materijala koje ima značajan uticaj na nosivost, zbijenost i dugovečnost donjih slojeva saobraćajnica je granulometrijski sastav. Materijal koji se sastoji od dobro granulisane mešavine peska i šljunka, sa 10-15% udela sitnih čestica (čestice prečnika manjeg od 0,06 mm) obično će biti najpoželjniji materijal. Na slici 2.3 prikazana je privremena deponija šljunkovitog materijala na lokaciji Petlje Batajnica - Autoput E75 u Beogradu.

Krupnozrni šljunak obezbeđuje strukturnu čvrstoću, sitnozrniji šljunak i pesak ispunjavaju praznine između većih čestica da bi obezbedili visoku gustinu i maksimalni ugao unutrašnjeg trenja, dok se sitni komadi kombinuju sa vodom kako bi povezali mešavinu. Poželjno je da sitne čestice imaju određenu plastičnost (Indeks plastičnosti između 3 i 10) kako bi se poboljšalo njihovo vezivanje.

Donji slojevi saobraćajnica treba da imaju dobru zbijenost i visok udeo krupnog agregatnog materijala koji će pomoći u raspodeli opterećenja po podlozi. Na nosivost slojeva podloge utiču fizičko-mehaničke i mineraloške karakteristike materijala, njegova gustina i sadržaj vlage (Tabela 2.3).

Tabela 2.3. Uticaj svojstava materijala na stabilnost slojeva podloge kolovozne konstrukcije
(NZ Forest Road Engineering Manuel, February 2012, ISBN 978-0-473-50661-2 PDF)

Svojstva materijala		Šljunak	Pesak	Prašina	Glina
Sadržaj vode	Suv	Malo utiče na nosivost	Slabe nosivosti, osim ako nije dobro granulisan	Slaba nosivost	Povećava nosivost, kada se zbija
	Vlažan	Malo utiče na nosivost	Povećava koheziju	Povećava koheziju	Povećava koheziju ne sabijenog materijala, smanjuje nosivost zbijenog materijala
	Zasićen	Malo utiče na nosivost	Može smanjiti nosivost, zbog međusobnog odvajanja zrna	Mat.slabe nosivosti, voda podmazuje i odvaja čes.	Materijal vrlo slabe nosivosti, voda podmazuje i odvaja čestice
Gustina	Niska	Slaba nosivost	Slaba nosivost	Slaba nosivost	Slaba nosivost
	Visoka	Povećava nosivost, međusobnim spajanjem zrna	Povećava nosivost, međusobnim spajanjem zrna	Povećava nosivost	Povećava nosivost
Granulometrijski sastav	Slabo granulisan	Smanjenje nosivosti, zbog nedostatka svih krupnoća zrna i lošeg međusobnog slaganja	Smanjenje nosivosti	-	-
	Dobro granulisan	Povećanje nosivosti, zbog dobrog međusobnog slaganja zrna svih krupnoća	Povećava nosivost	-	-
Mineraloški sastav i oblik	-	Smanjenje nosivosti, zbog slabih ili vremnski istrošenih zrna	Smanjenje nosivosti, zbog vremnski istrošenih zrna, ali se može poboljšati granulometrijskim sastavom	Oblik i mineraloški sastav mogu uticati na elastičnost	Može imati značajan uticaj na plastičnost i skupljanje

Materijal koji upija vodu iz okoline, stvaraće probleme vezane za skupljanje i bubrenje, kao i smrzavanja i odmrzavanja tokom zimskih perioda. Ovo uzrokuje lomljenje materijala i raspadanje u fini materijal sa smanjenom nosivošću.

Klimatski uslovi mogu značajno uticati na stanje podloge i ugrađene materijale. Promene vlage i temperature mogu uticati na svojstva materijala, a samim tim i na ukupne karakteristike i upotrebljivost kolovozne konstrukcije.

Željena svojstva tla kao materijala za izgradnju slojeva podloge su: stabilnost, nestišljivost, trajnost nosivost, minimalne promene zapremine pod nepovoljnim vremenskim uslovima, dobra drenaža i lakoća zbijanja.

2.2.2 Kontrola kvaliteta

S obzirom na to da kvalitet prirodnih materijala i njegovo ugrađivanje ima veliki uticaj na debljinu kolovozne konstrukcije i na njenu trajnost, mora se posvetiti posebna pažnja odabiru kvalitetnog materijala za izradu donjih slojeva saobraćajnica, kao i načinu njegovog ugrađivanja.

Za svaku karakterističnu vrstu materijala, ugrađenog u slojeve donjeg stroja kolovozne konstrukcije (nasip, zasip ili posteljicu) treba pre početka radova odrediti tehnološki postupak, vrstu sredstva za zbijanje i njegov dubinski učinak. Usklađenost izvršenih radova sa zahtevima u projektnoj dokumentaciji i tehničkim uslovima treba proveriti:

- prethodnim ispitivanjima svojstava planiranih materijala za ugradnju
- proverom ugrađivanja od strane unutrašnje i nezavisne kontrole

Pre početka ugrađivanja prirodnih „zemljanih“ materijala izvođač mora da proveriti karakteristična svojstva materijala koja su navedena u Tabeli 2.4. Unutrašnja kontrola izvođača za vreme izvođenja radova mora da utvrdi usaglašenost svojstava svih materijala koji se koriste za slojeve donjeg stroja (nasip, posteljica) sa zahtevima u projektnoj dokumentaciji i tehničkim uslovima. Vrsta i učestalost ispitivanja u sklopu unutrašnje kontrole treba da budu određeni u programu prosečne učestalosti i kontrole.

Tabela 2.4. Predhodna ispitivanja materijala i učestalost ispitivanja pri unutrašnjoj kontroli za donje slojeve saobraćajnica (Tehnički uslovi građenja puteva u Republici Srbiji)

Svojstvo materijala	Postupak za ispitivanje - standard -	Zapremina ugrađenih materijala - min. učestalost ispitivanja -
Prirodna vlažnost	SRPS EN ISO 17892 - 1	1000 m ³
Granulometrijski sastav	SRPS EN ISO 17892 - 4	1000 m ³
Ispitivanje po Proktoru ➤ optimalna vlaga ➤ max.suva gustina	SRPS EN 13286 - 2	4000 m ³
Granice konzistencije ➤ granica tečenja ➤ indeks plastičnosti	SRPS EN ISO 17892 - 12	4000 m ³
Udeo humusnih/organskih primesa	SRPS EN 1744 – 1	4000 m ³

Kriterijumi za odabir materijala, koji je podoban za ugradnju donjih slojeva saobraćajnica, temelje se na postizanju odgovarajuće zbijenosti, krutosti i vodopropusnosti nakon zbijanja. Pri tome se mora uzeti u obzir svrha ugradnje i zahtevi moguće konstrukcije koja će se izgraditi na nasipanoj podlozi.

Ugradljivost prirodnih materijala se ispituje na uzorcima u laboratoriji i na probnim poljima na terenu. “Najpopularniji” način ispitivanja ugradljivosti je Proktorov opit. U tom se opitu uzorci zbijaju s kontrolisanom energijom i određuje se vlažnost koja daje maksimalnu gustinu tla, tj. vlažnost pri kojoj se materijal najblje zbija. Na takvim se uzorcima u posebnim slučajevima obavljaju i drugi opiti kojima se određuju mehanička svojstva materijala kao što su stišljivost i čvrstoća.

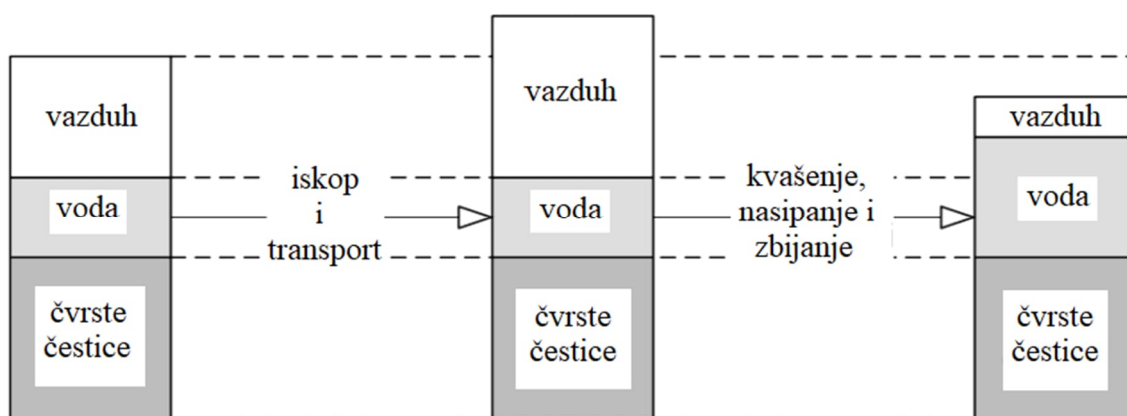
Da bi se ispravno odredile mere pripreme materijala za zbijanje tokom izgradnje slojeva podloge kolovozne konstrukcije, potrebno je u laboratoriji utvrditi njegove karakteristike koje utiču na izbor optimalnog načina zbijanja.

Zemljani nasipi se obično grade zbijanjem tla pri optimalnom sadržaju vode koji je utvrđen u laboratoriji pomoću standardnog ispitivanja. Trenutna geotehnička praksa pretpostavlja da je energija primenjena na tlo tokom terenskog zbijanja zemljanih nasipa uporediva sa onom primenjenom u laboratoriji tokom Proktorovog zbijanja. To znači da su *in situ* svojstva zemljanih naslaga takođe slična onima u laboratorijskim uzorcima zbijenim pri istom sadržaju vode i prema standardnoj Proktorovoj metodi, odnosno standardnoj energiji zbijanja. Na osnovu ove pretpostavke, laboratorijski zbijeni uzorci mogu se koristiti za karakterizaciju mehaničkih svojstava.

2.3 Iskop, transport, ugradnja i zbijanje materijala

U svim fazama građenja kolovoznih sistema izvode se i zemljani radovi kao prethodni, pripremni, pomoćni ili završni radovi. Početak gradnje gotovo svakog kolovoznog sistema počinje zemljanim radovima. Zavisno od potrebe oni obuhvataju čišćenje terena od rastinja i smeća, iskop, prevoz, nasipanje i zbijanje materijala. Skoro kod svih značajnijih građevinskih zahvata ti se radovi izvode korišćenjem odgovarajućih građevinskih mašina. Najpogodniji izbor tih mašina zavisi od vrste materijala, količine radova i namene buduće saobraćajnice.

Donji slojevi saobraćajnica moraju biti izgrađeni tako da što duže osiguraju dobru stabilnost puta, tj. da se ne pojave sleganja i deformacije koje bi mogle uzrokovati oštećenje kolovozne konstrukcije. Da bi se to postiglo, slojeve treba uraditi od kvalitetnog materijala kao i jednolično i dobro nabiti odgovarajućim građevinskim mašinama. Dobro nabijeni donji slojevi saobraćajnica (slojevi zemljanog trupa) sležu se s vremenom do 1%, a nenabijeni čak i više od 10%.



Slika 2.4. Elementi materijala izdvojeni na faze od iskopa do ugradnje – Tipične promene zapremine pojedinih komponenti materijala pri iskupu i transportu - povećanje zapremine kao i ugradnji i zbijanju - smanjenje zapremine (Gazi Ferooz Rahman i dr., 2011)

Prilikom iskopa i transporta materijal se rastresa i povećava zapreminu. Ako se ponovno ugrađuje, treba ga zbiti, a u pojedinim slučajevima mu treba pre zbijanja promeniti vlažnost, bilo smanjiti sušenjem ili povećati kvašenjem. Zbijanjem materijal zauzima manju zapreminu od one koju je zauzimao u prirodnom stanju. Promene zapremine utiču na određivanje potrebnih količina materijala, vrstu i obim radova pri njihovom projektovanju kao i na troškove (Slika 2.4).

“Ugraditi”, znači najčešće materijal (prirodni - zemljani materijal, pesak, šljunak, kamen itd.), razastreti po pripremljenoj podlozi (podložni sloj) u sloj određene debljine i zbiti ga valjanjem. Na takav pripremljeni sloj treba ugraditi novi sloj materijala. Zbijanjem se materijalu daju bolja mehanička svojstva tj. veća krutost i čvrstoća.

Nisu svi materijali tla jednako pogodni za ugradnju, međutim, često se isplati koristiti zemljani materijal koji je slabije ugradljiv, a bliži je mestu ugradnje nego bolji iz udaljenog nalazišta, jer su transportni troškovi vrlo veliki. Zato treba detaljno ispitati veći broj nalazišta materijala u blizini gradilišta.

Od posebne važnosti za izgradnju donjih slojeva saobraćajnica su strojevi za zbijanje obzirom na različite mogućnosti zbijanja pojedinih vrsta materijala. Obzirom da se zbijanje materijala izvodi s njegove površine, a učinak rada stroja naglo opada sa dubinom ispod površine, podloga se izvodi nasipanjem i razastiranjem materijala u tanjim slojevima. Najpogodnija debljina razastrtog sloja materijala pripremljenog za zbijanje zavisi od njegove vrste kao i od kapaciteta stroja za zbijanje. Ponekad je vlažnost materijala značajno veća od optimalne pri kojoj se on kvalitetno zbija pa ga treba sušiti, ili je značajno manja od optimalne pa ga treba dodatno kvasiti (provlažavati). U prvom slučaju to se radi razastiranjem i prirodnim sušenjem, što znatno ograničava takvu aktivnost usled vremenskih uslova, a u drugom se razastrtom materijalu dodaje voda kvašenjem.

Osnovni razlozi zbog kojih se pri izboru i ugrađivanju materijala u podlogu, a posebno u završni sloj - posteljicu mora posvetiti puna pažnja, su ti što geotehničke karakteristike sitnozrnih materijala nisu stalne i menjaju se u zavisnosti od postignutog stepena zbijenosti i vlažnosti pri ugrađivanju.

Takođe mora se voditi računa i zbog mogućih oscilacija nivoa podzemnih voda, nedovoljnih ili neodgovarajućih mera za odvodnjavanje, dejstva mržnjenja i odmrzavanja, kapilarnog penjanja vode i dr. Ne treba zaboraviti da kvalitet i uslovi ugrađivanja u velikoj meri utiču na karakteristike i na kasnije ponašanje materijala ispod kolovozne konstrukcije, zbog čega se zaštitne mere preduzete u vreme građenja uvek višestruko isplate u kasnijoj eksploataciji, jer se na taj način sprečava oštećenje kolovoza i povećava njegov vek trajanja.

Da bi se ispunili svi gore navedeni zadaci koje jedna valjano projektovana posteljica mora da ostvari vrši se izrada završnog sloja donjeg stroja od posebno odabranog ili mehanički obrađenog prirodnog materijala, koji je neosetljiv ili manje osetljiv na promene vlažnosti, čime se povećava stepen zaštite kolovozne konstrukcije od uticaja mraza, a osim toga poboljšava se planiranje površine posteljice, gradilišni transport, rad mašina za zbijanje materijala i dr.

3. LABORATORIJSKA I TERENSKA ISPITIVANJA ZBIJANJA I NOSIVOSTI

Sve veći zahtevi za kvalitetnom izgradnjom kako bi se izbeglo višestruko zbijanje i smanjila relativna sleganja slojeva podloge kolovozne konstrukcije, kao i smanjili troškovi istraživanja, zahtevaju veći kvalitet kontrole zbijanja ugrađenih materijala. Pod kontrolom zbijanja podrazumeva se primena određene grupe opita - ispitivanja preduzetih nad zbijenim donjim slojevima saobraćajnica s ciljem da se potvrde karakteristike zahtevane projetom tokom postupka izgradnje. Kontrolna zbijanja se vrše na direktan i indirektan način, kroz kontrolu određenih karakteristika materijala i osiguravanju kvaliteta zbijanja slojeva podloge.

U projektu se zahteva kontrola nekoliko parametara, kao što su jedinična težina, smičuća čvrstoća, deformabilnost, propusnost i dr. Kontrola zbijanja treba da se usresredi na procenu vrednosti koje pokazuju svaki od ovih parametara. Ali dešava se da brojnost pojedinačnih kontrola ovih parametara zahteva mnogo rada i oduzima vreme, što je nekompatibilno sa dinamikom izgradnje. Iz tog razloga se kontrola vrši na indirektan način, kroz kontrolu određenih karakteristika koje obezbeđuju kvalitet zbijanja donjih slojeva saobraćajnica.

Ovo poglavlje se sastoji od pregleda opštih podataka o zbijanju materijala i laboratorijskim i terenskim ispitivanjima koja su korišćena u istraživanjima i podeljeno je u dva glavna dela. U prvom delu se pristupa opštim karakteristikama o zbijanju materijala, kao što su:

- poreklo materijala i njegov uticaj na određena svojstva koja utiču na zbijanje,
- opšti principi zbijanja sitnozrnih i krupnozrnih materijala i
- Proktorov opit.

Drugi deo se sastoji od opisa procesa povezanih sa kontrolom zbijanja izvedenih tokom izgradnje donjih slojeva saobraćajnica (nasip, posteljica), kao i ispitivanjima koja se izvode za dobijanje parametara zbijanja i nosivosti, odnosno suve zapreminske težine i vlažnosti (γ_d , w), kalifornijskog indeksa nosivosti (CBR), modula deformacije (E_{v1} - E_{v2}), modula stišljivosti (M_s) i dinamičkog modula deformacije (E_{vd}). Posebna pažnja je posvećena ispitivanju sa dinamičkim CBR uređajem za dobijanje parametra (CBR_d) u laboratorijskim i terenskim uslovima.

3.1 Zbijanje materijala – opšti principi

Zbijanje materijala podrazumeva povećanje većeg udela čvrste faze u jedinici zapremine kroz izbacivanje vazduha prisutnog u šuplinama i porama i na taj način se povećava gustina tj. zapreminska masa tla. Procesom zbijanja se povećava i stepen zasićenja, pošto se odnos šupljina odnosno pora smanjuje usled izbacivanja vazduha. Glavni efekti zbijanja u inženjerskim svojstvima materijala su:

- povećanje otpornosti na smicanje i nosivost,
- smanjenje stišljivosti i mogućnosti skupljanja,
- smanjenje budućeg sleganja ugrađenog materijala i
- smanjenje vodopropustljivosti.

Ova sposobnost za poboljšanje mehaničkih svojstava materijala čini zbijanje jednim od najvažnijih a takođe najjeftinijih postupaka koji se mogu koristiti za izradu donjih slojeva saobraćajnica. Međutim, neodgovarajuće zbijanje može uticati na trajnost i stabilnost konstrukcije, dolazi do problema u vezi sa stabilnošću i sleganjem, a u najtežim slučajevima do njenog rušenja.

3.1.1 Proktorov opit

Prvi objavljeni standard za ispitivanje mehaničkog zbijanja tla bio je tzv. "California Impact Test." koji je razvijen 1929. god. od strane James Porter-a, u Kalifornijskoj upravi za puteve u Sakramentu. Međutim, od kada je R.R. Proctor razvio laboratorijsku metodu Proktorovog ispitivanja za određivanje odnosa vlažnosti i gustine materijala (Objavljivanjem četiri članka u časopisu "Engineering News-Record, Proctor 1933), većina specifikacija u praksi izgradnje puteva je zasnovana na ovom laboratorijskom ispitivanju (*Handi i Spangler, 2007*). Upotreba kriterijuma zapreminske mase za kontrolu kvaliteta pre i tokom izgradnje donjih slojeva saobraćajnica prvenstveno je posledica istorijske tradicije i pogodnosti, i zasniva se na pretpostavci da povećanje gustine materijala povećava čvrstoću istog (*Selig i dr., 1973*). Iako je ovo generalno tačno, odnos između čvrstoće i gustine materijala je složen i na njega utiče nekoliko faktora kao što su: struktura, vlažnost, razlike između laboratorijskih i terenskih metoda zbijanja, povećanje pornog pritiska tokom zbijanja, itd. (*Seed i Chan, 1959; Seed i dr., 1960; Handi i Spangler, 2007*).

U geotehničkim istraživanjima značaj laboratorijskih opita je veliki zato što nam daje poseban uvid u tlo koje se ispituje. Proktorov opit ima veliki značaj kod određivanja stepena zbijenosti. Opitom se simuliraju uslovi terenskog zbijanja, a rezultati se koriste kod kontrole terenske ugradnje. Uzorci se zbijaju određenom energijom i traži se vlažnost koja daje maksimalnu suhu gustinu tla odnosno suhu zapreminsku masu. Povećanje suve gustine utiče na promenu mehaničkih i fizičkih svojstava a zavisi od 3 bitna parametra:

- vlažnost tla,
- primenjena energija zbijanja i
- način zbijanja.

Cilj opita je naći vlažnost na kojoj se tlo uz istu energiju zbijanja najbolje zbija. Opit se izvodi u standardizovanom cilindru u kojem se tlo zbija udarcima standardizovanog malja. Za sitnozrna tla koristi se oko 4,7 puta manja energija zbijanja nego za krupnozrna tla. Tlo treba zbijati sa pet različitih vlažnosti, svaki uzorak zbijati istom energijom i meriti postignutu suhu gustinu tla.

Zbijanje prirodnog materijala predstavlja mehanički postupak povećanja suve gustine, tj. suve zapreminske mase, kojim se čestice pakuju bliže jedna drugoj uz smanjenje zapremine vazduha pri čemu se najčešće ne menja znatno zapremina vode u tlu.

Stanje zbijenosti se opisuje jediničnom težinom materijala u suvom stanju, koju možemo sračunati iz jednačine (3.1):

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + w} * 100 \quad (3.1)$$

gde su:

γ – zapreminska težina u „prirodnom“ stanju (kN/m³)

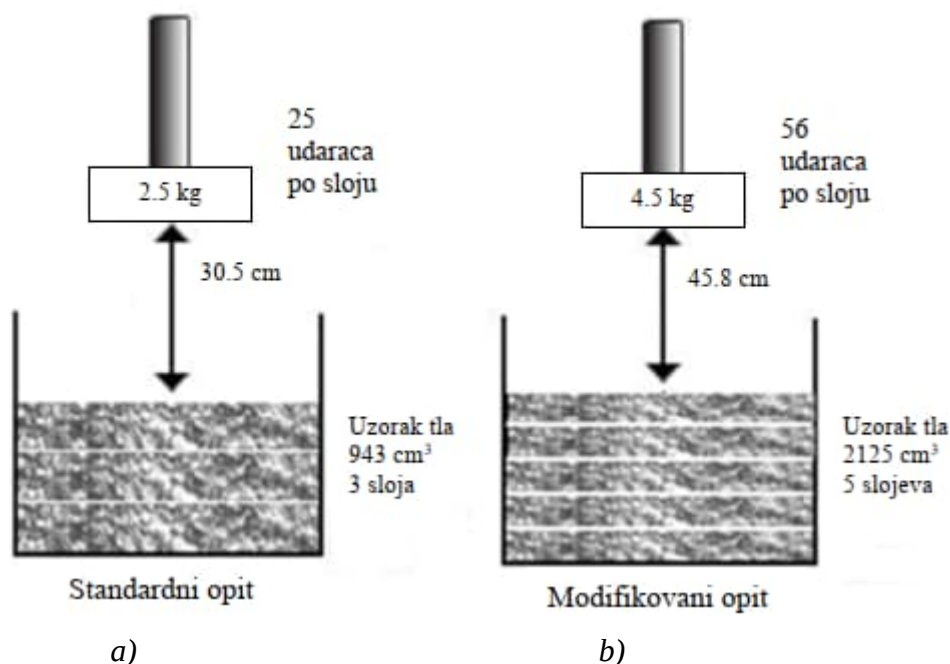
w - vlažnost (%)

Zapreminska težina materijala u suvom stanju (γ_d) dobijena zbijanjem zavisi od vlažnosti (w) i primenjene energije zbijanja (E). Određuje se Proktorovim opitom (standardni i modifikovan) kojim se određuje optimalna vlažnost, tj. vlažnost pri kojoj, kada se materijal zbija, dobijamo maksimalnu suhu zapreminsku težinu za datu energiju zbijanja (Slika 3.1). Ovako određivanje odnosa suve zapreminske težine i vlažnosti definisano je odgovarajućim standardima (SRPS U.B1. 038 – povučen, SRPS EN 13286-2).

Najčešći metod za procenu kvaliteta tla nakon zbijanja u laboratoriji je standardni Proktorov opit. Ovaj opit ima za cilj da odredi prihvatljivo stanje zbijenosti za tlo koje se koristi u izgradnji slojeva saobraćajnica i da inženjerima omogući praćenje stepena zbijenosti materijala tokom izgradnje. Standardni Proktorov opit se izvodi u Proktorovom aparatu koji se sastoji iz metalnog kalupa

unutrašnjeg prečnika 10 cm i visine 12 cm, nastavka kalupa istog prečnika (visine 5 cm) i metalnog nabijača prečnika 5 cm, visine pada (30.5 cm), težine 25 N u cilindričnoj vodiči nešto većeg prečnika, kako bi se omogućilo kretanje nabijača (Slika 3.1a). Kalup se svojim donjim krajem postavlja na metalnu ploču, gde ostaje dobro učvršćen tokom zbijanja.

Pre izvođenja opita, materijal se isušuje i seje kroz sito odgovarajućeg prečnika (neophodno je ispoštovati da odnos granulometrijskog sastava i dimenzija kalupa bude prema standardu). Nakon toga se meša sa određenom količinom vode dok se ne homogenizuje (ne sme je biti previše da ne bi materijal bio kašast, kao ni premalo jer to utiče na obradivost čestica). Potom se vrši zbijanje tri sloja po 25 udaraca, u kalupu zapremine 943 cm³. Ukoliko se koristi kalup veće zapremine (2 125 cm³), potrebna energija zbijanja se postiže sa 56 udaraca po sloju.



Slika 3.1. Standardni i modifikovan Proktorov opit (standard SRPS U.B1.038)

Zbijeni uzorak se izmeri, nakon čega se uzima manja količina za određivanje vlažnosti. Ovakav postupak se ponavlja onoliko puta koliko je potrebno, kako bi se nacrtao dijagram zavisnosti (Proktorova kriva) suve zapreminske težine (γ_d) i optimalne vlažnosti (w) tako da kriva ima jasno izraženu maksimalnu vrednost sa dovoljnim brojem tačaka sa obe strane maksimuma.

Kako bi se izbeglo korišćenje stepena zbijenosti većeg od 100%, razvijen je modifikovan Proktorov opit sa kojim se postiže veća energija zbijanja, oko $E=2\,700\text{ kJ/m}^3$. Za ovaj opit se koristi metalni kalup unutrašnjeg prečnika 15 cm i visine 12 cm, malj veće težine (45 N) i visine pada (45.8 cm) (Slika 3.1b). Za kalup manje zapremine (944 cm³) materijal se zbija sa 25 udaraca u pet slojeva, dok se za kalup veće zapremine (2 125 cm³) materijal zbija sa 56 udaraca u pet slojeva.

U disertaciji je određivanje odnosa suve zapreminske težine i vlažnosti sitnozrnih i krupnozrnih materijala vršeno u skladu sa odgovarajućim standardima (SRPS U.B1.038 - povučen, SRPS EN 13286-2).

3.1.2 Optimalno zbijanje sitnozrnih i krupnozrnih materijala

Tehnologija optimalnog zbijanja materijala prošla je dug razvoj do danas, počev od definisanja Proktorovih parametara (optimalne vlažnosti i maksimalne suve zapreminske težine), do razvoja sredstava za zbijanje i metoda za kontrolu postignute zbijenosti *in situ*. Tu se radi o kvalitetu zbijanja, o potrebnoj energiji i vremenu zbijanja, kao i o potrebnim geotehničkim parametrima materijala koji se zbija. Prekomerno zbijanje i ponovno rastresanje materijala treba izbegavati kao i

heterogeno, tj. neujednačeno zbijanje. Stoga se može reći da je cilj zapravo razvoj „inteligentne“ opreme za zbijanje koja će i sama automatski reagovati na lokalne promene svojstava materijala, menjanjem odgovarajućih mehaničkih parametara. Građevinska mehanizacija (valjci i kompaktori) opremljeni sistemima za automatsko regulisanje stepena zbijanja već se smatraju značajnim korakom u ovom pravcu jer podižu zbijanje na viši nivo uz pomoć složenog tehničkog procesa na osnovu odgovarajućeg naučnog podešavanja.

Optimalno zbijanje i kontrola tog postupka važna je za područje građenja donjih slojeva kolovoznih sistema. Ponekad se u građevinarstvu, tj. u području puteva, podcenjuje značenje zbijanja i povećanja gustine. Mnogi inženjeri smatraju zbijanje perifernim pitanjem ili pak misle da je u tom području sve jasno ("dovoljno je nekoliko prelaza valjkom i sloj je dovoljno zbijen" ili "u slučaju potrebe dovoljno je upotrebiti teži valjak"). Međutim, optimizacija zbijanja vezanih i nevezanih materijala i pouzdana kontrola tog procesa ipak nije tako jednostavna, i zavisi od brojnih međusobno povezanih faktora koji opet zavise od cilja i načina zbijanja, kao i od opreme koja se koristi za zbijanje.

Zbijanje je suštinska komponenta zemljanih radova, trebalo bi da bude sastavni deo kako pripreme temeljnog tla tako i izgradnje slojeva podloge kolovozne konstrukcije. Pravilno zbijanje slojeva podloge, obezbediće da se prirodno sleganje svede na najmanju moguću meru, što povećava njegovu stabilnost i životni vek. Nezbijeni nasuti materijali verovatno će biti skloni vertikalnom sleganju, što može dovesti do građevinskih ili ekoloških problema.

Parametri koji značajno utiču na površinsko zbijanje (u slojevima) posebno su važni za postizanje optimalne vrednosti zbijanja (tj. visokog inteziteta i ujednačenosti zbijanja). U Tabeli 3.1 prikazani su osnovni parametri koji u velikoj meri zavise jedni od drugih.

Tabela 3.1. Parametri koji utiču na površinsko zbijanje tokom izgradnje donjih slojeva saobraćajnica

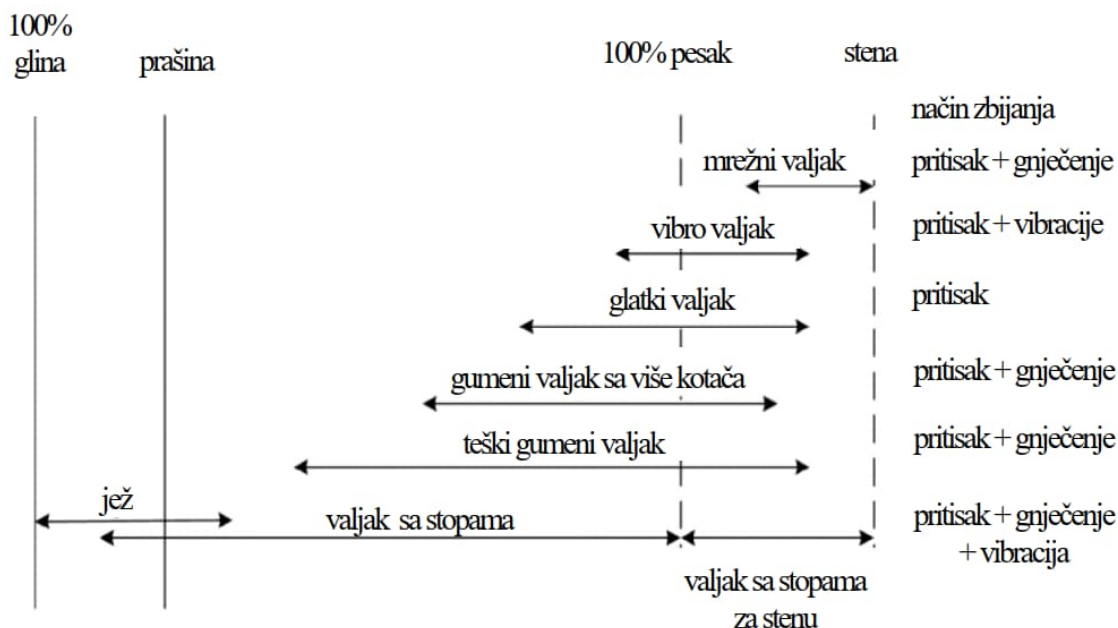
Osnovni parametri – površinsko zbijanje (u slojevima)	
Parametri materijala	vrsta tla, granulometrijski sastav, oblik zrna (ugao, oblik, tekstura površine), vlaga, granice konzistencije sitnozrnog tla, krutost zbijenog sloja, nasipna debljina sloja, krutost i parametri tla za donji sloj, kontaktne osobine između susednih slojeva rasutog materijala
Parametri valjka	smer sile koji nastaje usled dinamičkog kontakta, frekvencija pobude, amplituda bubnja valjka, pokretni ili nepokretni bubanj, prečnik bubnja, težina valjaka, odnos između ukupne težine i težine bubnja vibracionog valjka, geometrija i oblik bubnja (npr. cilindrični, poligonalni); stanje bubnja (cilindričnost bubnja, ležajevi, proklizavanje pneumatika), vučeni ili samohodni valjak
Parametri postupka 4.1.2.1.	broj prelaza valjka, brzina i smer valjka, nagib površine koja se sabija, oblik, nagib i glatkoća sloja koji se zbija i (moguće) postojanje lokalnih nepravilnosti

Mehanizacija, kojom se zbija materijal na terenu, zavisi od vrste materijala koji se zbija. To su razne vrste valjaka, vibrovaljaka, valjaka s gumenim kotačima i ježeva za široke površine. Građevinsku mehanizaciju za zbijanje treba prilagoditi vrsti materijala, kako je prikazano na Slici 3.2.

Ježevi i gumeni valjci koriste se za sitnozrna, slabo vodopropusne materijale. Za vodopropusne materijale kao što su peskovi i šljunkovi, koriste se gumeni valjci i vibrovaljci. Uski prostori za rad zbijaju se manjom građevinskom mehanizacijom, žabama, vibropločama ili ručnim nabijačima.

Na osnovu prethodno rečenog možemo zaključiti da je zbijanje složen postupak, kao i da u obzir trebamo uzeti veliki broj faktora ako želimo da dobijemo odgovarajuću zbijenu površinu. Pritom trebam naglasiti da je uz stepen zbijanja važna i ujednačenost zbijanja. Na osnovi iskustva i

dugotrajnog praćenja postupaka zbijanja, ustanovljeno je da nosivost, stupanj deformacije i vek trajanja saobraćajnice u velikoj meri zavise od stepena zbijenosti i homogenosti donjih slojeva (nasip, posteljica) višeslojnih kolovoznih konstrukcija.



Slika 3.2. Prilagođavanje mehanizacije za zbijanje vrsti materijala (Schroeder, 1975)

3.1.3 Faktori koji utiču na zbijanje

Faktori koji utiču na zbijanje pri izgradnji donjih slojeva saobraćajnica su: vrsta materijala koji se zbija, njegova vlažnost i primenjene mašine za zbijanje tj. primenjena energija zbijanja.

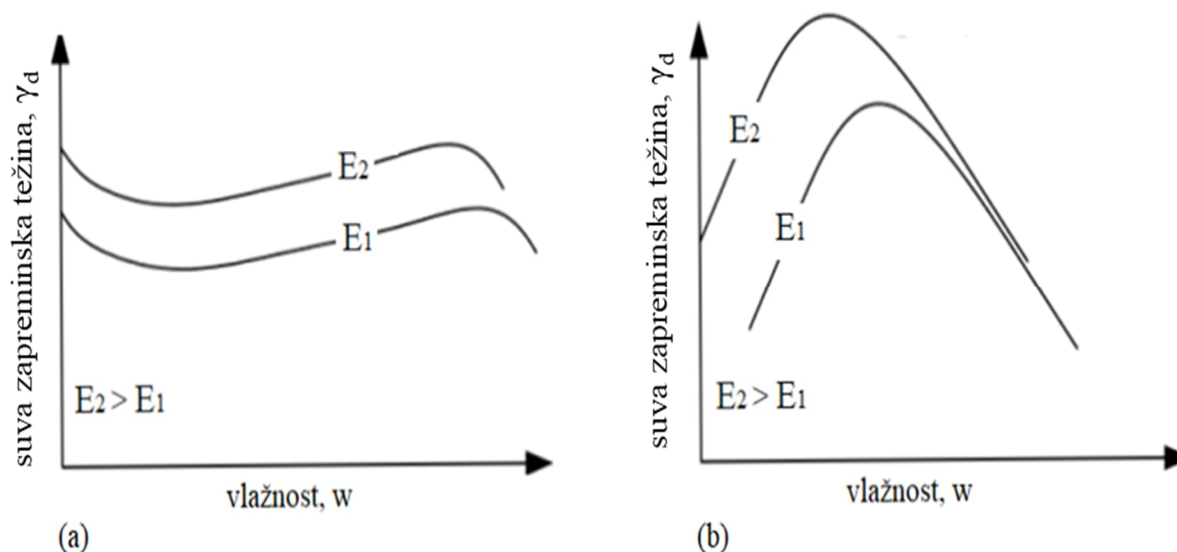
Krupnozrni materijali (nevezani) se najbolje zbijaju vibracijama pod čijim dejstvom manja zrna materijala upadaju u prostore između većih zrna. Vlažnost nema značajni uticaj na zbijanje ove vrste materijala za razliku od granulometrijskog sastava koji je od najvećeg uticaja. U tom smislu se za istu primenjenu energiju zbijanja bolje zbija dobro građirani od loše ili uniformno građiranog krupnozrnog materijala.

Kod sitnozrnog (vezanog, koherentnog) materijala od najvećeg uticaja na zbijanje je vlažnost materijala. Zato je pre izrade slojeva podloge kolovozne konstrukcije potrebno u laboratorijskim uslovima ispitati mogućnost zbijanja materijala pri različitim vlažnostima.

Sadržaj vlage ima značajan uticaj na efikasnost zbijanja. Materijal koji je previše suv nema dovoljno podmazivanja među česticama radi lakšeg pakovanja i postizanja maksimalne gustine, dok će materijal koji je previše vlažan biti sprečen da se gusto zbije, zbog povećanog prisustva vode u porom prostoru, ili će dovesti do „istiskivanja“ sitnih čestica tokom procesa zbijanja. Pre nego što započne proces zbijanja, slojeve treba proveriti da bi se osiguralo da je sadržaj vlage ujednačen. Kroz seriju laboratorijskih ispitivanja zbijanja, efekat sadržaja vlage na gustinu je uočljiv, kao i uticaj optimalnog sadržaja vlage (w_{opt}) pri kojem će materijal postići maksimalnu suhu zapreminsku težinu (γ_{dmax}) za datu energiju zbijanja.

Uticaj početne vlage na postignutu suhu zapreminsku težinu pri zbijanju obično se prikazuje krivama zbijanja koje prikazuju odnos suve zapreminske težine i vlage u materijalu pri istoj energiji zbijanja (Slika 3.3). Krive zbijanja razlikuju se između krupnozrnih i sitnozrnatih materijala. Krupnozrni materijali, za razliku od sitnozrnatih, veoma se slabo zbijaju korišćenjem statičkog opterećenja. Zbijanje se može postići samo pomeranjem kontakata između zrna. Ovo kretanje ometaju menisci na granici vode i vazduha u porama koje naprežu susedne čestice materijala. Stoga

će najveći efekat zbijanja pokazati ili skoro suva struktura zrna ili struktura zrna koja je skoro zasićena vodom. Ovo se može videti na Slici 3.3a.



Slika 3.3. Krive zbijanja, uticaj vlažnosti na postignutu zbijenost, izraženu kroz suhu zapreminsku težinu materijala, pri različitoj energiji zbijanja E . Razlika između tipičnih kriva: a) nevezani - krupnozrni materijali; b) vezani - sitnozrni materijali (Schroeder, 1975)

Za razliku od krupnozrnog materijala, sitnozrni materijal skoro uvek ima izraženu maksimalnu zbijenost pri jednoj vlažnosti (Slika 3.3b). Ova vlažnost se naziva optimalna. Zbog veoma malih dimenzija čestica, sile zatezanja u menisku kapilarne vode pri niskim zasićenjima pora su veoma velike, pa su uobičajene energije zbijanja nedovoljne da se čestice pomere i zauzmu gušću strukturu. To je razlog zašto se sitnozrni materijali male vlažnosti ne mogu dobro sabiti konvencionalnim sredstvima.

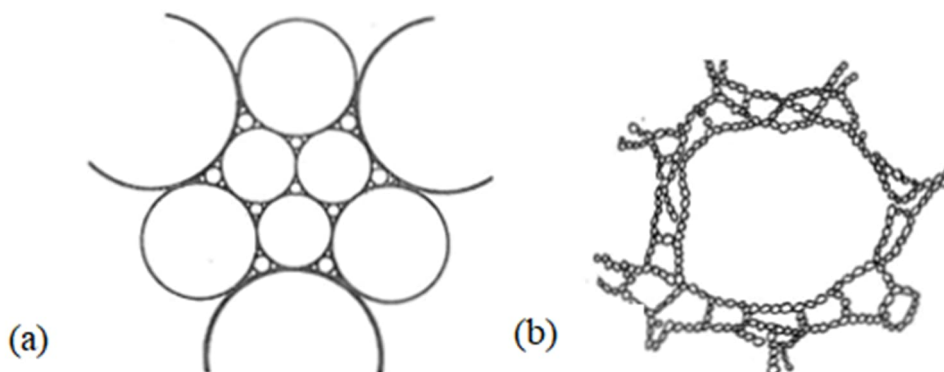
Iz gore navedenog očigledno je da zbijanje zavisi od primenjene energije zbijanja, da sitnozrni materijali imaju jasnu maksimalnu zbijenost pri optimalnoj vlažnosti i datoj energiji zbijanja i da ova maksimalna zbijenost kao i optimalna vlažnost zavise od energije zbijanja tako da nisu konstante materijala. Što je veća energija zbijanja, maksimalna suva zapreminska težina će biti veća, a optimalna vlažnost manja.

3.2 Zbijanje tla kao građevinskog materijala

Ponašanje svake saobraćajnice prvenstveno zavisi od inženjerskih karakteristika kolovozne konstrukcije kao i slojeva podloge izgrađenih od različitih vrsta tla kao građevinskih materijala. Pravilno zbijanje materijala u slojevima ima za cilj da obezbedi da će zbijeni slojevi pouzdano i bezbedno izdržati buduća opterećenja.

Brojni istraživači su utvrdili da je zbijanje odlučujući faktor prilikom izgradnje donjih slojeva saobraćajnica (Proctor, R. R., 1933; Holtz, R. D. i Kovacs, W. D., 1981; Briaud, J. L. i Seo J., 2003; Petersen, D.L., 2005). Među glavnim uzrocima oštećenja puteva je neadekvatno zbijanje tokom izgradnje. Zbog toga postoji potreba da se u skladu sa odgovarajućim standardima kontroliše zbijenost i nosivost temeljnih kolovoznih slojeva ako se želi postići projektovani vek trajanja saobraćajnice čime se eliminišu veliki troškovi održavanja.

Kao što je poznato, tlo se sastoji od čvrstih čestica i pora ispunjenih vodom, vazduhom i vodenom parom, najčešće delimično vazduhom, delimično vodom. Prema rasporedu čvrstih čestica u tlu definisana je njegova struktura. Strukture nevezanog i vezanog tla se bitno razlikuju među sobom, Slika 3.4.



Slika 3.4. Struktura tla : a) Nevezani materijal različite krupnoće zrna;
b) Vezani – koherentni materijal (pahuljičasta struktura)

Primarni cilj zbijanja je smanjenje zapremine vazduha uz korišćenje spoljašnjih opterećenja što uslovljava promenu strukture materijala, kako bi se poboljšala njegova čvrstoća. Ovo smanjenje zapremine vazduha dovodi do odgovarajućeg povećanja zapreminske mase ili gustine. Na ovaj način se postiže dobra nosivost temelja kolovoza i smanjuje dugotrajna deformacija.

Korišćenje tla kao građevinskog materijala za izradu donjih slojeva saobraćajnica kako nevezanog tako i vezanog (koherentni) podrazumeva: iskop, transport i ugradnju.

Kod nevezanih materijala zrna se pakuju bliže jedno drugom što dovodi do smanjenja odnosa šupljina, uglavnom smanjenjem zapremine vazduha, dok se zapremina vode ne menja ili su promene zanemarljive. Generalno se proces opisuje kao brz, ponekad čak i iznenađni, čime se u materijalu izazivaju značajne strukturne promene koje dovode do novog načina pakovanja čestica (Slika 3.4a).

Uopšteno, karakteristike tla kao građevinskog materijala, posebno čvrstoća na smicanje, deformabilnost i propusnost zavise od njegovog odnosa šupljina u odnosu na ukupnu zapreminu. Dakle, što je manji odnos šupljina prema ukupnoj zapremini tj. veća zbijenost, to je veća njegova čvrstoća na smicanje, a manja deformabilnost i propustljivost. Zbog toga je smanjenjem šupljina tla zbijanjem tj. smanjenjem koeficijenta poroznosti, moguće poboljšati njegove karakteristike za buduća opterećenja. Zbijanje je, prema tome ključni element u izgradnji planuma temeljnog tla kao i slojeva podloge kolovozne konstrukcije.

Posebnu pažnju treba posvetiti vezanim glinovito-prašinsatim materijalima (*Guedes de Melo, 1985*). Kod vezanih materijala proces zbijanja ne zavisi samo od veličine i oblika čvrstih čestica, njihove strukture, već i od kohezije koja vlada u ovim materijalima (Slika 3.4b). Usled kohezije, čvrste čestice su slepljene među sobom i istiskivanje vode iz pora pri zbijanju je mnogo teže nego kod nevezanog materijala, čije čvrste čestice nisu slepljene i lako se pomeraju pri opterećenju. Pri zbijanju vezanih materijala, količina vode ima veliki značaj. Pri samom procesu zbijanja dolazi do istiskivanja vode iz njihovih pora i smanjenja debljine vodenog filma što utiče na smanjenje poroznosti, odnosno povećanje suve zapreminske mase materijala.

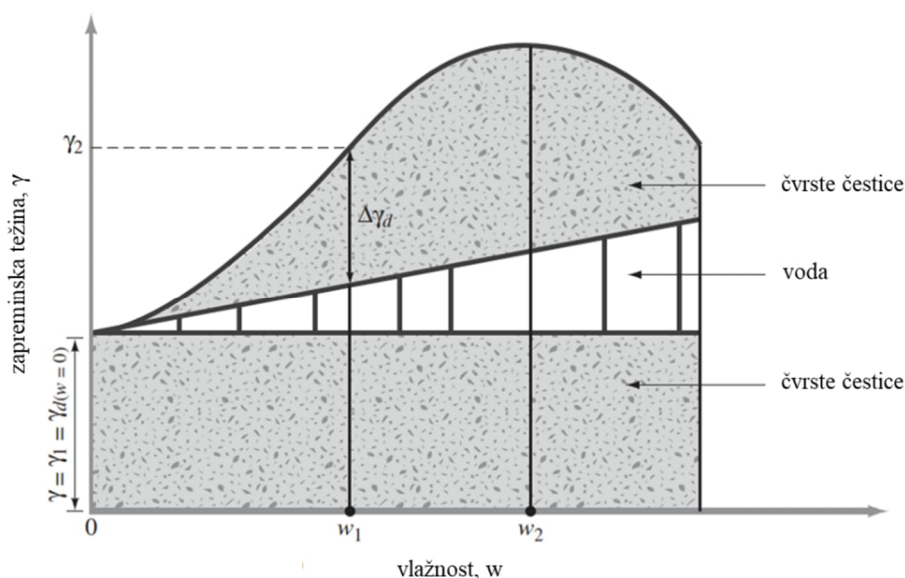
Zbog slabe vodopropusnosti zbijanje sitnozrnih materijala predstavlja znatno veći problem od zbijanja krupnozrnog materijala. Slaba vodopropusnost znatno otežava istiskivanje vode iz pora tla bez obzira na uloženu energiju zbijanja. Zbog toga će vlažnost takvih materijala imati presudnu ulogu na mogućnost njihovog zbijanja. Iz takvog razmišljanja bi proizilazilo da smanjenje vlage u vezanim materijalima može samo pogodovati mogućnosti njegovog zbijanja. Međutim, pokazalo se da smanjivanje vlažnosti ispod neke granice, uz konstantnu energiju zbijanja, zbijanje otežava. To znači da za datu energiju koja se utroši na zbijanje, postoji neka optimalna vlažnost pri kojoj se postiže najveći mogući učinak zbijanja.

Postojanje optimalne vlažnosti prvi je eksperimentalno utvrdio Proctor (1933). Holtz i Kovacs (1981) i Venkatramaiah (2006) su potvrdili da je Proctor tridesetih godina prošlog veka razvio osnove zbijanja, kroz svoje istraživačke radove, definišući da je zbijanje funkcija četiri promenjive, i to: suve zapreminske težine, sadržaja vode, pritiska pri zbijanju i vrste tla.

Odnos između suve zapreminske težine (γ_d) i vlažnosti (w) tokom procesa zbijanja prikazan je na Slici 3.5. Kako se sadržaj vode povećava tokom zbijanja, oko čestica se formira sve veći i veći vodeni film. Voda deluje kao mazivo i čini da se čestice lako kreću. Na kraju, čestice se preorijentišu u novo stanje (gušća struktura). U procesu se dobija određeni sadržaj vode iznad kojeg se suva zapreminska težina više ne povećava. Ovaj određeni sadržaj vode je „optimalna vlažnost“, a odgovarajuća suva zapreminska težina je „maksimalna suva zapreminska težina“. Povećanje sadržaja vode iznad optimalne tačke dovodi do smanjenja suve zapreminske težine jer voda počinje da zamenjuje čestice tla. Ovde imamo suvi i vlažni deo krive u odnosu na optimum. Ovaj prvi deo krive podrazumeva formiranje flokulaste strukture tla dok deo krive nakon maksimalne suve zapreminske težine podrazumeva dispergovanu strukturu.

Valjanje i gnječenje su efikasne metode zbijanja u kohezivnim materijalima. Na pritisak zbijanja utiče tip valjaka tj. „bubnja“ (na primer, bubnjevi od „ovčije noge“ su efikasniji od glatkih bubnjeva za kohezivna tla), težina valjka i broj prolaza. U nekohezivnim materijalima, dinamičko zbijanje je veoma efikasno. Ova vrsta zbijanja se primenjuje kombinovanim dejstvom vibrirajućeg ili oscilirajućeg valjkastog bubnja i težine mašine. Faktori koji utiču na pritisak zbijanja, u ovom slučaju, su amplituda vibracija (pomeranje bubnja valjka), frekvencija i brzina kretanja valjka.

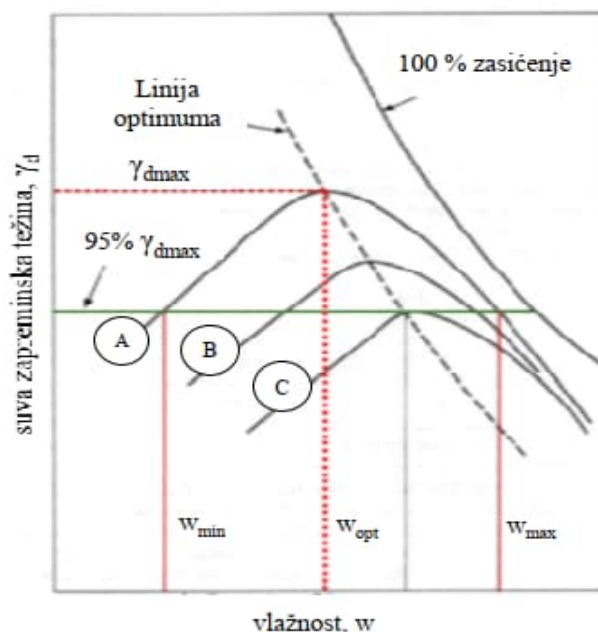
Još jedan važan faktor prilikom terenskog zbijanja je izbor „debljine nasutog sloja“. Debljina nasutog sloja se odnosi na visinu sloja materijala, preko prethodno zbijenog sloja. To utiče kako na karakteristike mašine tako i cenu zbijanja. Izbor debljine sloja zavisi od vrste materijala, metode i primenjene energije zbijanja. Tehničkim uslovima za građenje puteva se obično propisuju debljine slojeva za zbijanje.



Slika 3.5. Princip zbijanja - suva zapreminska težina i vlažnosti tla (Braja M. Das, 2015)

Maksimalna suva zapreminska težina i optimalna vlaga različitih tipova materijala određuju se primenom standardizovanog postupaka ispitivanja. Za specifikaciju zbijanja donjih slojeva saobraćajnica zasnovanu na određenim karakteristikama (visina ispitivanog sloja u odnosu na kotu planuma posteljice, vrsta korišćenog materijala) uzima se u obzir određeni stepen zbijenosti (R_c) na osnovu rezultata laboratorijskih ispitivanja.

Na primer, izvođač mora na terenu da postigne suvu zapreminsku težinu od 95% od maksimalne suve zapreminske težine utvrđene u laboratoriji, bilo standardnim ili modifikovanim Proktorovim opitom, Slika 3.6. Krive zbijanja A, B i C su za isti materijal sa različitim energijama zbijanja. Kriva A predstavlja uslove maksimalne energije zbijanja koji se može dobiti od postojeće opreme, a koji je potreban za postizanje minimalne suve zapreminske težine ($\gamma_{dmin} = 0,95 \cdot \gamma_{dmax}$).



Slika 3.6. Odnos suve zapremine težine (γ_d) i vlažnosti (w) tla, ilustrujući najefikasnije uslove zbijanja „in situ“ (Seed, 1964)

Na Slici 3.6. horizontalnom linijom je predstavljen procenat od maksimalne zbijenosti ($0,95 \cdot \gamma_{dmax}$), sa dijagrama se može očitati interval prihvatljive vlažnosti, pri čemu je jedna granica (w_{min}) „suvlja od optimuma“ a druga (w_{max}) „vlažnija od optimuma“.

Koncept opisan u prethodnom pasusu, zajedno sa Slikom 3.6, tradicionalno se pripisuje Seed (1964), koji je bio istaknuta ličnost u savremenom geotehničkom inženjerstvu. Ideju su detaljnije razradili Holtz i Kovacs (1981).

Kada se tlo kao materijal koristi u građevinske svrhe, pri izradi slojeva podloge kolovozne konstrukcije, ono je izrazito slojevito da bi se formirao konačni oblik. Pri građenju donjih slojeva saobraćajnica materijal se razastire u slojevima debljine od 10 do 50 cm, a zatim zbija valjanjem i vibriranjem. To podrazumeva da se prethodno svaki sloj sabije pre nego što se prekrije sledećim slojem. Nakon pravilnog postavljanja i zbijanja, rezultujući ugrađen materijal ima zbijenost i nosivost koje su dobre ili bolje od mnogih prirodnih formacija tla. Da bi se procenili parametri zbijenosti i nosivosti, uobičajeno je da se vrši kontrola korišćenjem terenskih ispitivanja. Obično se svaki zbijeni sloj proverava na nasumične mikrolokacije.

Postavljanje sledećeg sloja počinje tek nakon što ispitivanja pokažu zadovoljavajuće vrednosti zbijenosti i nosivosti. Prema tome, ispitivanja *in situ* treba dobro razumeti i pažljivo proceniti kako bi se obezbedila ispravna konstrukcija.

3.3 Kontrola zbijanja

Kontrola zbijanja se tradicionalno sprovodi nakon zbijanja određenog sloja materijala u određenom broju slučajno odabranih tačaka. Međutim, danas se sve veća važnost pridaje kontinuiranoj kontroli zbijanja gde je kontrolni uređaj sastavni deo opreme za zbijanje. Ovaj vid kontrole još nije u potpunosti razvijen. Iz tog razloga dobra kontrola zbijanja se postiže jedino kombinovanjem više metoda.

Dakle, gustina materijala je jedan od direktnih parametara koji omogućavaju kontrolu kvaliteta donjih slojeva saobraćajnica. Iako gustina materijala nije najpoželjnije inženjersko svojstvo, tradicionalno se koristi za procenu, merenje i kontrolu zbijenosti materijala. Ova praksa je usvojena pre mnogo godina jer se gustina materijala može lako odrediti merenjem mase i zapremine.

U Srbiji, za kontrolu zbijenosti ugrađenih materijala u donje slojeve saobraćajnica razvijeni su različiti terenski uređaji od kojih su najpoznatiji uređaj s konusom (uz pomoć kalibrisanog peska),

uređaj s balonom i uređaj sa tankozidnim cilindrom za merenje zapreminske težine ugrađenog materijala, probne ploče za neposredno merenje postignute nosivosti materijala i neki drugi.

Merenje gustine zbijenog materijala omogućava određivanje stepena zbijenosti koji predstavlja osnovni parametar kontrole zbijanja. Kao prvo, optimalna vlažnost (w_{opt}) i maksimalna suva zapreminska težina (γ_{dmax}) se određuju u laboratoriji pomoću standardnog ili modifikovanog Proktorovog opita. Zatim se definišu zahtevane vrednosti za suvu zapreminsku težinu (γ_d) na terenu.

Stepen zbijenosti ugrađenog materijala (R_c) u donjim slojevima saobraćajnica se definiše jednačinom (3.2)

$$R_c (\%) = \frac{\gamma_d}{\gamma_{dmax}} * 100 \quad (3.2)$$

gde je γ_d suva zapreminska težina zbijenog tla, a γ_{dmax} najveća suva zapreminska težina određena standardnim ili modifikovanim Proktorovim opitom.

U primeni treba naglasiti na koji se od ta dva ispitivanja odnosi stepen zbijenosti. Tako se može, na primer, tražiti da tlo u izvedenom nasipu mora imati stepen zbijenosti u odnosu na modifikovani Proctorov opit od najmanje 98 %. To znači da suva zapreminska težina tla ugrađenog u nasip mora biti barem $0,98 * \gamma_{dmax}$. Stepen zbijenosti (R_c) se propisuje za sitnozrna, krupnozrna i mešana tla. Razlika je u postupcima pomoću kojih se dobija podatak o suvoj zapreminskoj težini (γ_d).

Iako navedeni parametri kontrole zbijanja omogućavaju da se utvrdi da li je postignuto adekvatno zbijanje, to ne omogućava kontrolu svih karakterističnih vrednosti koji se obično razmatraju u fazi projektovanja. Zbog toga je neophodno da se odredi modul deformacije ($E_{v1}-E_{v2}$), koji je važan parametar kontrole nosivosti tokom izgradnje donjih slojeva saobraćajnica. Takođe se razlikuju i zahtevi R_c i E_{v2} za pojedine grupe tla koja se ugrađuju (Tabela 3.2).

Prema domaćoj tehničkoj regulativi, moduli nosivosti određuju se u geomehničkoj praksi na osnovu rezultata dve metode opita opterećenja krutom kružnom pločom, metodom prema standardu SRPS U.B1.046/1968 (tzv. švajcarski opit pločom, modul M_s) i metodom prema SRPS U.B1.047/1997 (tzv. Nemački opit pločom, moduli $E_{v1}-E_{v2}$). Za obe metode potreban je masivan kontrateret za opterećivanje ploče do kraja konsolidacionog sleganja tla pa se dobijeni moduli mogu nazvati statičkim modulima deformacije tla za datu metodu. Poslednjih godina u domaćoj praksi sve se više primenjuje, standardizovani u skladu sa standardom ASTM E2835/21, opit opterećenja krutom kružnom pločom sa slobodno padajućim tegom, pod čijim se udarom 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 više evropskih zemalja i širi se u internacionalnoj geomehničkoj praksi, uz sve češće teorijsko-eksperimentalne analize i korelacije dinamičkog modula sa statičkim u domaćoj stručnoj javnosti.

Sve veći zahtevi za boljom, jeftinijom i bržom kontrolom zbijanja doveli su do poboljšanja tehnologije. U tom kontekstu, nedavno je razvijena oprema za procenu mehaničkih svojstava materijala u laboratoriji i *in situ*, kojom se određuje dinamički kalifornijski indeks nosivosti (CBR_d). Uređaj omogućuje jednostavno ipitivanje na osnovu penetracije standardnog klipa koje se može sprovesti nezavisno i u kombinaciji sa konvencionalnim ispitivanjima, čime se značajno može poboljšati kvalitet izgradnje podloge kolovozne konstrukcije.

3.3.1 Kriterijumi zbijenosti i nosivosti donjih slojeva saobraćajnica

Projektom kroz tehničke specifikacije treba predvideti uslove koje moraju zadovoljiti predviđeni slojevi podloge kolovozne konstrukcije kao i način kako će se ti uslovi proveravati. Izbor tih uslova obično predstavlja usaglašenost između cene i kvaliteta. Što je veća tražena zbijenost i nosivost ugrađenih materijala, skuplji će biti terenski radovi na zbijanju.

Kriterijumi tražene zbijenosti i nosivosti obično se izražavaju preko stepena zbijenosti, deformacijskog modula i prihvatljivog raspona vlažnosti, npr. $R_c=98\%$, $E_{v2}=60 \text{ MN/m}^2$, $w=w_{opt}$

$\pm 2\%$. Pri tome treba naznačiti vrstu i standard opita za parametar nosivosti kao i za određivanje maksimalne suve zapremniske težine (γ_{dmax}) u laboratoriji, na koju se odnosi parametar zbijenosti.

Tabela 3.2. Zahtevane vrednosti za zbijenost i nosivost – temeljno tlo, nasip, zasip i posteljica (Tehnički uslovi građenja puteva u Republici Srbiji, 2-2 Zemljani radovi, 2012 god.)

Opis radova, Slojevi (Temeljno tlo, Nasip, Zasip i Posteljica)		Zahtevana zbijenost s obzirom na gustinu materijala		Zahtevana nosivost				
		po SPP Rc (%)	po MPP Rc (%)	E _{v2} MN/m ²	E _{v2} /E _{v1}	E _{vd} MN/m ²		
Slojevi preko 2 m debljine ispod planuma posteljice	koherentni zemljani materijal	95	-	-	-	-		
	poboljšani koherentni materijal	95	-	-	-	-		
	očvršćivan i stabilizovan materijal i leteći pepeo	95	-	-	-	-		
	nekoherentni materijal	-	95	-	-	-		
Slojevi manje od 2 m debljine ispod planuma posteljice	koherentni zemljani materijal	98	-	15	E _{v2} /E _{v1} ≤ 2.2, ako E _{v1} ≥ od 50% E _{v2} , E _{v2} /E _{v1} nije odlučujući za ocenu nosivosti	E _{vd} ≥ od 50% E _{v2}		
	poboljšani koherentni materijal	98	-	20				
	očvršćivan i stabilizovan materijal i leteći pepeo	98	-	30				
	nekoherentni materijal	-	98	60				
Slojevi na planumu posteljice	koherentni zemljani materijal	100	-	20				
	poboljšani koherentni materijal	100	-	25				
	očvršćivan i stabilizovan materijal i leteći pepeo	100	-	40				
	nekoherentni materijal	-	100	80				
SPP - standardni postupak po Proktoru MPP - modifikovani postupak po Proktoru		Rc stepen zbijenosti		E _{v1} -E _{v2} moduli deformacije E _{vd} din. modul deformacije				

U Tabeli 3.2. zbirno su prikazani zahtevi u vezi sa kontrolom zbijanja slojeva zemljanog trupa (temeljno tlo, nasip, zasip, posteljica) kolovozne konstrukcije u Srbiji, u skladu sa SRCS – Tehnički uslovi građenja puteva u Republici Srbiji, 2.2 Zemljani radovi (2012).

Zahtevi za zbijenost i nosivost se razlikuju u pogledu debljine ispitivanog sloja u odnosu na kotu planuma posteljice, dok se zahtevi za nosivost razlikuju i od vrste korišćenog materijala. Ovi kriterijumi omogućavaju kontrolu zbijanja preko stepena zbijenosti obzirom na maksimalnu zbijenost po standardnom ili modifikovanom Proktorovom opitu ili prema postignutoj nosivosti izraženoj preko modula deformacije dobijenim iz ispitivanja kružnom pločom.

Treba napomenuti da se pojedini standardi za određivanje parametara takođe razlikuju. Ipak, određivanje stepena zbijenosti (Rc) je jednostavno, dok određivanje modula deformacija (E_v) prema različitim standardima daje razlike kako u postupku tako i u interpretaciji rezultata ispitivanja.

Tokom izgradnje donjih slojeva saobraćajnica nije praktično izvoditi obimna kontrolna ispitivanja traženih mehaničkih svojstava materijala, s obzirom da se pretpostavlja da će ugrađeni materijal imati ona svojstva ako se ugradi pri zbijenosti i vlažnosti pri kojoj su tokom prethodnih ispitivanja ona utvrđena. Iz tog je razloga nužno da se slojevi podloge izvode tako da nosivost, zbijenost i vlažnost strogo odgovaraju zahtevanim vrednostima.

3.3.2 Određivanje suve zapreminske težine i vlažnosti (γ_d , w)

Konvencionalni pristup koji se koristi za kontrolu kvaliteta zbijanja donjih slojeva saobraćajnica je merenje zapreminske težine i vlažnosti u zbijenom materijalu na nasumičnim lokacijama u celoj zbijenoj površini sloja.

U okviru disertacije, za dobijanje gore navedenih parametara korišćen je uređaj sa konusom (uz pomoć kalibrisanog peska), i uređaj sa tankozidnim cilindrom poznate zapremine, Slika 3.7.



Slika 3.7. Određivanje zapreminske mase na terenu – lokacija objekta Autoput E-80: Niš (Merošina) - Pločnik (Beloljin) a) uređaj sa konusom; b) uređaj sa tankozidnim cilindrom;

Kontrola pomoću kalibrisanog peska podrazumeva iskop manje rupe u zbijenom sloju čija se zapremina ispuni suvim peskom poznate zapreminske težine. Iz poznate mase peska koji je ušao u rupu i konusnog dela uređaja na vrhu rupe odredi se zapremina rupe. Pomoću tako izmerene zapremine i mase iskopanog materijala odredi se njegova zapreminska težina, a pomoću izmerene vlažnosti iskopanog materijala i tražena suva zapreminska težina. Detalji izvođenja opita opisani su u standardu SRPS U.B1.015.

U postupku s tankozidnim cilindrom poznate zapremine, čelični cilindar se nabije u zbijeni materijal. Cilindrom se utisne uzorak materijala koji se daje na ispitivanje zapreminske težine i vlažnosti u laboratoriju. Opisani postupak ispitivanja je definisan standardima SRPS U.B1.013 – povučen i SRPS EN 17892-2.

3.3.3 Određivanje Kalifornijskog indeksa nosivosti (CBR)

Kaliforniji indeks nosivosti (CBR) je test penetracije (prodiranja) klipa standardne površine u uzorak tla za procenu mehaničke čvrstoće. Razvio ga je Kalifornijsko odeljenje za autoputeve oko 1930. godine, a potom su ga usvojile brojne države, američke savezne agencije i na međunarodnom nivou.

Kalifornijski indeks nosivosti (CBR) je parametar koji se obično koristi kao indikator čvrstoće tla, podloge i materijala donjih slojeva saobraćajnica. Ispitivanje je opisano u standardima SRPS U.B1.042 i SRPS EN 13286-47.

CBR se već više od sedamdeset godina koristi za ispitivanje tla i zrnastih materijala u laboratorijama. Ova metoda se i dalje koristi kao osnovni metod projektovanja kolovoza u mnogim zemljama ili čak kao preporučena metoda za karakterizaciju podloga (Brown, 1996).

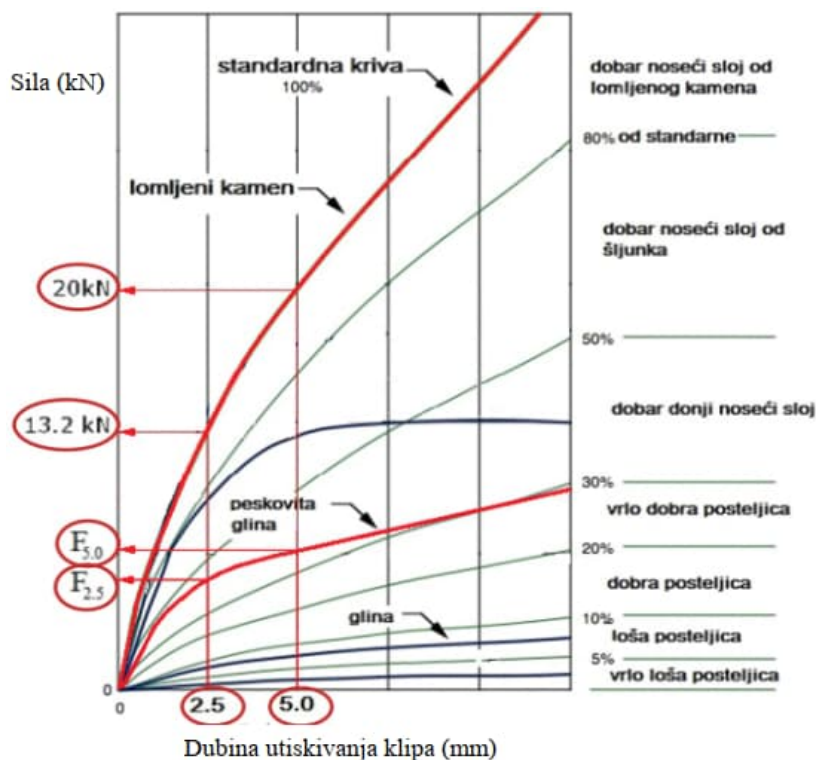
CBR vrednosti su usko povezane sa karakteristikama zbijanja, pa se CBR ispitivanje može koristiti kao metoda procene zemljanih radova. Treba napomenuti da vrednosti CBR-a u projektovanju saobraćajnica ne odražavaju smičuća naprezanja koja nastaju usled ponavljajućeg saobraćajnog opterećenja. Smičuće naprezanje zavisi od mnogih faktora, nijedan od njih nije potpuno kontrolisan ili modelovan u CBR ispitivanju.



Slika 3.8. Statičko (klasično) CBR ispitivanje

CBR vrednost se određuje na uzorcima koji su zasićeni vodom. Da bi se epruvete zasatile vodom vrši se priprema uzoraka u skladu sa SRPS U.B1.038 i SRPS EN 13286-2. Uređaj za opterećenje kapaciteta 50 kN kojim se nanosi sila penetracije od $1,27 \pm 0,20$ mm/min preko cilindričnog klipa za prodiranje prečnika 50 mm čiji donji kraj od ojačanog čelika prikazan je na Slici 3.8.

Kalifornijski indeks nosivosti (CBR) služi za ocenu kvaliteta materijala i ima karakter čvrstoće pri utiskivanju standardnog klipa. Njegova vrednost se dobija iz procentualnog odnosa sile – ispitivanog uzorka koje odgovaraju penetraciji od 2,5 mm i 5,0 mm i referentnih sila – standardnog materijala pri ovim penetracijama tj. 13,2 kN odnosno 20 kN, Slika 3.9. Standardni materijal za ovo ispitivanje je drobljeni kalifornijski krečnjak koji ima vrednost CBR=100%.



Slika 3.9. Prikaz rezultata CBR vrednosti (S.Maraš-Dragojević, 2022)

Kada se sa dobijenih kriva očitaju vrednosti sile $F_{2.5}$ i $F_{5.0}$ (za dubine utiskivanja 2,5mm i 5,0mm) izračunaju se vrednosti kalifornijskog indeksa nosivosti (CBR) prema jednačinama (3.3) i (3.4):

$$CBR_1 = \frac{F_{2.5}}{13,2} * 100 \text{ [%]} \quad (3.3)$$

$$CBR_2 = \frac{F_{5.0}}{20,0} * 100 \text{ [%]} \quad (3.4)$$

CBR ispitivanje je osetljivo na teksturu tla, sadržaj vode i zbijenu zapreminsku težinu. Stoga, CBR indirektno procenjuje čvrstoću na smicanje materijala koji se ispituje (Rodriguez i dr., 1988).

3.3.4 Određivanje modula deformacije (E_{v1} - E_{v2})

Kao osnova za projektovanje saobraćajnih površina koriste se moduli statičke deformacije E_{v1} i E_{v2} . Oni su utvrđeni, univerzalno priznati parametri nosivosti. Modul E_{v2} je dva do tri puta veći od modula E_{v1} (Forssblad, 1980).

Ispitivanje statičkom kružnom pločom (SPLT) je koristan opit već dugi niz godina u mnogim evropskim zemljama i koristi se za ispitivanje slojeva podloge i kolovozne konstrukcije. Trenutno se koristi i za krute i za fleksibilne kolovoze za određivanje modula deformacije (E_{v1} - E_{v2}) u skladu sa SRPS U.B1.047 i DIN 18134.

Modul deformacije E_v predstavlja indirektan parametar stanja zbijenosti tla i njegove nosivosti. Određuje se korišćenjem statičke kružne ploče, pri čemu se planum (gornja krajnja površina podloge) podvrgava ispitnom opterećenju. Kao protivteg koristi se teška mehanizacija (Slika. 3.10).

U ispitivanju se meri veza između opterećenja i sleganja ploče za dva uzastopna opterećenja i izračunava se modul deformacije E_{v1} (početno opterećenje) i E_{v2} (ponovno opterećenje) nakon prethodnog ciklusa rasterećenja. Vrednost E_{v2} i odnos vrednosti E_{v2}/E_{v1} su odlučujući za procenu

zbijenosti. Što je veća potrebna nosivost na površini podloge, to mora biti niža vrednost njihovog odnosa.

U ispitivanju statičkog pritiska podloga se statički opterećuje *in situ* preko kružne opterećene ploče za koju se pretpostavlja da je kruta i mere se deformacije. Prilikom određivanja modula deformacije u zemljanim radovima tj. izgradnji donjih slojeva saobraćajnica, ispitivanje se obično izvodi sa prečnikom ploče od 30 cm i opterećenje se postepeno povećava sve dok ne dođe do sleganja od oko 5 mm ili postignutog normalnog opterećenja od oko 0,5 MN/m². U ispitivanju statičkom kružnom pločom, efekat dejstva je oko 1,5 do 2 puta prečnika ploče (Vehner, Siedek, Schulze, 1977; Floss, 1997). Kada se koristi ploča od 30 cm, ovo odgovara dubini od 45 do 60 cm.



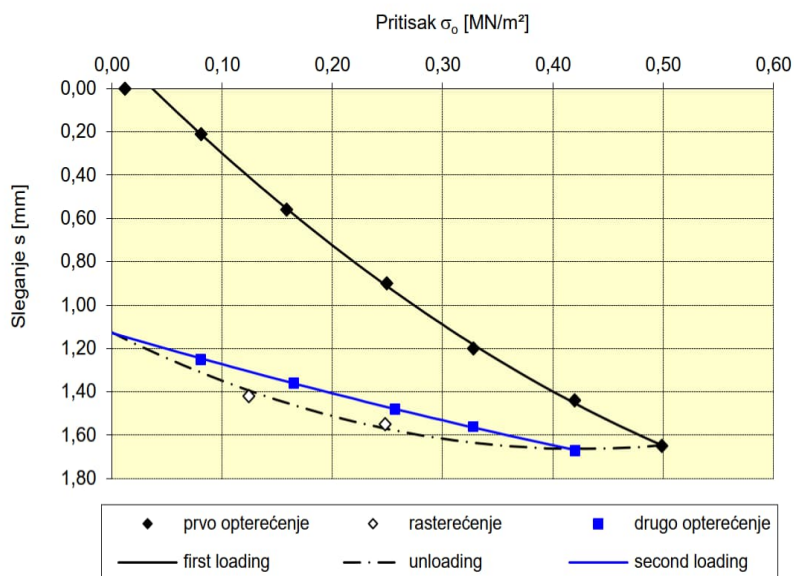
Slika 3.10. Merenje modula deformacije $-(E_{v1}-E_{v2})$, sloj nasipa na lokaciji objekta Intermodalni terminal "Batajnica" u Beogradu

Rezultati merenja koji su prikazani u ovoj disertaciji odnose se na prethodno pripremljene ravne površine donjih slojeva saobraćajnica. Opremu za ispitivanje činile su sledeće ključne komponente: nosiva kružna ploča, hidraulični sistem, merni most i uređaj za merenje (Slika 3.10). Sistem kontra opterećenja (kontrateret) nije deo uređaja, ali je bio neophodan za vršenje ispitivanja. Za određivanje modula deformacije korišćena je ploča prečnika 30 cm, opterećenje se povećavalo dok se ne postigne normalni pritisak ispod ploče od 0,5 MN/m².

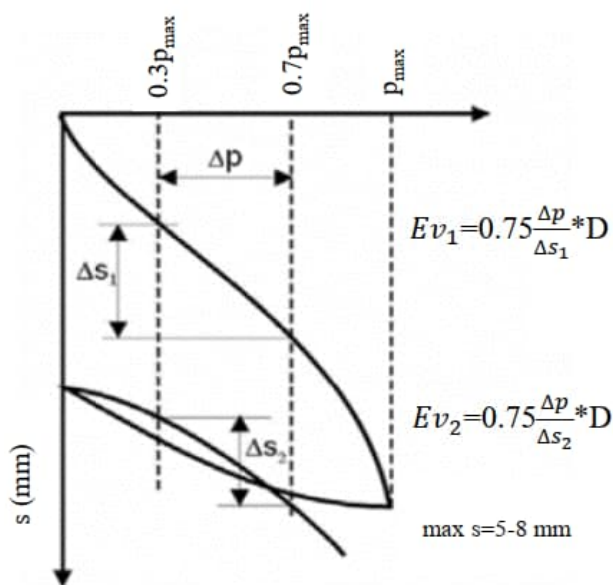
Pre početka ispitivanja, pretvarač sile i manometar ili merni pretvarač postavljani su na nulu, nakon čega se nanosilo predopterećenje koje odgovara pritisku od 0,01 MN/m². Određivanje modula deformacije $E_{v1}-E_{v2}$ vršeno je procesom opterećenje – rasterećenje – opterećenje prema gore navedenom srpskom i nemačkom standardu. Za pripremu i izvođenje jednog ispitivanja bilo je potrebno oko 30 min.

Kada se na ploču primeni opterećenje, ploča se sleže a karakterističan dijagram izvođenja opita prikazan je na Slici 3.11. Pri svakom stupnju opterećenja koje se očitava na manometru čeka se da sleganje bude potpuno pre nego što se nanese sledeće opterećenje. Ovo se radi kako bi se osiguralo da se dobije pravo pomeranje za svaki prirast opterećenja.

Br.	Pritisak σ_0 [MN/m ²]	Sleganje s [mm]
predopterećenje		
1	0,0119	0,00
prvo opterećenje		
2	0,0810	0,21
3	0,1587	0,56
4	0,2494	0,90
5	0,3279	1,20
6	0,4199	1,44
7	0,4989	1,65
rasterećenje		
8	0,2480	1,55
9	0,1244	1,42
10	0,0097	1,14
drugo opterećenje		
11	0,0806	1,25
12	0,1652	1,36
13	0,2566	1,48
14	0,3278	1,56
15	0,4203	1,67



Slika 3.11. Primer iz prakse: prikaz stupnjeva „opterećenje – rasterećenje“ i odnosa kriva „pritisak – sleganje“



Slika 3.12. Moduli deformacije E_{v1} i E_{v2} - dijagram zavisnosti pritiska i sleganja.

Za izračunavanje modula E_{v1} - E_{v2} koristi se pravolinijski deo krive pritisak-sleganje, koristeći izraze na Slici 3.12., preko sleganja (s) očitanih sa obaveznog dijagrama (p, s) za opterećenja $p_1=0.3p_{\max}$ i $p_2=0.7p_{\max}$.

Obično je u propisima, specifikacijama i preporukama definisana zahtevana minimalna vrednost statičkog modula deformacije E_{v1} i E_{v2} i neophodan odnos između njih, retko se daju zahtevi za minimalnu vrednost dinamičkog modula deformacije E_{vd} . Razlog je to što iskustva statičkog modula deformacije traju nekoliko decenija, dok se dinamički modul deformacije koristi samo oko 20 godina.

3.3.5 Određivanje modula stišljivosti (M_s)

Često se kvalitet ugradnje donjih slojeva saobraćajnica kontroliše i preko modula stišljivosti koji se takođe dobija terenskim opitom koristeći kružnu ploču (Slika 3.13). Ovo ispitivanje se primenjuje *in situ* gde želimo proveriti stišljivost tla ili efekte zbijanja zemljanih materijala. Najčešća primena ovog ispitivanja je u putogradnji gde se određuje nosivost podloge i pojedinih delova kolovozne konstrukcije, pri čemu se propisuju određeni kriterijumi koji se moraju zadovoljiti.

Modul stišljivosti M_s - opit kružnom pločom je metoda kojom se vrši ispitivanje nosivosti ugrađenog sloja tako što se utvrđuje sleganje kružne ploče, pri određenim pritiscima koji se povećavaju. Opit se izvodi u skladu sa standardom SRPS U.B1. 046.



Slika 3.13. Merenje modula stišljivosti - M_s , sloj posteljice na lokaciji izgrađenog državnog puta Ib reda broj 22

U okviru ove disertacije korišćeni su podaci koji su dobijeni pločom prečnika 30 cm, koja je postavljana na uređenu i poravnatu podlogu - donji sloj saobraćajnice i mereno je sleganje ploče sa povećanjem opterećenja.

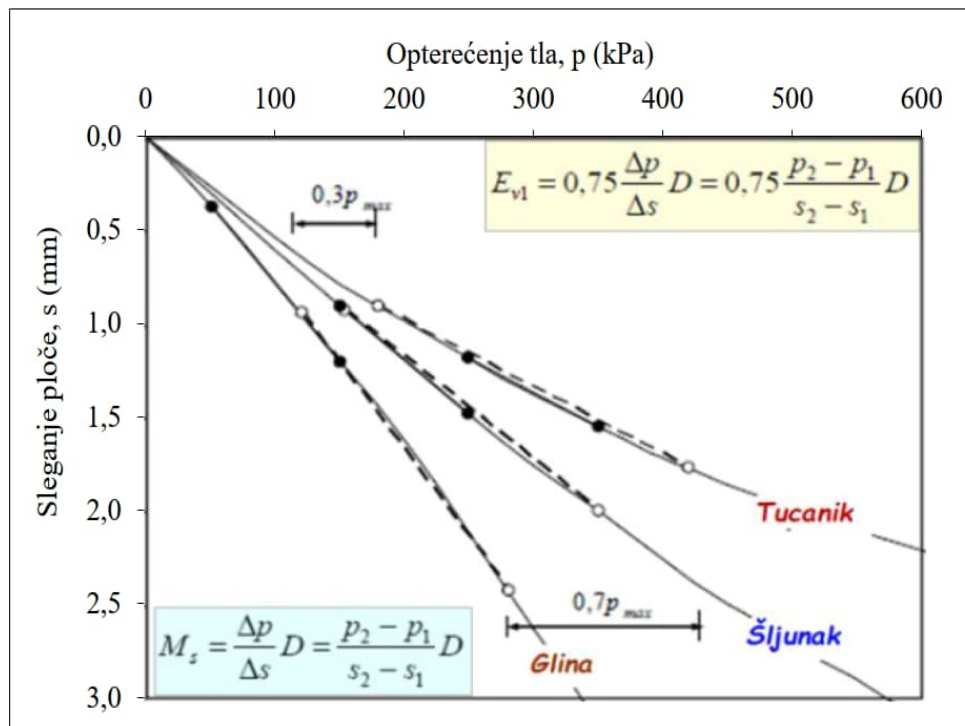
Podloga je bila dobro obrađena, tako da su se naprezanja od ploče prenosila preko čitave njene površine. Prirast opterećenja i njegovo trajanje je bilo u skladu sa gore navedenim standardom. Sleganje ploče mereno je u tri nezavisne tačke oko oboda ploče, a srednja vrednost sleganja iz ove tri tačke korićena je za proračun modula stišljivosti. Opterećenje je nanošeno preko klipa hidraulične prese, koji je morao imati kontrateret. Novi stepen povećanja opterećenja primenjivao se tek nakon prestanka sleganja pri prethodnom opterećenju, odnosno kada je prirast sleganja bio dovoljno mali u vremenu.

Rezultati ispitivanja su poslužili za određivanje modula stišljivosti M_s , izračunatog prema jednačini (3.5):

$$M_s = \frac{\Delta p}{\Delta s} * D \text{ [MPa]} \quad (3.5)$$

gdje je: Δp - razlika dva određena opterećenja, Δs - odgovarajuća razlika sleganja (s) u cm, D - prečnik kružne ploče, u cm.

Rezultat ispitivanja trebalo bi prikazati na dijagramu (p, s), jer postoji mogućnost da su nagib krive i veličina modula zadovoljavajući a sleganja nedozvoljeno velika. Na Slici 3.14 za modul M_s i E_{v1} prikazani su tipični dijagrami za uobičajene vrste tla.



Slika 3.14. Tipičan dijagram (p, s) za uobičajene vrste tla, sa područjima za određivanje statičkih modula M_s - pune linije i E_{v1} - isprekidane linije (M. Stanković, 2021)

3.3.6 Određivanje dinamičkog modula deformacije (E_{vd})

Dinamička kružna ploča - LWD (Light Weight Deflectometer) je prenosivi uređaj sa padajućim tegom koji je razvijen u Nemačkoj kao alternativni uređaj statičkoj kružnoj ploči - SPLT (static plate load test). Ispitivanjem se dobija dinamički modul deformacije (E_{vd}) kao rezultat deformacije (krutosti) odnosno nivoa zbijenosti materijala *in situ*.

Dinamički opit pločom sa padajućim tegom omogućava jednostavnije i brže ispitivanje i trenutno dobijanje rezultata. U poslednje vreme sve je veća primena ovih uređaja u Srbiji, opit se izvodi u skladu sa standardom ASTM E2835-21. Ovaj metod se uvodi u domaću tehničku regulativu uz sve češće teorijsko-eksperimentalne analize i korelacije sa statičkim konvencionalnim metodama.

Oprema za ispitivanje je mala i lako prenosiva, što omogućava da je koristi na gradilištu jedan ispitivač.

Sistem kontra opterećenja nije potreban i može se koristiti u situacijama s malim prostorom za rad poput rovova i drugih iskopavanja (Slika 3.15). U osnovi je pogodan za krupnozrna i mešovita tla sa maksimalnom veličinom zrna do 63 mm (Lehner i dr. 2012). Prema Kudla, Floss i Trautmann (1991), na sleganje utiče stanje tla do dubine od 50 cm, ali optimalna dubina uticaja je do 25 cm.

U Nemačkim tehničkim specifikacijama (Deutsche Bahn AG-a), moduli za dinamičku deformaciju mogu se koristiti ravnopravno sa deformacionim modulima E_{v2} . Međutim, ističe se da se koeficijenti korelacije E_{v2} - E_{vd} mogu odrediti samo u pojedinačnim slučajevima kada je materijal visoko homogen (granulometrički sastav, sadržaj vode, itd.) i statistički verifikovanim uporednim ispitivanjima. Opšti koeficijenti korelacije između modula statičke i dinamičke deformacije ne

moгу postojati, pošto su ispitivanja suštinski različita. Rezultati koji su prikazani u disertaciji dobijeni su korišćenjem opreme tipa ZFG 3.0 kompanije Zorn Instruments, Slika 3.15.



Slika 3.15. Merenje dinamičkog modula deformacije - E_{vd} pomoću uređaja sa padajućim tegom, posteljični sloj na lokaciji objekta Autoput E-80: Niš (Merošina) - Pločnik (Beloljin)

Kružna ploča za opterećenje prečnika $D = 30$ cm je bila izložena sleganju usled najveće sile udara 7,07 kN (padajući teg 10 kg). Pomeranje ploče (sleganje) je beleženo pomoću elektronskog aparata koji diktira korak po korak sam proces ispitivanja što je onemogućilo potencijalne greške pri merenju. Ispitivanja dinamičkom kružnom pločom - LWD (Light Weight Deflectometer) su vršena u skladu sa standardom ASTM E2835-21 i TP BF-StB Teil B 8.3. (Nemačka specifikacija: „Propis o tehničkom ispitivanju tla i stena u izgradnji puteva). Za jedno ispitivanje je bilo potrebno oko 5 minuta.

Treba napomenuti da ispitivanje dinamičkog modula nema istu pouzdanost kao ispitivanje statičkog modula deformacije. Utvrđeni dinamički moduli E_{vd} se mogu pretvoriti u E_{v2} vrednosti korišćenjem faktora konverzije. Međutim, korelacija je veoma zavisna od vrste materijala, vlage i karakteristika strukture kolovozne konstrukcije i mora se odrediti posebno za svaki materijal korišćenjem uporednih ispitivanja.

Generalno, postoji dobra korelacija između SPLT (Static Plate Load Test) modula i LWD modula. Kod kohezivnih tla, linearni odnos često važi za čitav niz rezultata ispitivanja. Za tla bez kohezije, bilinearni odnos ili logaritamska funkcija pokazuje bolje korelativno slaganje (Adam i Kopf, 2004).

3.4 Dinamički CBR uređaj

U poslednjih nekoliko godina u svetu je sve češće u upotrebi dinamički CBR uređaj, koji je od skoro počeo da se koristi i u Srbiji.

Dinamičko CBR ispitivanje, koristeći uređaj LWD, trebalo bi da se široko koristi zbog svoje brzine i lakoće ispitivanja kao alternativni metod klasičnoj CBR metodi kontrole kvaliteta u procesu zbijanja ili proceni nosivosti podloge (Weingard i dr., 1990; Schmidt i Volm, 2000; Zabielska-

Adamska, K. i Sulewska, M. J., 2013, 2015; Dina Kuttah, 2019; Henzinger, C. i Vogt, S., 2019). U nastavku je dat detaljan opis opreme, pripreme uzoraka, postupka ispitivanja i prikaza rezultata dinamičkog kalifornijskog indeksa nosivosti (CBR_d).

3.4.1 Primena i tehničke informacije o uređaju

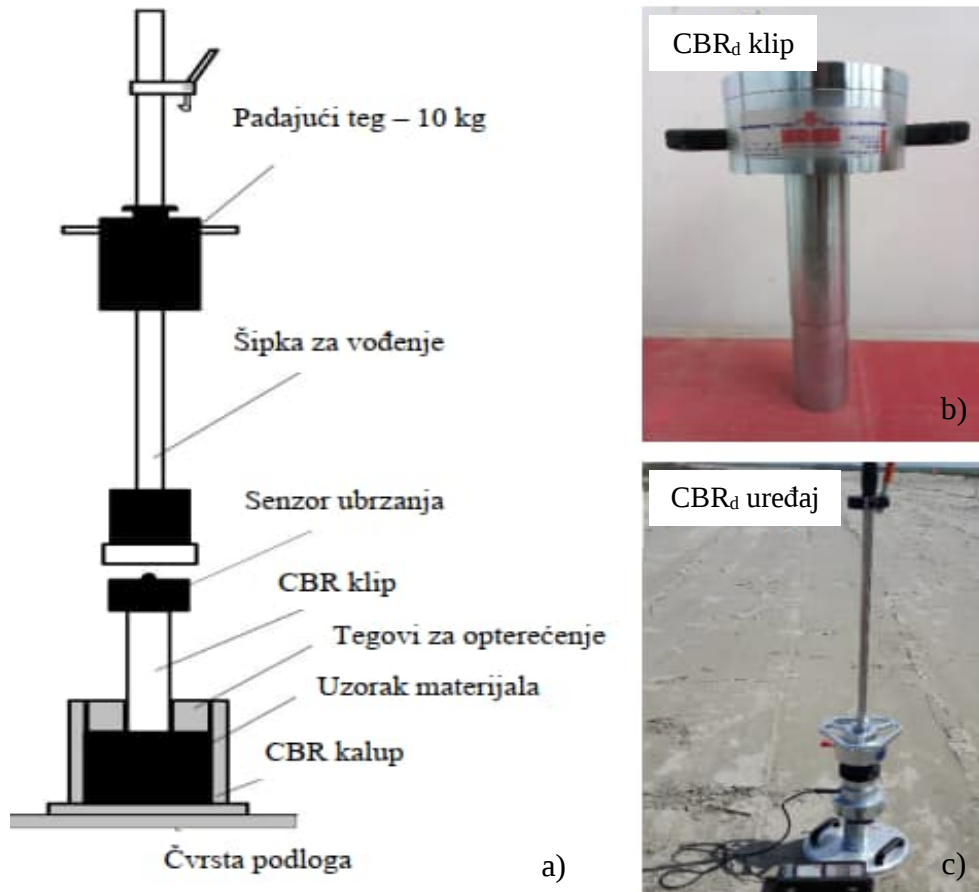
Dinamički kalifornijski indeks nosivosti (CBR_d) je jednostavno ispitivanje na osnovu penetracije standardnog klipa razvijeno za procenu stanja slojeva podloge i ocenu nosivosti ugrađenih prirodnih materijala koji se koriste za izgradnju puteva, aerodromskih pista ili železničkih koloseka. Kako je u pitanju uređaj sa kojim se ispitivanja mogu obavljati u laboratorijskim uslovima, ali i na terenu, rezultati omogućavaju njihovo međusobno poređenje i dobijanje korelacionih zavisnosti između parametara kojima se ocenjuje podobnost korišćenja materijala i parametara zbijenosti i nosivosti koji su postignuti na terenu izgradnjom slojeva podloge kolovozne konstrukcije.

Ispitivanje se može sprovesti kao alternativa statičkom CBR ispitivanju, posebno zbog kratkog vremena izvođenja. Prednost CBR_d -a, u poređenju sa klasičnim CBR-om, je što se ne koristi uređaj za opterećenje u laboratorijskim uslovima odnosno *in situ* sistem kontra opterećenja koji je neophodan pri statičkom ispitivanju (obično teške građevinske mašine).

Oprema koja čini CBR_d uređaj sastoji se od sledećih ključnih komponenti (Slika 3.16):

- Kružna ploča sa vođicom za klip ($\varnothing$ 300 mm, visine 181 mm, težine 13,5 kg); CBR_d kalup ($\varnothing$ 150 mm); metalni nastavak za kalup, istog prečnika kao i kalup, visine 50 mm; dve uklonjive osnovne ploče, prva sa metalnim diskom, druga perforirana; vođica za klip sa centralnom rupom, visine 50 mm; CBR_d klip ($\varnothing$ 50 mm, širine max. 207 mm, visine 280 mm, težine 10,6 kg) sa amplitudom pritiska $3,6 \text{ MN/m}^2$; tegovi za opterećenje debljine 10 mm i težine 2,5 kg; uređaji za zatezanje i merni uređaj za određivanje bubrenja pri potapanju u vodu (prema TP BF - StB deo B 7.1)
- Metalni Proctorov nabijač u skladu sa standardom SRPS EN 13286-2.
- Uređaj za opterećenje koji se sastoji od: padajućeg tega težine 10 kg, šipke za vođenje, otpusne poluge za stvaranje sile od $7070 \text{ N} \pm 70 \text{ N}$ i nosivog diska koji sadži senzor ubrzanja koji je potreban za merenje, (prema TP BF - StB deo B 8.3)
- Elektronski uređaj za merenje ukupnog sleganja sa tačnošću merenja od $\pm 0,02 \text{ mm}$

Primena dinamičkog CBR_d -a je omogućena razvojem posebne opreme (klipa, kalupa, kružne ploče itd.) koja je okarakterisana kao dodatak standardnoj opremi LWD-a. Klip se postavlja između uređaja za opterećenje i kalupa odnosno nosive kružne ploče. Na Slici 3.16. dat je šematski prikaz kompletne opreme za izvođenje ovog opita (tipičan klip i uređaj za opterećenje za izvođenje dinamičkog CBR_d ispitivanja).



Slika 3.16. a) Šematski prikaz opreme za prodor CBR_d klipa; b) CBR_d Klip (Ø 50 mm); c) Uređaj za opterećenje i elektronski uređaj za merenje sa modelom ZFG 3.0 LWD



Slika 3.17. a) CBR_d kalup (Ø 150 mm) i prateće komponente
b) Kružna ploča sa vođicom za CBR_d klip (Ø 300 mm)

Osnova ovog ispitivanja je ista kao i kod drugih CBR ispitivanja, prodor standardnog klipa na element zemljane podloge u kome se ispituje. Prodor u ovom slučaju nastaje udarom padajućeg tega o amortizere koji pomeraju klip i klip teži da prodre u tlo. Ovo je moguće samo zato što je kalup odnosno ploča otvorena na donjoj bazi klipa i omogućava prolaz iste do materijala. Slika 3.17 prikazuje karakteristični kalup sa pratećim komponentama i kružnu ploču sa vođicom za CBR_d klip.

3.4.2 Vrsta materijala podobna za ispitivanje

Dinamičko CBR_d ispitivanje se izvodi u laboratoriji i *in situ* na poremećenim uzorcima materijala, kod kojih maksimalna veličina čestica ne prelazi 22 mm, a udeo nadmernih zrna je obično manji od 50% (*TP BF-StB Teil B 7.1*). Prilikom razmatranja podobnosti CBR_d opita za ispitivanje različitih vrsta materijala potrebno je uzeti u obzir sledeće: upotrebljivost dobijenih podataka, preciznost korelacija kod interpretacije rezultata i mogućnost merenja prilikom penetracije.

U poslednje dve decenije sprovedeno su određena istraživanja kako bi se utvrdili opšti trendovi i ponašanje dinamičkog kalifornijskog indeksa nosivosti (CBR_d) u odnosu na karakteristike različitih vrsta materijala. To uključuje mineraloški sastav materijala, granulometrijski sastav, zapreminsku masu, maksimalnu veličinu agregata, oblik i hrapavost zrna, sadržaj vode, zbijenost itd.

Schmidt i Volm (2000), predstavili su rezultate istraživanja CBR_d -a sprovedenog na koherentnom sitnozrnom tlu sa različitim uslovima zbijanja. Istraživanje je sprovedeno za glinoviti materijal sa sadržajem vlage oko $\pm 4\% w_{opt}$.

Zabielska-Adamska, K., Sulewska, M. J. (2013) su ukazali da dinamička CBR_d metoda, kao i statička (klasična) metoda se mogu koristiti za procenu zbijenosti letećeg pepela i kohezivnog materijala ugrađenog u podlogu ili slojeve nasipa.

Dina Kuttah (2019) je pokazala da se laboratorijski dinamički kalifornijski odnos nosivosti (CBR_{dl}) može koristiti kao metod za procenu zbijenosti odabranog peskovitog tla. Vrednosti (CBR_{dl}) zavise od zapreminske težine i sadržaja vode u kalupu.

Christoph Henzinger i Stefan Vogt (2019) su u svom radu na osnovu dobijenih podataka iz laboratorijskih i terenskih ispitivanja, dali ocenu primene dinamičkog CBR_d -a na krupnozrnim materijalima.

3.4.3 Postupak izvođenja CBR_d opita i prikaz rezultata

Dinamičko CBR_d ispitivanje može se izvesti u laboratoriji – CBR_{dl} i *in situ* – CBR_{dt} (Slika 3.18), a takođe se *in situ* može simulirati laboratorijski CBR_{dl} u cilindru.

To je jedini metod, osim statičkog CBR-a, koji se može koristiti u laboratoriji za određivanje potrebnih vrednosti CBR_{dl} -a u odnosu na karakteristike zbijanja.

Za terenske uslove, moguće je proceniti zbijanje tla, upoređujući *in situ* rezultate CBR_{dt} sa unapred definisanim minimalnim vrednostima. Ovo se posebno odnosi na CBR_d ispitivanja koja se mogu koristiti za kontrolu zbijanja tokom građenja donjih slojeva saobraćajnica (slojeva nasipa i posteljice) zbog brzine izvođenja istraživanja uz pomoć LWD uređaja.

Može se koristiti u laboratoriji na izrađenim cilindričnim uzorcima kao i *in situ* na pripremljenoj podlozi a posebno u skućenim prostorima i teško dostupnim lokacijama, bez potrebe za pratećom opremom.

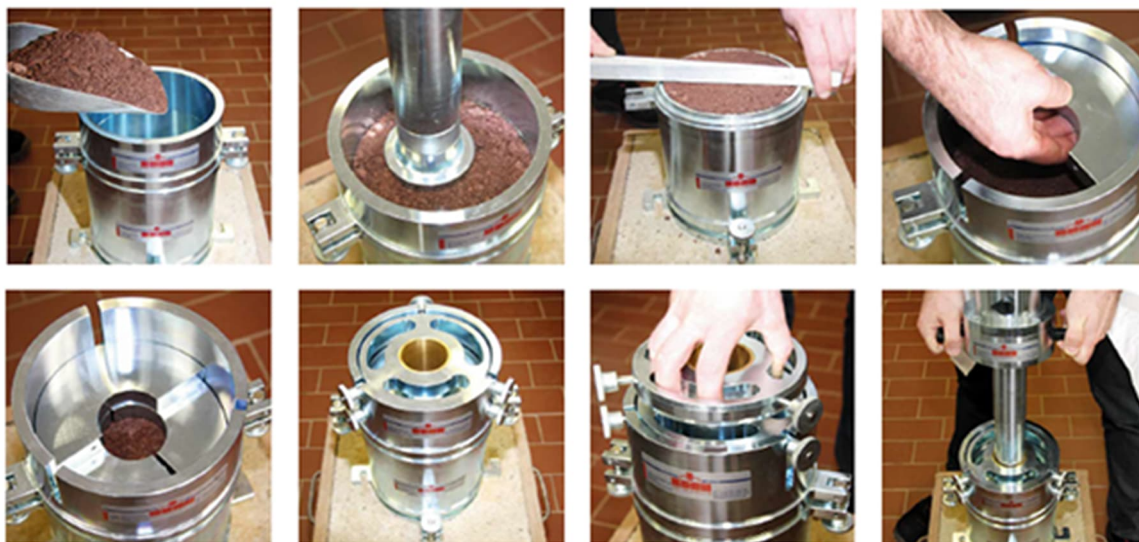


Slika 3.18. Dinamičko CBR_d ispitivanje, korišćenje uređaja sa padajućim tegom LWD za izazivanje definisanog udarnog opterećenja na CBR_d klip a) CBR_d – Laboratorijsko ispitivanje b) CBR_d – „In situ“ ispitivanje

Izvođenje CBR_d opita podrazumeva sledeće operacije:

- Povezivanje opreme. Način povezivanja razlikuje se u zavisnosti da li se koristi oprema za laboratorijsko ili *in situ* ispitivanje. Međutim princip ispitivanja je identičan.
- Priprema i zbijanje uzorka u CBR_d - cilindrima kao i skladištenje pripremljenih uzoraka za izvođenje CBR_d – ispitivanja, u skladu sa SRPS EN 13286-47 i TP BF - StB deo B 7.1 (Slika 3.19). Priprema na terenu si vrši kroz procese navoženja, razastiranja i zbijanja materijala ispitivanog sloja.
- Nakon što je uzorak umetnut i pripremljen, CBR_d - cilindri se postavljaju na čvrstu površinu i osiguravaju od bočnog pomeranja. Diskovi opterećenja i klip opterećenja se postavljaju na zbijeni uzorak. Proverava se da li je CBR_d klip uspravan.
- Uređaj za opterećenje – padajući teg male težine pažljivo se i centrično postavlja na CBR_d klip. Nakon toga vrši se otvaranje transportne brave padajućeg tega, uz držanje šipke za vođenje uspravno, podizanje padajućeg tega i kačenje na gornju rezu za udar.
- Prvo se izvrši jedan udar prednaprezanja: Otpusti se teg pomoću reze, teg se spušta i vraća nazad. Nakon odskakanja uhvatiti padajući teg i ponovo ga zakačiti.
- Uključi se merni uređaj, zatim se izvrši jedno merenje uticaja kao što je gore opisano. Amplituda sleganja (ugib) CBR_d klipa se prikazuje na mernom uređaju sa tačnošću od $\pm 0,02$ mm.

- Potrebno je osigurati da se tačno održava visina pada tega propisana kalibracijom. Nakon završetka merenja, transportna brava uređaja za opterećenje se zaključava, čime se sprečava pomeranje padajućeg tega prilikom daljeg prenosa uređaja.
- Treba izvesti 2 merenja. Ako se dve pojedinačne vrednosti merenja razlikuju više od 15 % jedna od druge, CBR_d ispitivanje se mora ponoviti sa novim uzorcima.



Slika 3.19. Postupci pripreme i zbijanja uzorka u kalupu za izvođenje CBR_d – ispitivanja u laboratorijskim uslovima (<https://www.zorn-instruments.de/fallgewichtsgeraete/cbr-dyn/>)

Dinamička CBR_d - vrednost je kompleksna mera čvrstoće materijala. Može se izraziti u opsegu $20\% \leq CBR_d \leq 150\%$. Ograničenje ovog uređaja se ugleda u merenjima malih vrednosti dinamičkog kalifornijskog indeksa nosivosti ($CBR_d < 20\%$) što se najčešće dešava u slučajevima zasićenih sitnozrnih materijala.

Određivanje vrednosti dinamičkog CBR_d -a podrazumeva utiskivanje CBR_d klipa prečnika 50 mm (površine poprečnog preseka - 1963 mm²) u uzorak pod definisanim dinamičkim impulsnim opterećenjem i meri se amplituda sleganja (ugib) opterećenog CBR_d klipa i koristi se za izračunavanje dinamičke CBR_d – vrednosti. Dinamičko opterećenje se proizvodi pomoću uređaja za opterećenje LWD.

CBR_d ispitivanje se izvodi pričvršćivanjem CBR_d nastavka na uređaj LWD, pri čemu se padajući teg koristi za izazivanje definisanog udarnog opterećenja na CBR_d klip (Slika 3.18).

Weingart i dr. (1986) dali su model za izračunavanje vrednosti CBR_d iz s_d . Pretpostavili su da se za bilo koji dati materijal odnos između dinamičke dubine prodiranja (s_d) i različitih impulsa sile (p_d) može opisati funkcijom snage, kao i da je $CBR = CBR_d = 100\%$.

CBR_d se izračunava na osnovu empirijske jednačine (3.6.), kao:

$$CBR_d = 24.26 * p_d / s_d^{0.59} \quad (3.6)$$

Jednačina (3.6) se može pojednostaviti silom od 7070 N i prečnikom klipa od 50 mm (presek 1963 mm²) do jednačine (3.7): ($p = 3600 \text{ N / mm}^2$)

$$CBR_d = 87.3 / s_d^{0.59} \quad (3.7)$$

gde je:

CBR_d (%) – vrednost dinamičkog CBR-a

s_d (mm) – amplituda sleganja CBR_d klipa

p_d (N/mm²) – max. amplituda dinamičkog opterećenja

Alternativni pristup za dinamičku dubinu prodiranja (s_d) se zasniva na korelacijama izvedenim iz ispitivanja dinamičkog konusnog penetrometra - DCP. Shodno tome Livneh (1989) je obezbedio korelaciju između statičkog (klasičnog) CBR-a i dinamičke dubine prodiranja s_d predstavljenu jednačinom (3.8):

$$CBR = 103.6/s_d^{1.32} \quad (3.8)$$

Nekoliko faktora može uticati na izmerenu dinamičku vrednost CBR-a (CBR_d), uključujući težinu padajućeg tega, visinu pada, veličinu (prečnik) ploče, naprezanje kontakta ploče, vrstu i mesto pretvarača otklona, upotrebu pretvarača opterećenja, brzinu nanošenja opterećenja i čvrstoću materijala (Weingart, W., Hanebutt, J. i Rummert, W., 1990). Takođe na rezultate merenja *in situ* utiču i promene uslova sredine u privom redu povećanje i smanjenje vlažnosti.

4. PRIKAZ REZULTATA ISPITIVANJA

Istraživanja za potrebe razvoja korelacionih zavisnosti parametara zbijanja i nosivosti donjih slojeva saobraćajnica podeljena su na dva dela:

- Prikupljanje postojećih podataka sa različitih lokacija
- Dodatna laboratorijska i terenska ispitivanja

Istraživanja igraju značajnu ulogu u razvoju empirijskih korelacija. Preciznost korelacionih zavisnosti se uglavnom oslanja na pouzdanosti korišćenih rezultata ispitivanja. Sva ispitivanja su izvedena u kontrolisanim uslovima sredine.

Korišćeni postojeći podaci kao i podaci iz dodatnih ispitivanja dobijeni su u skladu sa srpskim i evropskim standardima. Tehnički uslovi za građenje puteva u republici Srbiji, tačka 2.2 - zemljani radovi, zahtevaju određivanje laboratorijskih ispitivanja tj. podobnosti materijala kao i terenska ispitivanja kako bi se utvrdio stepen zbijenosti i modul deformacije E_{v1} - E_{v2} . Oni su zasnovani na rezultatima za potrebe izgradnje donjih slojeva saobraćajnica – podloge kolovozne konstrukcije u skladu sa SRPS EN ispitivanjima. Sva laboratorijska ispitivanja u kojima sam aktivno učestvovao su obavljena u laboratorijama TPA, Srbija. Dodatna terenska ispitivanja izvršena su na lokaciji gradilišta Petlja Batajnica (Autoput E75) u Beogradu.

Kao što je već ranije naglašeno primarni cilj istraživanja je bio utvrđivanje pouzdanih korelacija između izabranih parametara materijala koji opisuju stanje slojeva podloge što je doprinelo predlogu načina upotrebe i definisanju vrednosti dinamičkog CBR uređaja (CBR_d). Izvršena su istraživanja da se uspostavi veza između parametra dinamičkog CBR_d uređaja sa parametrima konvencionalnih metoda u laboratorijskim i terenskim uslovima za definisani tip materijala, tj. za krupnozrno tlo (šljunak).

4.1 Prikupljeni podaci parametara zbijanja i nosivosti

Ova disertacija je uključivala prikupljanje i analizu podataka sprovedenih tekućih laboratorijskih i terenskih ispitivanja za potrebe izgradnje donjih slojeva saobraćajnica na različitim lokacijama u Republici Srbiji. Detalji lokacija prikazani su u Tabeli 4.1.

Tabela 4.1. Detalji izvedenih lokacija donjih slojeva saobraćajnica

Oznaka	Objekat	Vrsta materijala	Konstrukcija	Godina izgradnje
Lokacija 1. (L1-C.)	Ib reda broj 22 (M-22)	Glina	Nasip	2018/2019
Lokacija 2. (L2-S.)	Robna kuća IKEA, Beograd	Pesak	Nasip	2016/2018
Lokacija 3. (L3-S.)	Intermodalni terminal "Batajnica"	Pesak	Nasip	2020/2022
Lokacija 4. (L4-G.)	Petlja Batajnica (Autoput E75)	Šljunak	Posteljica	2019/2022
Lokacija 5. (L5-G.)	Autoput E-80: Deonica Merošina – Merošina 1	Šljunak	Nasip	2021/2023

Karakteristike i primenljivost korelacionih zavisnosti direktno zavise od ulaznih podataka u pogledu ispitivanja materijala, što takođe definiše opseg razvijenih korelacionih zavisnosti. Različiti tipovi materijala rezultiraju širokom primenljivošću korelacionih zavisnosti. Razvoj korelacionih zavisnosti vezanih za svojstva zbijanja i nosivosti podloge kolovozne konstrukcije je veoma osetljiv

na fizičko-mehaničke karakteristike materijala. Fizičko mehaničke karakteristike svakog materijala određene su nizom prethodnih laboratorijskih ispitivanja.

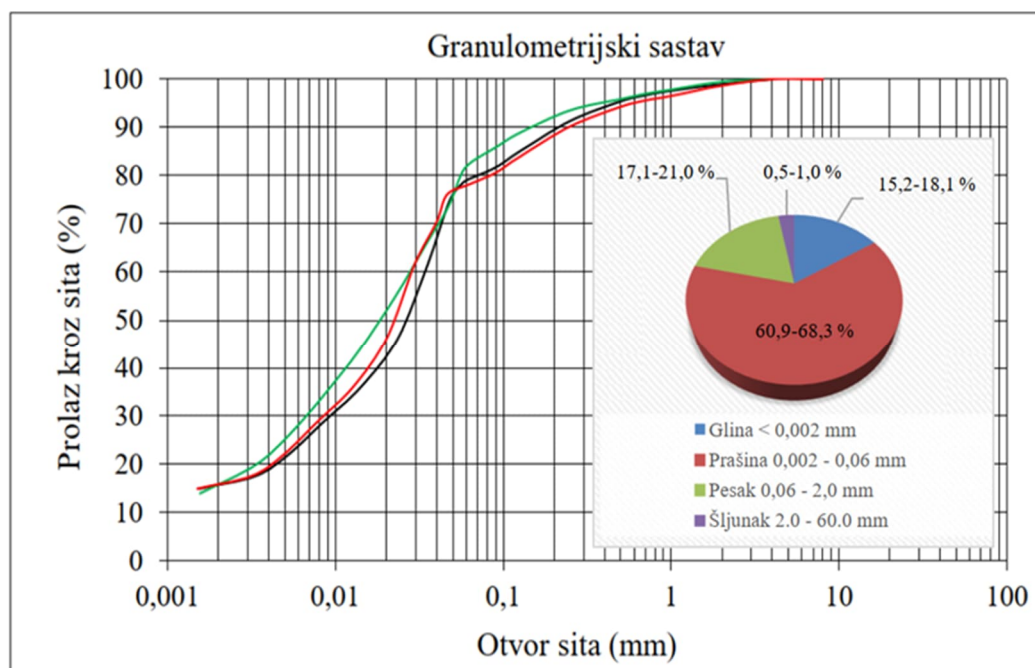
Prikupljeni podaci laboratorijskih ispitivanja obuhvatali su proučavanje prirodnih sitnozrnih i krupnozrnih materijala: glinovito-prašinat materijal, pesak i šljunak. U okviru ove disertacije laboratorijska ispitivanja za definisanje fizičko-mehaničkih karakteristika, uradjena su za pet materijala, tj. ispitivanjima su obuhvaćeni sitnozrni (glina) i krupnozrni (pesak i šljunak) materijali. Treba napomenuti da su ovi materijali korišćeni za izradu donjih slojeva sabračajnica (slojeva nasipa i posteljice), tj. na izvedenim slojevima vršena su i *in situ* ispitivanja, koja će biti razmatrana u narednim poglavljima. Definisane lokacije izvedenih saobraćajnica i korišćeni materijali u disertaciji su označeni kao L1-C, L2-S, L3-S, L4-G i L5-G (Tabela 4.1). Oznake L1 do L5 označavaju brojeve lokacija dok oznake C, S i G označavaju prvo slovo jedinstvene klasifikacije tla – USCS.

Pored toga za definisanje metodologije izgradnje kao što je broj prolaza koji garantuje maksimalnu efikasnost opreme za zbijanje, debljinu sloja koja obezbeđuje minimalnu heterogenost u nasipu na svim pomenutim lokacijama urađene su i probne deonice (probni nasipi).

4.1.1 Sitnozrni materijal

Za potrebe izgradnje nasipa na lokaciji L1-C prethodnim ispitivanjima definisane su fizičko mehaničke karakteristike prirodnog sitnozrnog materijala uzorkovanog sa lokalnog pozajmišta između naseljenih mesta Vreoci i Šopići, opština Lazarevac.

Određivanje granulometrijskog sastava izvršeno je u skladu sa SRPS U.B1.018 a ispitivanja su urađena za potrebe definisanja podobnosti materijala u cilju dokazivanja ispunjenosti kriterijuma za njegovu upotrebu. Indentifikaciono-klasifikacionom analizom utvrđeno je da je materijal, glina-prašinata, srednje plastičnosti, svetlo braon boje. Korišćen materijal je klasifikovan prema klasifikaciji uprave javnih puteva SAD (AASHTO-American Association of State Highway and Transportation Officials system) i jedinstvenoj klasifikaciji tla (USCS – Unified Soil Classification System), (A6; CL). Granulometrijski sastav i raspon učešća određenih čestica odabranog materijala prikazan je na Slici 4.1.



Slika 4.1. Granulometrijski sastav i učešće određenih čestica sitnozrnog materijala (L1-C)

Svojstva zbijenosti određena su standardnim Proktorovim ispitivanjem u skladu sa SRPS U.B1.038 - povučen. Ispitivanja su rađena zbijanjem pripremljenih uzoraka u cilindričnom kalupu prečnika 100 mm. Ispitivanjem tri reprezentativna uzorka materijala utvrđena je maksimalna suva zapreminska težina u rasponu $\gamma_{dmax} = 16,37-16,90 \text{ kN/m}^3$ pri optimalnoj vlažnosti $w_{opt} = 16,5-17,2 \%$. Vrednost kalifornijskog indeksa nosivosti je iznosila $CBR = 2,5-2,8 \%$.

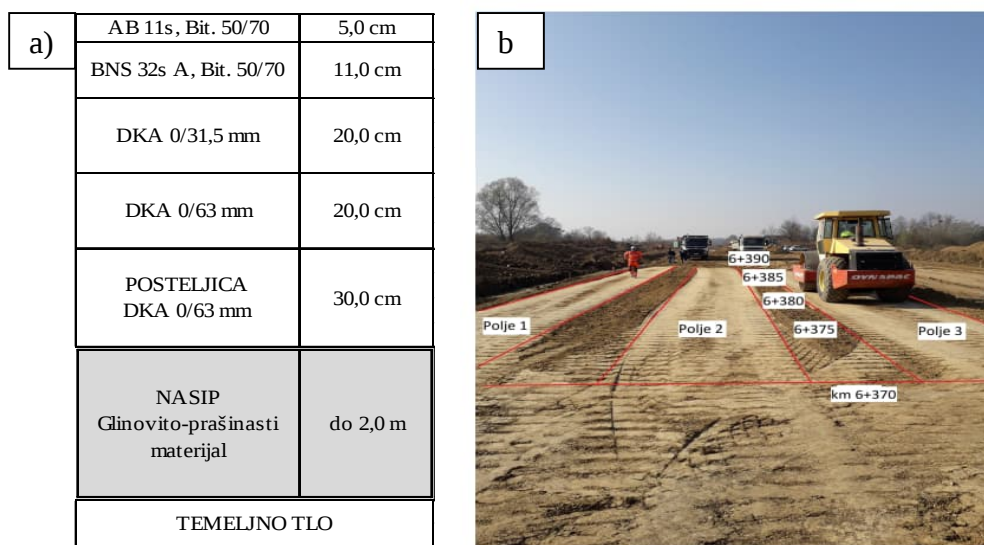
4.1.1.1 Lokacija 1. (L1-C) - Državni put Ib reda broj 22

Putni pravac Beograd – Ljig je deo putne mreže Srbije koji obzirom na saobraćajno-geografski značaj, stepen izgrađenosti i položaj u mreži puteva predstavlja saobraćajnicu od najvećeg značaja za povezivanje severnog sa jugo-zapadnim delom Srbije. U našoj putnoj mreži prema staroj kategorizaciji put je bio u rangu magistralnog puta i nosio je oznaku M-22, zatim Državni put Ia reda broj 2, a prema novoj kategorizaciji put nosi oznaku Državni put Ib reda broj 22 (popularno "Ibarska magistrala").

Na osnovu istraženih rezervi uglja, u procesu izrade planova i dinamike eksploatacije površinskih kopova Kolubarskog basena identifikovano je više značajnih prostornih problema koji se vezani za objekte infrastructure. U reonu opština Vreoci i Šopići zbog otvaranja kopa „Južno polje“ bilo je predviđeno izmeštanje ovog državnog puta u dužini $L=7.247 \text{ km}$ na novu trasu u neposrednoj blizini železničke pruge Beograd-Bar.

Za potrebe projektovanja i izvođenja korišćeni su podaci kompletnih tekućih laboratorijskih i *in situ* ispitivanja podloge kolovozne konstrukcije tj. završnog sloja nasipa. Najveći deo predmetne trase nalazio se u nasipu i izgrađen je od gore pomenutog glinovito prašinstog materijala iz lokalnog pozajmišta. Za izradu nasipa predmetne saobraćajnice, navedeni materijal je korišćen nakon prethodnih ispitivanja izvedenih u skladu sa važećim standardima i ispunjavanjem tehničkih uslova za dati objekat.

Metode provere parametara zbijanja i nosivosti su rađene na pripremljenim slojevima nasipa u obimu definisanim programom ispitivanja. Nasip je izgrađen na temeljnom tlu (podtlo) čiji kvalitet je dokazan prethodnim ispitivanjima. Nakon prijema temeljnog tla izvršeno je nasipanje I sloja nasipa. Nasip je izgrađen u slojevima u zavisnosti od konfiguracije terena (1-4 sloja) debljine od po 0,3 m. Sloj neposredno ispod posteljice predstavljao je završni sloj nasipa. Svaki sloj je zbijan valjkom sa 6 prelaza koji su prethodno utvrđeni na probnoj deonici, Slika 4.2b.



Slika 4.2. a) Šematski prikaz kolovozne konstrukcije sa podlogom; b) Izgled probne deonice (Državni put Ib reda broj 22, 2018)

Da bi se dokazalo da se angažovanim sredstvima (mekanizacijom) i tehnologijom ugrađivanja materijala može izvesti sloj nasipa debljine $d = 25\text{--}30\text{ cm}$ u kvalitetu prema Projektu za izvođenje urađena je probna deonica na I sloju nasipa.

Dovoženje i nasipanje materijala sloja nasipa je obavljeno nakon pripreme i kontrole podtla. Navoženje i nasipanje materijala je vršeno ravnomernom raspodelom vozila po širini pripremljenog sloja. Razastiranje materijala je vršeno u horizontalnom smeru u tri trake širine $4,0\text{ m}$ u sloju debljine $0,35\text{ m}$ u rastresitom stanju.

Pre zbijanja, materijal je doveden do skoro optimalnog sadržaja vlage, što su uslovi na licu mesta dozvoljavali. Proces sabijanja bio je potpuno kontrolisan tako da površina sloja nasipa nije rastrešena tokom pripremnih radova. Uslovi unutar dubinskog opsega ispitivane lokacije pretpostavljeni su kao pouzdani i homogeni. Materijal u svakoj traci (širine $4,0\text{ m}$) sabijao se različitim brojem prelaza valjka. Broj prelaza iznosio je 3 - polje 1, 6 - polje 2 i 9 puta polje 3. (Slika 4.2b). Rezultati stepena zbijenosti i vlažnosti sa probne deonice prikazani su u Tabeli 4.2.

Tabela 4.2. L1-C, Probna donica, prikaz rezultata ispitivanja stepena zbijenosti i vlažnosti

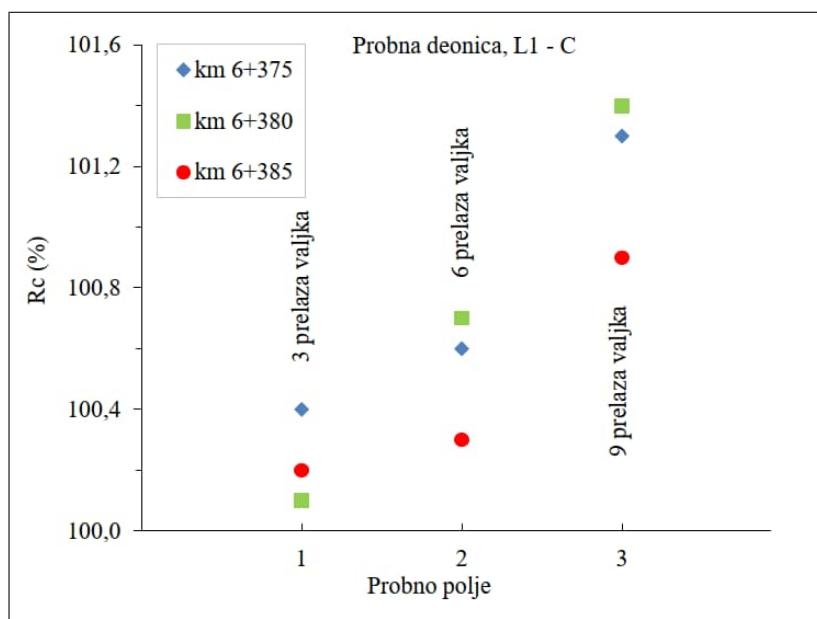
m.m. polje	Lokacija ispitivanja		Prethodna ispitivanja		Ispitivanja uzoraka		Stepen zbijenosti Rc - %	
	Stacionaža (km)	Položaj (m)			γ_d (kN/m ³)	w (%)	postignuto	zahtev
		levo	γ_{dmax} (kN/m ³)	W _{opt} (%)				
1	6 + 375	9,5	16,46	16,5	16,52	16,7	100,4	100
	6 + 380				16,49	17,1	100,2	
	6 + 385				16,48	16,3	100,1	
2	6 + 375	6,5			16,56	16,0	100,6	
	6 + 380				16,51	15,6	100,3	
	6 + 385				16,58	15,7	100,7	
3	6 + 375	3,5			16,67	14,5	101,3	
	6 + 380				16,61	14,5	100,9	
	6 + 385				16,69	14,6	101,4	

Uporedo sa ispitivanjem stepena zbijenosti i vlažnosti nasutog materijala, ispitivani su i moduli stišljivosti i deformacije. Prikaz rezultata je dat u Tabeli 4.3.

Tabela 4.3. L1-C, Probna deonica, prikaz rezultata ispitivanja modula stišljivosti i deformacije

m.m. polje	Lokacija ispitivanja		Modul stišljivosti - Ms (MPa)		Modul deform. - E _v (Mpa)			
	Stacionaža (km)	Položaj (m)	postignuto	zahtevano	E _{v1}	E _{v2}	E _{v2} /E _{v1} (≤ 3.0)	zahtev E _{v2}
		levo						
1	6 + 375	9,5	40,4	25,0	16,7	39,3	2,35	40,0
	6 + 385	9,5	39,7	25,0	19,3	47,1	2,44	40,0
2	6 + 375	6,5	62,5	25,0	21,7	54,3	2,50	40,0
	6 + 385	6,5	49,2	25,0	27,9	57,9	2,07	40,0
3	6 + 375	3,5	73,9	25,0	29,5	54,8	1,85	40,0
	6 + 385	3,5	74,4	25,0	30,6	64,9	2,12	40,0

Na Slici 4.3 prikazan je dijagram iz kojeg se jasno vidi uticaj broja prelaza valjaka na povećanje stepena zbijenosti (Rc).



Slika 4.3. Grafički prikaz rezultata stepena zbijenosti (R_c) u zavisnosti od broja prelaza valjka (L1-C)

Dobijeni rezultati stepena zbijenosti, modula deformacije, modula stižljivosti i vlažnosti materijala sloja nasipa na probnoj deonici pokazali su da se sa korišćenom mehanizacijom i tehnološkim postupkom nasipanja, razastiranja i sabijanja, nakon 6 prelaza valjkom, nasip može graditi u slojevima od $d = 0,35$ m u rastresitom stanju, tj. $d = 0,3$ m u zbijenom stanju.

Tabela 4.4 predstavlja rezime broja korišćenih podataka donjih slojeva saobraćajnica (slojeva nasipa) dobijenih tokom tekućih ispitivanja izgradnje gore pomenute saobraćajnice. Posteljični sloj je predstavljao završni sloj podloge kolovozne konstrukcije koji je izgrađen od drobljenog kamenog agregata 0/63 mm. Prikaz slojeva kolovozne konstrukcije izgrađene nakon prijema posteljičnog sloja prikazan je na Slici 4.2a.

Tabela 4.4. L1-C, Vrste i obim tekućih ispitivanja nasipa izgrađenog državnog puta Ib reda broj 22

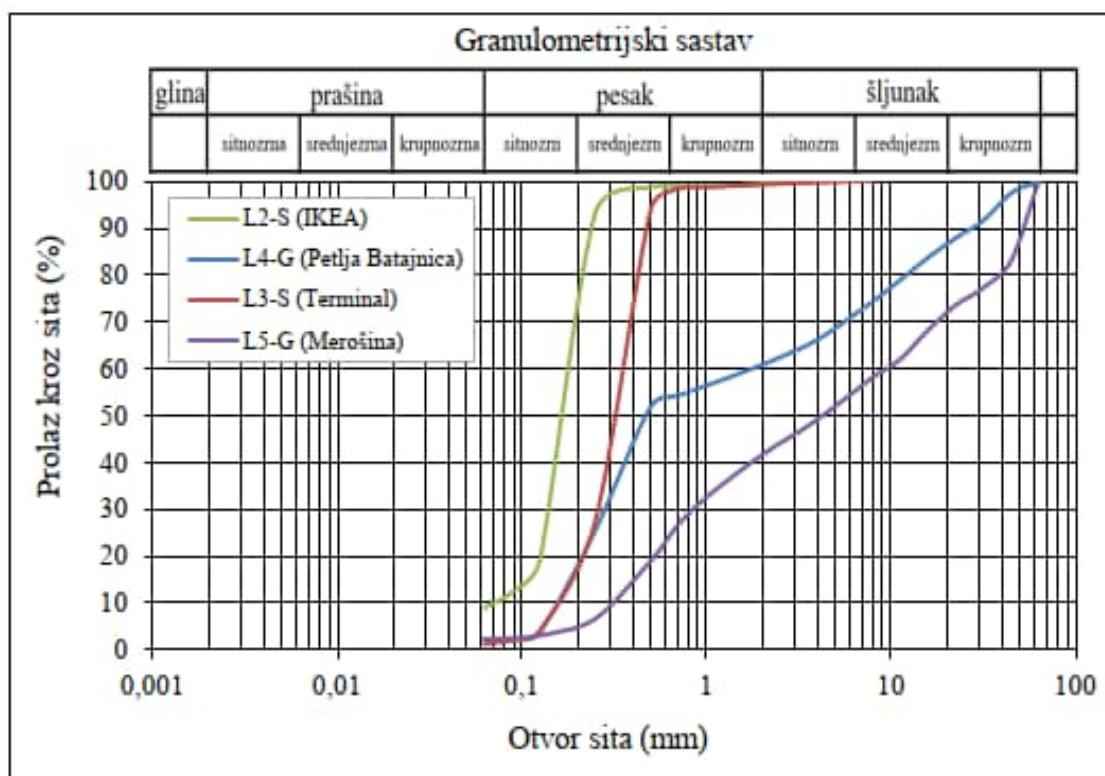
Red.br.	VRSTE TEKUĆIH ISPITIVANJA	BROJ ISPITIVANJA					Standard
		Slojevi nasipa					
		I	II	III	IV	Završni	
Izvedena tekuća laboratorijska ispitivanja							
1.	Određivanje vlažnosti uzoraka tla	36	14	11	4	42	SRPS U.B1.012
2.	Određivanje granulometrijskog sastava	36	14	11	4	42	SRPS U.B1.018
3.	Određivanje konzistencije tla	10	4	3	2	17	SRPS U.B1.020
4.	Određivanje sadržaja organskih materija tla	10	4	3	2	17	SRPS U.B1.024
5.	Određivanje odnosa vlažnosti i suve zapreminske mase tla	10	4	3	2	17	SRPS U.B1.038
6.	Određivanje Kalifornijskog indeksa nosivosti	6	2	-	-	17	SRPS U.B1.042
7.	Određivanje grupnog indeksa tla	10	4	3	2	17	SRPS U.B1.021

Izvedena „in situ“ ispitivanja							
8.	Određivanje zapreminske mase materijala tla sa porama metodom cilindra poznate zapremine	141	64	28	10	129	SRPS U.B1.013
9.	Određivanje modula deformacije pomoću opterećenja kružnom pločom - E_{v1} - E_{v2}	138	66	34	9	134	SRPS U.B1.047
10.	Određivanje modula stišljivosti metodom kružne ploče - M_s	153	66	30	9	134	SRPS U.B1.046

Parametri zbijanja i nosivosti završnog sloja nasipa dobijeni laboratorijskim i *in situ* ispitivanjima tokom izgradnje nasipa predmetne lokacije su statistički obrađeni i grafički prikazani u 5. poglavlju.

4.1.2 Krupnozrni materijali

U ovom poglavlju analizirani su rezultati za dve vrste konstrukcije podloge – nasip i posteljica i dve vrste materijala (pesak i šljunak). Isti materijali su korišćeni za laboratorijska i *in situ* ispitivanja. Za izgradnju donjih slojeva saobraćajnica od krupnozrnih materijala gore definisanih lokacija korišćen je pesak označen kao L2-S i L3-S i šljunak označen kao L4-G i L5-G.

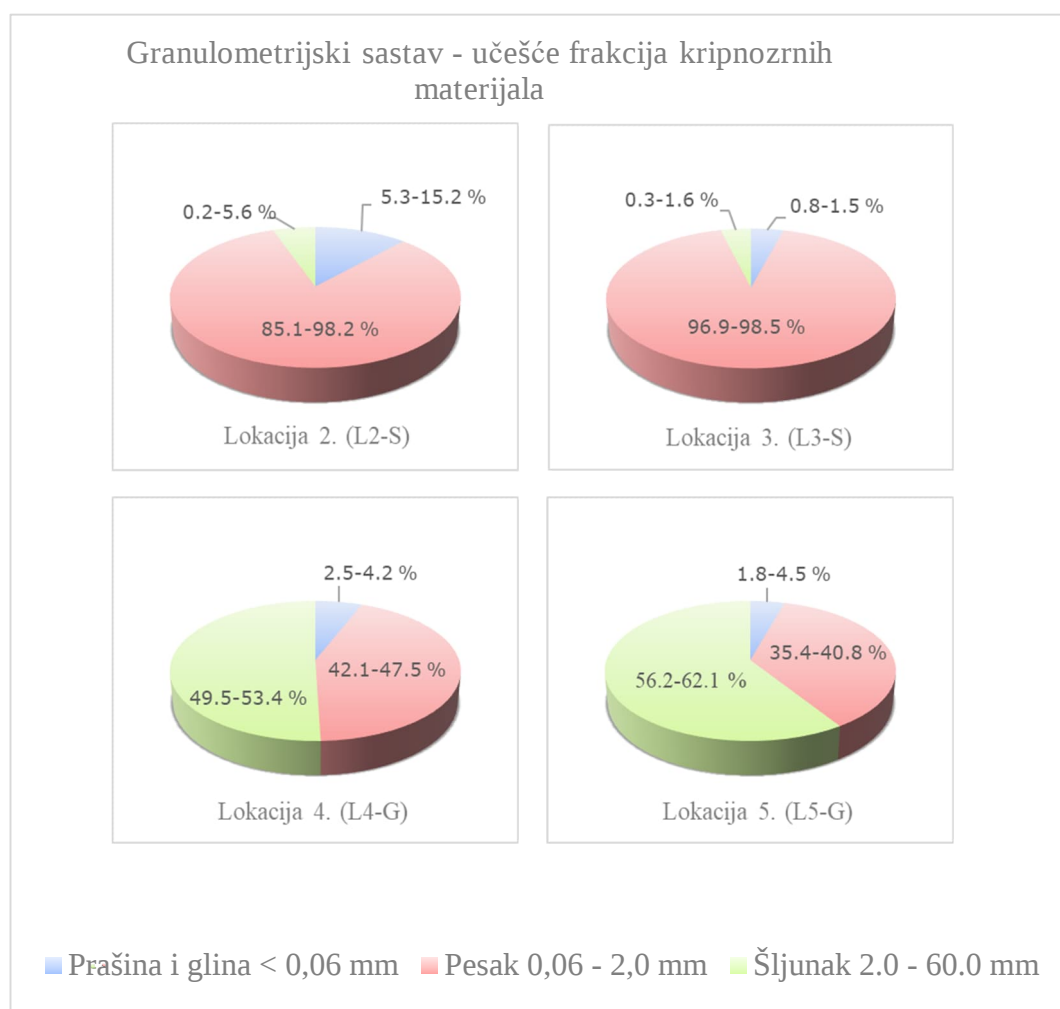


Slika 4.4. Granulometrijski sastav – reprezentativna analiza krupnozrnih materijala

Fizičko-mehaničke karakteristike materijala su definisane na osnovu prethodnih ispitivanja podobnosti za potrebe izgradnje slojeva podloge kolovoznih konstrukcija predmetnih lokacija. Analiza granulometrijskih sastava odabranih materijala prikazana je na Slikama 4.4 i 4.5. Materijali su neplastični i klasifikovani su prema AASHTO i Jedinstvenoj klasifikaciji tla – USCS, Tabela 4.5.

Tabela 4.5. Klasifikacija materijala

Materijali	Učešće				Prolaz %		Klasifikacija tla	
	glina i prašina %	pesak %	šljunak %	Drob %	sita - mm			
	< 0,06	0,06 - 2,0	2 - 60	> 60	0,075	0,425	Unified	AASHTO
L2 - S	5.3-15.2	85.1-98.2	0.2-5.6	-	8.2-16.8	87,5-91,2	SP	A ₃
L3 - S	0.8-1.5	96.9-98.5	0.3-1.6	-	1.3-2.6	76.3-80.1	SP	A ₃
L4 - G	2.2-4.2	42.1-47.5	49.5-53.4	-	2.7-4.5	20.1-27.2	GW	A _{1a}
L5 - G	1.8-4.5	35.4-40.8	56.2-62.1	-	1.9-4.9	10.3-18.5	GW	A _{1a}



Slika 4.5. Granulometrijski sastav – učešće frakcija krupnozrnih materijala

Fizičko-mehanička svojstva materijala, uključujući maksimalnu suhu zapreminsku težinu - γ_{dmax} i optimalnu vlažnost - w_{opt} korištenjem standardnog i modifikovanog Proktorovog opita, specifičnu težinu - γ_s , i kalifornijski indeks nosivosti – CBR urađena su u skladu sa važećim standardima, a prikaz rezultata dat je u Tabeli 4.6.

Tabela 4.6. Tabelarni prikaz fizičko-mehaničkih svojstava materijala

Materijali	Max. suva zapreminska težina i optimalna vlažnost		Specifična težina	Kalifornijski indeks nosivosti
	γ_{dmax}	W_{opt}	G_s	CBR
	kN/m ³	%	-	%
L2 - S	16,20 – 17,50*	14,2 - 17,5	2,65 - 2,67	-
L3 - S	16,00 – 16,50*	16.1 - 18.7	2.66 - 2.68	11 - 16
L4 - G	20,30 – 21,20**	6.2 - 7.7	2.68 - 2.70	35 - 45
L5 - G	20,80 – 21,60**	4.5 - 6.5	2.68 - 2.70	-
Proktorov opit: * Standardan, ** Modifikovan				

4.1.2.1 Lokacija 2. (L2-S) - Robna kuća IKEA, Beograd

Robna kuća IKEA u Beogradu predstavlja jedan od većih trgovačkih objekata izgrađenih u poslednje dve decenije u Srbiji. Za potrebe izgradnje objekta i pristupnih saobraćajnica u skladu sa tehničkim specifikacijama obavljena su vrlo obimna ispitivanja. U ovoj disertaciji je dat detaljan prikaz rezultata kontrole kvaliteta materijala i tekućih terenskih ispitivanja u procesu izgradnje nasipa. Ispitivanjima su blagovremeno otkrivane promene materijala u pogledu granulometrijskog sastava, čistoće, sadržaja štetnih materija i nosivih karakteristika.

Tabela 4.7. L2-S, Vrste i obim tekućih ispitivanja nasipa izgrađenih pristupnih saobraćajnica i parking prostora na lokaciji Robne kuće IKEA, Beograd

Red.br.	VRSTE TEKUĆIH ISPITIVANJA	BROJ ISPITIVANJA					Standard
		Slojevi nasipa					
		I	II	III	IV	V	
Izvedena tekuća laboratorijska ispitivanja							
1.	Određivanje sadržaja vode sušenjem u ventilisanoj sušnici	82	46	45	27	10	SRPS EN 1097-5
2.	Određivanje granulometrijskog sastava - metoda prosejavanja	88	46	45	27	10	SRPS EN 933-1
3.	Metode ispitivanja za lab. referentnu zapreminsku masu i sadržaj vode — Zbijanje po Proktoru	30	11	8	4	3	SRPS EN 13286-2
Izvedena „in situ“ ispitivanja							
4.	Određivanje vlažnosti	97	94	69	65	31	SRPS U.B1.012
5.	Određivanje zapreminske mase materijala tla sa porama metodom cilindra poznate zapremine	97	94	69	65	31	SRPS U.B1.013
6.	Određivanje modula deformacije pomoću opterećenja kružnom pločom - E _{v1} -E _{v2}	79	36	73	96	42	SRPS U.B1.047
7.	Određivanje modula stišljivosti metodom kružne ploče - Ms	7	94	2	-	-	SRPS U.B1.046

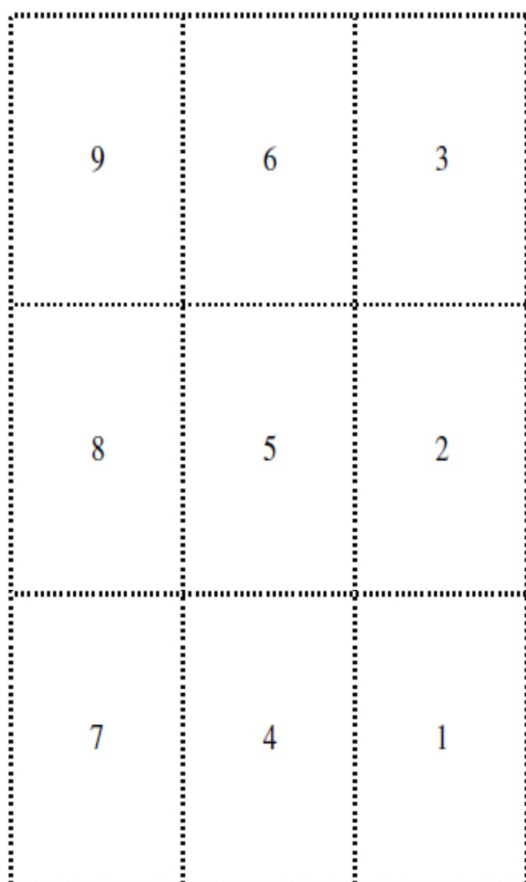
Za potrebe izgradnje Robne kuće IKEA u Beogradu izveden je nasip površine preko 1 hektara i prosečne visine 2,5 m. Isti je izveden u slojevima maksimalne debljine 0,5 m. Nasip je predstavljao tehnički vrlo složenu konstrukciju koja je tokom čitavog procesa izgradnje, a posebno izvođenja zahtevala stalno kontrolisanje. Tehničkim uslovima od strane projektanta bili su propisani: način ugradnje materijala, način ispitivanja svojstava materijala i definisani kriterijumi za ocenu kvaliteta materijala. Detaljan program kontrole kvaliteta predstavljao je ključni korak u postupku kontrolisanja. Isti je omogućio razradu tehničkih uslova i formiranje detaljnog plana osiguranja kvaliteta. Sva tekuća ispitivanja su obavljena u organizaciji tima TPA za obezbeđenje kvaliteta i inovacije d.o.o. iz Beograda.

Za potrebe izgradnje nasipa, izvršena su tekuća ispitivanja koja su obuhvatila: tekuću kontrolu kvaliteta i ugrađivanja materijala, tekuća terenska ispitivanja i izradu dokumentacije o sprovedenoj kontroli kvaliteta (Bogdanović i dr., 2017).

Laboratorijska kontrola predstavljala je redovna ispitivanja granulometrijskog sastava, postignutih zbijenosti i vlažnosti ugrađenih materijala u slojeve nasipa. Na ukupno 210 uzoraka izvršeno je određivanje vlažnosti uzorka tla i određivanje granulometrijskog sastava. Određivanje odnosa vlažnosti i suve zapreminske težine tla (Proktorov opit) izvršeno je na 56 uzoraka.

Sakupljeni podaci o vrstama i obimu ispitivanja izvedenih za svaki sloj nasipa su prikazani u Tabeli 4.7. i korišćeni u disertaciji za određivanje parametara zbijanja i nosivosti.

Probna deonica je izvedena za II sloj nasipa, u dužini od 60 m i širini od 30 m. Izrada probne deonice imala je za cilj da pruži dokaz da se može izvesti sloj nasipa debljine $d = 50$ cm u kvalitetu prema zahtevima tehničkih uslova ovog projekta. Raspored probnih polja prikazan je na Slici 4.6.



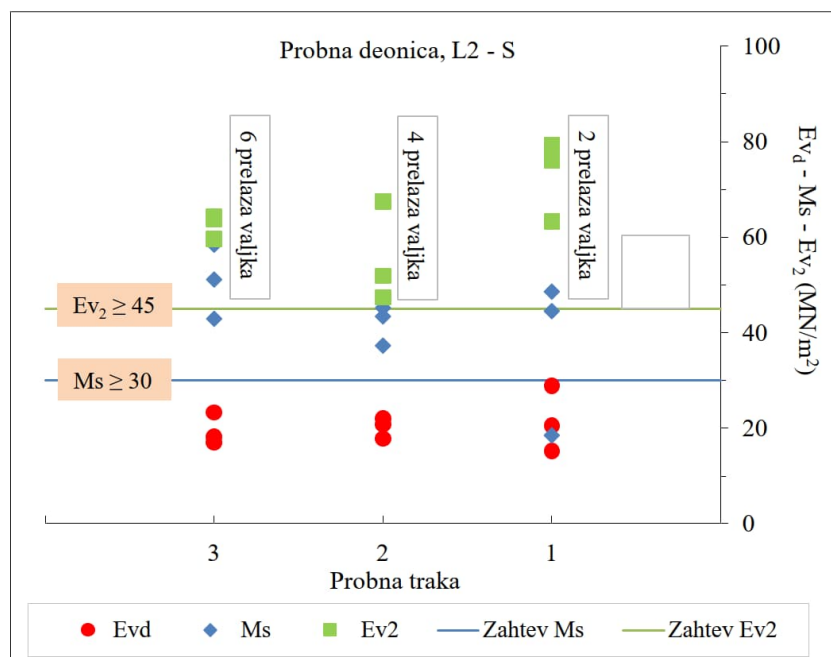
Slika 4.6. Šematski prikaz izgleda probnog polja (Robna kuća IKEA, 2016)

Tabela 4.8. Rezultati ispitivanja, stepen zbijenosti (R_c) i vlažnosti (w) na probnoj deonici

m.m. polje	Lokacija ispitivanja	Preth. ispitivanja		Ispitivanja uzoraka		Stepen zbijenosti Rc - %		Zadovoljava kriterijume
		γ_d max (kN/m ³)	W _{opt} (%)	γ_d (kN/m ³)	w (%)			
						postignuto	zahtevano	
1	pr. 29 i dopunski pr. 10	16,6	17,0	16,70	10,0	100,6	98,0	da
	pr. 29 i dopunski pr. 10 (-0.25m)			16,24	6,7	97,8		ne
2	pr. 29 i dopunski pr. 8			16,28	7,4	98,1		da
	pr. 29 i dopunski pr. 8 (-0.25m)			16,26	7,4	98,0		da
3	pr. 29 i dopunski pr. 6			16,33	18,6	98,4		da
	pr. 29 i dopunski pr. 6 (-0.25m)			16,32	13,3	98,3		da
4	pr. 28 i dopunski pr. 10			16,44	10,5	99,0		da
	pr. 28 i dopunski pr. 10 (-0.25m)			16,31	9,6	98,3		da
5	pr. 28 i dopunski pr. 8			16,42	12,0	98,9		da
	pr. 28 i dopunski pr. 8 (-0.25m)			16,33	13,3	98,4		da
6	pr. 28 i dopunski pr. 6			16,33	10,9	98,4		da
	pr. 28 i dopunski pr. 6 (-0.25m)			16,52	12,3	99,5		da
7	pr. 27 i dopunski pr. 10			16,32	10,3	98,3		da
	pr. 27 i dopunski pr. 10 (-0.25m)			16,21	10,3	97,7		ne
8	pr. 27 i dopunski pr. 8			15,81	23,1	95,2		ne
	pr. 27 i dopunski pr. 8 (-0.25m)			16,22	14,3	97,7		ne
9	pr. 27 i dopunski pr. 6			15,82	25,5	95,3		ne
	pr. 27 i dopunski pr. 6 (-0.25m)			15,88	24,0	95,7		ne

Materijal u svakoj traci (širine 20,0 m) sabijao se različitim brojem prelaza valjka (ježa). Broj prelaza iznosio je - 2 (polja 1, 2 i 3), 4 (polja 4, 5 i 6) i 6 puta (polja 7, 8 i 9), uz jedno dodatno sabijanje kompaktorom u svakom polju. Uporedo sa ispitivanjem stepena zbijenosti i vlažnosti nasutog materijala, ispitivani su i moduli stišljivosti (M_s), moduli deformacije (E_{v1} - E_{v2}) i dinamički moduli deformacije (E_{vd}). U Tabeli 4.8 prikazani su rezultati ispitivanja stepena zbijenosti i vlažnosti koja se menjala na različitim pozicijama probnog polja.

Rezultati ispitivanja deformabilno nosivih karakteristika zbijenog sloja nasipa grafički su prikazani na Slici 4.7.



Slika 4.7. Grafički prikaz rezultata dinamičkog i statičkog modula (E_{vd} , M_s i E_{v2}) u zavisnosti od broja prelaza valjka

Dobijeni parametri zbijanja, nosivosti i vlažnosti materijala II sloja nasipa na probnoj deonici pokazali su da se sa korišćenom mehanizacijom i tehnološkim postupkom nasipanja, razastiranja i sabijanja, nakon 4 prelaza mogu zadovoljiti zahtevi definisani tehničkim uslovima za dati objekat.

4.1.2.2 Lokacija 3. (L3-S) - Intermodalni terminal "Batajnica"

Kompleks Intermodalnog terminala i Logističkog centra se prostire na oko 82,5 hektara, na prostranoj zaravni između železničke stanice Batajnica i autoputa E75. Lokacija u Batajnici je izabrana zbog ukrštanja železničko drumskog Koridora 10, kao i blizine aerodroma.

Pre izrade nasipa uklonjen je površinski sloj humusa debljine oko 50 cm i geotehničkim ispitivanjima je dokazan kvalitet temeljnog tla (podtlo).

Izrada nasipa koji je i predmet analize, obuhvatala je nasipanje, razastiranje, grubo odnosno fino planiranje, kvašenje i zbijanje materijala, prema uslovima određenim u projektu tj. prema tehničkim uslovima i odredbama SRPS U.E1.010 koji se odnose na zemljane radove na izgradnji puteva u Srbiji. Sloj neposredno ispod posteljice predstavljao je završni sloj nasipa i predmet je analize u ovoj disertaciji. Na predmetnoj lokaciji nova kolovozna konstrukcija saobraćajne površine položena je na nasipu i sastojala se od slojeva prikazanih na Slici 4.8a.

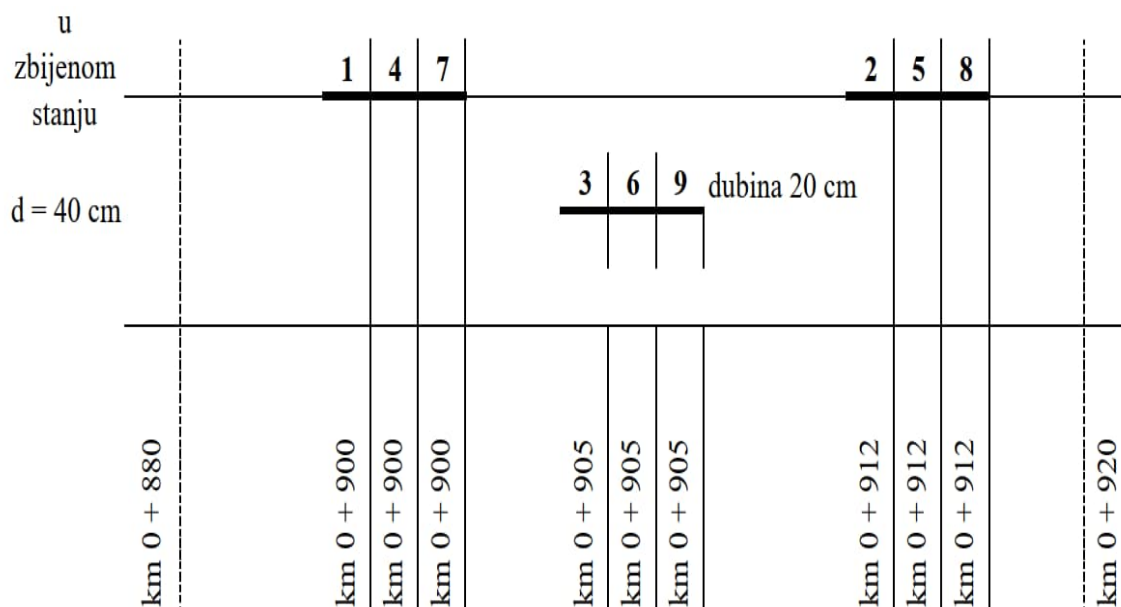
Provere parametara zbijanja i nosivosti su rađene na pripremljenim slojevima nasipa u obimu definisanim programom ispitivanja. Nasip je izgrađen u slojevima u zavisnosti od konfiguracije terena (1-5 sloja) debljine od po 0,4 m. Svaki sloj je zbijan valjkom sa 5 prelaza čiji je broj prethodno utvrđeni na probnoj deonici, Slika 4.8b.

a)	AB 11s, PmB. 45/80-75	4,0 cm
	BNS 22s A, Bit. 50/70	7,0 cm
	BNS 22s A, Bit. 50/70	7,0 cm
	DKA 0/31,5 mm	20,0 cm
	DKA 0/63 mm	25,0 cm
	POSTELJICA DKA 0/63 mm	30,0 cm
	NASIP Refulisani pesak	do 2,5 m
----- TEMELJNO TLO -----		



Slika 4.8. a) Šematski prikaz kolovozne konstrukcije sa podlogom; b) Pripreme sloja nasipa na probnoj deonici pristupne saobraćajnice (Intermodalni terminal "Batajnica", 2020)

Na slici 4.9 šematski je prikazan raspored mernih mesta zbijenog sloja nasipa (I-sloj) na probnoj deonici. Rezultati stepena zbijenosti (R_c) su dobijeni u intervalu 100,1-101,1 % čime je postignuta zahtevana vrednost 100 (± 2) %.



Slika 4.9. Ispitivanje stepena zbijenosti (R_c) raspored mernih mesta zbijenog sloja nasipa (I sloj) na pronoj deonici

Uporedo sa ispitivanjem stepena zbijenosti i vlažnosti nasutog materijala, ispitivan je i modul deformacije (E_{v1} - E_{v2}). Prikaz rezultata je dat u Tabeli 4.9.

Tabela 4.9. L3-S, Probna deonica, prikaz rezultata ispitivanja modula deformacije

m.m. polje	Lokacija ispitivanja		Modul deform. - E_v (Mpa)			
	Stacionaža (km)	Položaj (m)	E_{v1}	E_{v2}	E_{v2}/E_{v1}	zahtev E_{v2}
		desno				
1	O3, 0+900	2,0	15,3	48,5	3,17	40,0
	O3, 0+900	7,0	15,2	48,4	3,18	40,0
	O3, 0+900	12,0	21,6	51,6	2,39	40,0
2	O3, 0+912	2,0	14,6	46,9	3,21	40,0
	O3, 0+912	7,0	14,8	45,3	3,06	40,0
	O3, 0+912	12,0	15,4	49,3	3,20	40,0

Sakupljeni podaci o vrstama i obimu ispitivanja izvedenih za završni sloj nasipa su prikazani u Tabeli 4.10. i korišćeni u disertaciji za određivanje parametara zbijanja i nosivosti.

Tabela 4.10. L3-S, Vrste i obim tekućih ispitivanja završnog sloja nasipa izgrađenog Intermodalnog Terminala u Batajnici

Red. br.	ZAVRŠNI SLOJ NASIPA -Vrste tekućih ispitivanja-	Broj ispitivanja	Standard
Izvedena laboratorijska ispitivanja			
1.	Određivanje vlažnosti	22	SRPS EN ISO 17892-1
2.	Određivanje granulometrijskog sastava	22	SRPS EN ISO 17892-4
3.	Metode ispitivanja za lab. referentnu zapreminsku masu i sadržaj vode — Zbijanje po Proktoru	6	SRPS EN 13286-2
4.	Određivanje prisustva humusa	6	SRPS EN 1744-1

Izvedena „in situ“ ispitivanja			
5.	Određivanje zapreminske mase materijala tla sa porama metodom cilindra poznate zapremine	131	SRPS U.B1.013
6.	Određivanje modula deformacije pomoću opterećenja kružnom pločom - E_{v1} - E_{v2}	127	SRPS U.B1.047

U poglavlju 5. je dat detaljan prikaz statistički obrađenih rezultata kontrole kvaliteta materijala i tekućih terenskih ispitivanja u procesu izgradnje završnog sloja nasipa od refulisanog peska.

4.1.2.3 Lokacija 4. (L4-G) - Petlja Batajnica (Autoput E75)

Petlja Batajnica, ukupne dužine 3,5 km omogućuje direktan izlaz na auto-put E75, vezu sa starim novosadskim putem i logističkim centrom za intermodalni transport. Projekat petlje Batajnica obuhvtao je izgradnju saobraćajnica, uključujući nadvožnjak preko pruge, infrastrukturne instalacije kao i saobraćajnu signalizaciju. Završetak radova je značajan za Zemun i sva okolna naselja, kao i za sve opštine koje se naslanjaju na ovu saobraćajnicu. U okviru ove disertacije izvršena je analiza tekućih i novih dodatnih istraživanja podloge (posteljičnog sloja) saobraćajnica na delu Batajničkog bulevara i saobraćajnice I reda (Slika 4.10).

Da bi se dokazalo da se angažovanim sredstvima (mekanizacijom) i tehnologijom ugrađivanja materijala može izvesti posteljični sloj debljine 20 cm u kvalitetu prema Projektu za izvođenje urađena je probna deonica. Dovoženje i nasipanje materijala za posteljicu je obavljeno nakon izgradnje nasipa. Navoženje i nasipanje materijala je vršeno ravnomernom raspodelom vozila po širini prethodno pripremljenog sloja. Razastiranje materijala je vršeno u horizontalnom smeru u sloju debljine 0,25 m u rastresitom stanju. Pre zbijanja, materijal je pripremljen do skoro optimalnog sadržaja vlage, što su uslovi na licu mesta dozvoljavali. Proces sabijanja bio je potpuno kontrolisan tako da površina posteljičnog sloja nije rastrešena tokom pripremnih radova. Uslovi unutar dubinskog opsega ispitivane lokacije pretpostavljeni su kao pouzdani i homogeni. Materijal u svakoj traci sabijao se različitim brojem prelaza valjka. Broj prelaza iznosio je 2, 3 i 4 (Slika 4.11).

AB 11s, PmB. 45/80-65	5,0 cm
BNS 32s A, Bit. 50/70	9,0 cm
DKA 0/31,5 mm	20,0 cm
DKA 0/63 mm	20,0 cm
POSTELJICA Krupnozorni materijal Šljunak	20,0 cm
NASIP Refulisani pesak	do 1,0 m
TEMELJNO TLO	



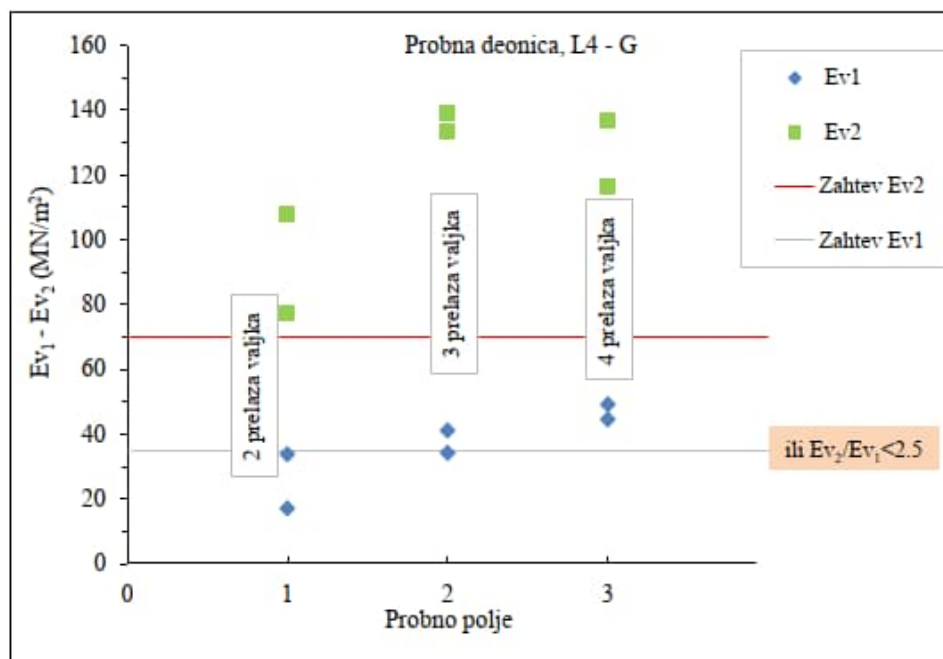
Slika 4.10. Šematski prikaz kolovozne konstrukcije sa podlogom i izgled pripremljenog posteljičnog sloja na Petlji Batajnica (Autoput E75)

U Tabeli 4.11 prikazani su rezultati ispitivanja modula deformacije na različitim pozicijama probnog polja.

Tabela 4.11. Rezultati ispitivanja modula (E_{v1} - E_{v2}) na probnoj deonici posteljičnog sloja

M.mesto	Lokacija ispitivanja			Modul deform. - E_v (Mpa)				Broj prelaza
	Stacionaža (km)	Položaj pr. osi (m)		E_{v1}	E_{v2}	E_{v2}/E_{v1} (< 2,5)	zahtev E_{v2}	
		levo	desno					
1	0+920,0	6,0		33,8	107,8	3,19	70,0	2
	0+930,0	6,0		17,1	77,2	4,51	70,0	2
2	0+920,0		3,0	41,1	139,2	3,39	70,0	3
	0+930,0		3,0	34,2	133,5	3,90	70,0	3
3	0+920,0	3,0		44,6	116,5	2,61	70,0	4
	0+930,0	3,0		49,2	137,1	2,79	70,0	4

Dobijeni rezultati modula deformacije E_{v1} - E_{v2} posteljičnog sloja na probnoj deonici pokazali su da se sa korišćenom mehanizacijom i tehnološkim postupkom nasipanja, razastiranja i sabijanja, nakon 4 prelaza, posteljica može graditi u sloju debljine 0,2 m. U skladu sa tehničkim uslovima za predmetni objekat traženi odnos E_{v2}/E_{v1} nije bio odlučujući za ocenu nosivosti ugrađenog sloja šljunkovitog materijala iz razloga jer je vrednost statičkog deformacionog modula E_{v1} prelazila 50% tražene vrednosti statičkog def. modula E_{v2} (Slika 4.11).



Slika 4.11. Grafički prikaz rezultata modula deformacije (E_{v1} - E_{v2}) u zavisnosti od broja prelaza valjka

Za potrebe izgradnje posteljičnog sloja, koji predstavlja završni sloj podloge kolovozne konstrukcije gore pomenutih saobraćajnica u skladu sa tehničkim uslovima izvršena su tekuća ispitivanja. Ispitivanja su obuhvatala kontrolu kvaliteta i ugrađivanja šljunkovitog materijala kao i terenska ispitivanja radi definisanja parametara zbijanja i nosivosti.

Zbirni podaci o vrstama i obimu ispitivanja izvedenih za posteljični sloj su prikazani u Tabeli 4.12.

*Tabela 4.12. L4-G, Vrste i obim ispitivanja posteljičnog sloja izgrađene
Petlje Batajnica (Autoput E75) u Beogradu*

Red .br.	POSTELJICA -Vrste ispitivanja-	Broj ispitivanja	Standard
Izvedena laboratorijska ispitivanja			
1.	Određivanje sadržaja vode sušenjem u ventilisanoj sušnici	14	SRPS EN 1097-5
2.	Određivanje granulometrijskog sastava - metoda prosejavanja	14	SRPS EN 933-1
3.	Metode ispitivanja za lab. referentnu zapreminsku masu i sadržaj vode — Zbijanje po Proktoru	7	SRPS EN 13286-2
Izvedena „in situ“ ispitivanja			
4.	Određivanje zapreminske mase materijala tla sa porama metodom kalibrisanog peska	46	SRPS U.B1.015
5.	Određivanje modula deformacije pomoću opterećenja kružnom pločom - E_{v1} - E_{v2}	46	SRPS U.B1.047
6.	Određivanje dinamičkog modula deformacije metodom kružne ploče – E_{vd}	46	ASTM E2385-11

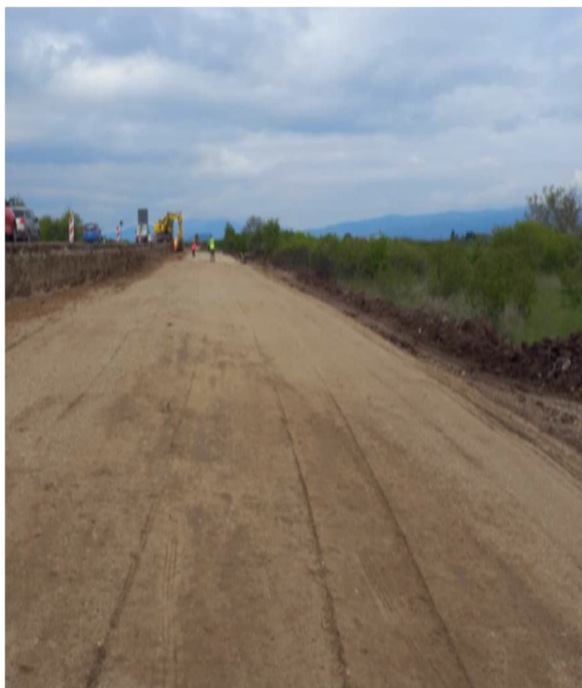
Na pomenutoj lokaciji na posteljičnom sloju izvršena su i dodatna ispitivanja. Ispitivanja su pored konvencijalnih metoda obuhvatila i ispitivanje pomoću dinamičkog CBR_d uređaja, poglavlje 4.2. Na osnovu dobijenih rezultata u poglavlju 7. priložene su određene korelacione zavisnosti sa parametrima dobijenim standardnim postupcima, što predstavlja poseban doprinos, jer upotreba ovog novog uređaja još uvek nije standardizovana.

4.1.2.4 Lokacija 5. (L5-G) - Autoput E-80: Deonica Merošina – Merošina 1

Deonica Merošina – Merošina 1 je deo autoputa E-80 Niš-Merdare, saobraćajnice od visokog prioriteta i značaja za zemlju. Autoput E-80 deo je trase puta koji povezuje Bugarsku i Jadransko more preko Srbije i Albanije. Za potrebe doktorske disertacije korišćeni su podaci dobijeni laboratorijskim i *in situ* ispitivanjima donjeg sloja saobraćajnice (završni sloj nasipa) na deonici od km 3 + 900 do km 4 + 750.

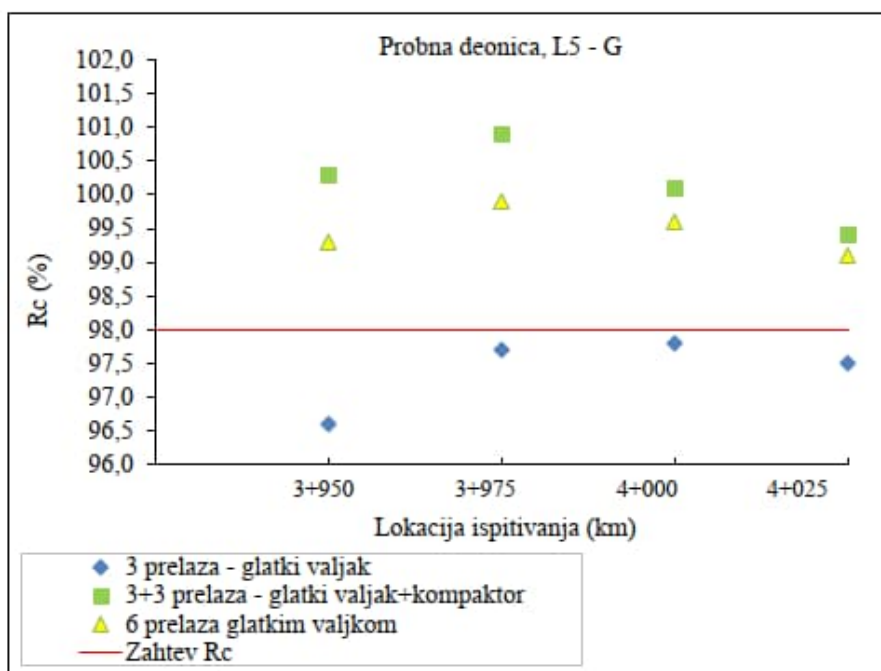
Novoprojektovana fleksibilna kolovozna konstrukcija na voznoj, preticajnoj i zaustavnoj traci sastojala se iz zastora od AB 11s sa bitumenom PmB 45/80-65 debljine 4 cm, gornje podloge od bitumeniziranog nosećeg sloja BNS 22s A sa bitumenom PmB 45/80-65 debljine 7 cm i bitumeniziranog nosećeg sloja BNS 22s A sa bitumenom BIT 50/70 debljine takođe 7 cm. Donja podloga je urađena iz dva sloja. Gornji sloj je izgrađen od drobljenog kamenog agregata 0/31.5 mm debljine 20 cm, dok je donji sloj izgrađen od drobljenog kamenog agregata 0/63 mm debljine 25 cm.

AB 11s, PmB. 45/80-65	4,0 cm
BNS 22s A, PmB. 45/80-65	7,0 cm
BNS 22s A, Bit. 50/70	7,0 cm
DKA 0/31,5 mm	20,0 cm
DKA 0/63 mm	25,0 cm
POSTELJICA DKA 0/63 mm	30,0 cm
NASIP Krupnozrni materijal Šljunak	do 2,0 m
TEMELJNO TLO	



Slika 4.12. Šematski prikaz kolovozne konstrukcije sa podlogom i izgled pripremljenog sloja završnog sloja nasipa na Deonica Merošina – Merošina 1

Podloga kolovozne konstrukcije obuhvatala je posteljični sloj od drobljenog kamenog agregata 0/63 mm debljine 30 cm i slojeve nasipa izgrađenog od prirodnog šljunkovitog materijala debljine do 2,0 m. Završni sloj nasipa je predmet analize ove disertacije (Slika 4.12). Razastiranje materijala je vršeno u sloju debljine 45 cm u rastresitom stanju tj. debljina pripremljenog sloja za *in situ* ispitivanja iznosila je 40 cm.



Slika 4.13. Grafički prikaz rezultata stepena zbijenosti (R_c) u zavisnosti od broja prelaza valjka (L5-G)

Izrada probne deonice pružila je dokaz da se angažovanim sredstvima (mehanizacijom) i tehnologijom ugrađivanja materijala može izvesti završni sloj nasipa u kvalitetu prema zahtevima tehničkih specifikacija ovog projekta. Rezultati zavistnosti stepena zbijenosti (R_c) i broja prelaza valjka prikazani su grafički, Slika 4.13.

Po zbijanju slojeva vršena je provera stepena zbijenosti, nosivosti i vlažnosti nasutog materijala. Vlažnost materijala je određivana prema SRPS EN 1097-5, stepen zbijenosti u skladu sa SRPS U.B1.015, dok su parametri nosivosti određeni u skladu sa SRPS U.B1.047 i ASTM E2385-11.

Tabela 4.13. L5-G, Vrste i obim ispitivanja završnog sloja nasipa na lokaciji autoputa E-80 Niš-Merdare, Deonica Merošina – Merošina 1 od km 3+900 do 4+750

Red. br.	ZAVRŠNI SLOJ NASIPA Vrste tekućih ispitivanja	Broj ispitivanja	Standard
Izvedena laboratorijska ispitivanja			
1.	Određivanje sadržaja vode sušenjem u ventilisanoj sušnici	8	SRPS EN 1097-5
2.	Određivanje granulometrijskog sastava - metoda prosejavanja	8	SRPS EN 933-1
3.	Metode ispitivanja za lab. referentnu zapreminsku masu i sadržaj vode — Zbijanje po Proktoru	4	SRPS EN 13286-2
4.	Određivanje prisustva humusa	4	SRPS EN 1744-1
Izvedena „in situ“ ispitivanja			
5.	Određivanje zapreminske mase materijala tla sa porama metodom kalibrisanog peska	35	SRPS U.B1.015
6.	Određivanje modula deformacije pomoću opterećenja kružnom pločom - E_{v1} - E_{v2}	35	SRPS U.B1.047
7.	Određivanje dinamičkog modula deformacije metodom kružne ploče – E_{vd}	35	ASTM E2385-11

U Tabeli 4.13. prikazane su vrste i obim laboratorijskih i *in situ* metoda ispitivanja sa pratećim standardima koji su korišćeni za dobijanje parametara zbijanja i nosivosti tokom izgradnje završnog sloja nasipa na predmetnoj lokaciji.

Kontrola kvaliteta je osigurala visok procenat ispunjenosti projektovanih uslova građenja nasipa i blagovremeno otklonila negativne pojave pri građenju koje su bile od značaja za stabilnost kolovozne konstrukcije. U poglavljima 5. i 7. prikupljeni podaci laboratorijskih i terenskih ispitivanja dobijeni tokom građenja završnog sloja nasipa su statistički analizirani i korišćeni za dobijanje korelacionih zavisnosti parametara zbijanja i nosivosti.

4.2 Dodatna ispitivanja

Procena zbijanja i nosivosti konstrukcije odnosno čvrstoće sloja podloge obuhvata različite vrste laboratorijskih i terenskih ispitivanja za određivanje fizičko-mehaničkih svojstava i svojstava čvrstoće. Svako ispitivanje ima svoj značaj u proceni konstruktivnog kapaciteta kolovozne konstrukcije.

U inženjerskoj praksi, podloga kolovozne konstrukcije zahteva odgovarajuće zbijanje tla, koje se izvodi na osnovu prethodne analize rezultata standardnim i modifikovanim Procktorovim opitima. U zavisnosti od vrste konstrukcije podloge i fizičko-mehaničkih karakteristika za izgradnju donjih slojeva saobraćajnica koriste se različite vrste materijala. Treba voditi računa da se stepen zbijenosti (R_c) ne koristi kao jedini parametar za procenu zbijenosti materijala u donjim slojevima saobraćajnica. Ovo se odnosi i na sitnozrno i krupnozrno tlo čija propustljivost i mehanička svojstva zavise od sadržaja vlage prisutne tokom zbijanja. Iz tog razloga se za ove tipove tla Kalifornijski indeks nosivosti - CBR, koristi kao metod za procenu zbijenosti, pošto je pokazatelj nosivosti tla koji se široko koristi u projektovanju niskogradnje.

Svaki parametar čvrstoće ima svoju primenu, na primer, CBR vrednost je dominantni parametar u projektovanju kolovoza u mnogim zemljama čak kao preporučena metoda za karakterizaciju podloga. Modul deformacije (E_{v1} - E_{v2}) je dominantni parametar nosivosti tokom i nakon izgradnje donjih slojeva kolovoznog sistema, a stepen zbijenosti (R_c) je dominantni parametar koji se koristi za kontrolu zbijanja.

U okviru ove disertacije Kalifornijski indeks nosivosti CBR (dinamički CBR_d i statički CBR), statička kružna ploča - SPLT i dinamička kružna ploča - LWD korišćeni su za procenu svojstava zbijanja i nosivosti odabranog prirodnog materijala ugrađenog u završni sloj podloge – posteljice. Dinamička CBR_d ispitivanja su urađena u laboratoriji (CBR_{dl}) i *in situ* (CBR_{dt}). Cilj ovih dodatnih ispitivanja je bio da se za odabrani prirodni krupnozrni materijal dokaže upotreba CBR_d ispitivanja za procenu zbijanja i nosivosti slojeva podloge.

Sva ispitivanja su obavljena na prirodnom šljunkovitom materijalu uzorkovanom na privremenoj deponiji materijala, na lokaciji gradilišta Petlja Batajnica (Autoput E75) u Beogradu, Slika 4.14. Isti materijal korišćen je za laboratorijska i *in situ* ispitivanja.



Slika 4.14. Privremena deponija materijala – gradilište Petlja Batajnica (Autoput E75)

Tabela 4.14. Vrste i obim dodatnih ispitivanja posteljičnog sloja izgrađenog na lokaciji Petlja Batajnica (Autoput E75) u Beogradu

Red. br.	POSTELJICA -Vrste dodatnih ispitivanja-	Broj ispitivanja	Standard
Izvedena laboratorijska ispitivanja			
1.	Određivanje sadržaja vode sušenjem u ventilisanoj sušnici	5	SRPS EN ISO 17892-1
2.	Određivanje granulometrijskog sastava – metoda prosejavanja	5	SRPS EN ISO 17892-4
3.	Određivanje zapreminske mase i sadržaj vode — Zbijanje po Proktoru	5	SRPS EN 13286-2
4.	Određivanje Kalifornijskog indeksa nosivosti - CBR	14	SRPS EN 13286-47
5.	Određivanje dinamičkog kalifornijskog indeksa nosivosti - CBR _{dl}	14	TP BF-StB Teil B 8.3 TP BF-StB Teil B 7.1
Izvedena „in situ“ ispitivanja			
6.	Određivanje zapreminske mase materijala tla sa porama metodom kalibrisanog peska	31	SRPS U.B1.015
7.	Određivanje modula deformacije pomoću opterećenja kružnom pločom – E_{v1} - E_{v2}	31	SRPS U.B1.047
8.	Određivanje dinamičkog modula deformacije metodom kružne ploče – E_{vd}	93	ASTM E2835-11
9.	Određivanje dinamičkog kalifornijskog indeksa nosivosti - CBR _{dt}	93	TP BF-StB Teil B 8.3 TP BF-StB Teil B 7.1

U Tabeli 4.14. prikazane su vrste i obim dodatnih laboratorijskih i terenskih ispitivanja sa pratećim standardima koji su korišćeni za dobijanje parametara zbijanja i nosivosti tokom izgradnje posteljičnog sloja na predmetnoj lokaciji.

4.2.1 Laboratorijska ispitivanja

Sprovedena su laboratorijska CBR ispitivanja statičkim (klasičnim) i dinamičkim metodama kako bi se utvrdila veza između odnosa nosivosti i zbijanja krupnozrnog materijala – šljunka (Slika 4.15). Uzorci, zbijeni modifikovanim Proktorovim opitom, pripremljeni su bez potapanja u vodu kako bi se ponovili terenski uslovi tokom izgradnje posteljičnog sloja saobraćajnice.

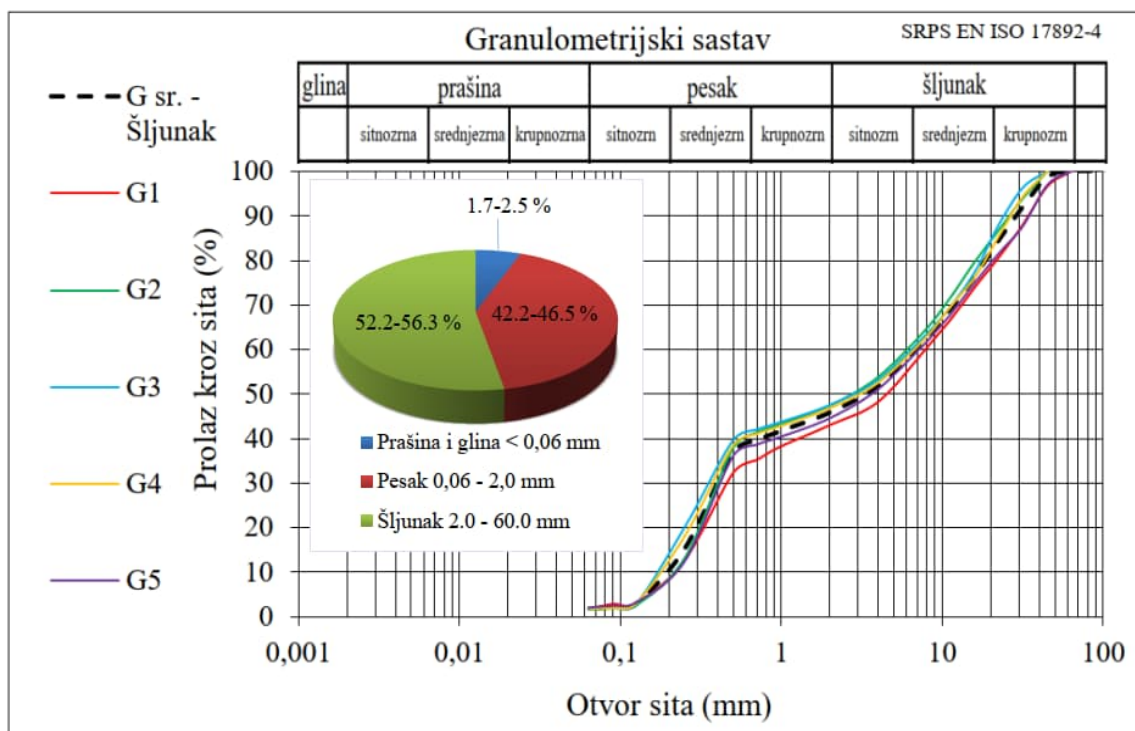
Ova ispitivanja su sprovedena da bi se procenila efikasnost LWD male težine za izračunavanje laboratorijskog kalifornijskog indeksa nosivosti (CBR_{dl}) i za procenu odnosa između izračunatog CBR_{dl} i karakteristika zbijanja ispitivanog materijala. Ispitivanje je jednostavan dodatak rutinskom Proktorovom opitu, pruža dobar uvid u reakciju tla na vodu i gustinu i može se koristiti za prilagođavanje kriterijuma zbijanja na terenu.



Slika 4.15. Uređaji za određivanje statičkog CBR-a i dinamičkog CBR_{dl}, TPA laboratorija u Beogradu

4.2.1.1 Definisanje fizičko-mehaničkih karakteristika

Određivanje granulometrijskog sastava vršeno je na pet reprezentativnih uzorka u skladu sa SRPS EN ISO 17892-4, Slika 4.16. Identifikaciono-klasifikaciona analiza uzoraka prirodnog materijala nije pokazala znatne razlike u granulometrijskom sastavu. Utvrđeno je da je materijal prirodno tlo, šljunak peskovit, neplastičan. Ima vrlo nizak sadržaj sitnih čestica, manje od 2.5 % prolaznog sita 0,063 mm.



Slika 4.16. Granulometrijski sastav i učešće krupnozrnog materijala uzorkovanog za potrebe dodatnih ispitivanja sa lokacije gradilišta Petlja Batajnica (Autoput E75)

Ispitivanjem materijala utvrđeno je učešće pojedinih frakcija (prašina i glina, pesak i šljunak). Korišćen materijal je klasifikovan prema AASHTO - (A_{1-a}) i Jedinstvenoj klasifikaciji tla USCS - (GW).

Osnovne karakteristike zbijenosti određene su standardnim (SP) i modifikovanim (MP) Proktorovim opitom u skladu sa standardom SRPS EN 13286-2. Ispitivanja su urađena zbijanjem pripremljenih uzoraka u cilindričnom kalupu prečnika 150,0 mm.

Ispitivanjem materijala utvrđena je suva maksimalna zapreminska težina γ_{dmax} (SP) = 19,8 – 20,1 kN/m³, γ_{dmax} (MP) = 20,8 – 21,0 kN/m³ pri optimalnim vlažnostima w_{opt} (SP) = 7,6 – 8,0 %, vlažnostima w_{opt} (MP) = 6,7– 7,1 %.

4.2.1.2 Priprema uzoraka i postupak ispitivanja

Paralelno sa izradom uzoraka za ispitivanje dinamičkog laboratorijskog CBR_{dl} vršena je izrada uzoraka za ispitivanje statičkog CBR-a. Za obe metode ispitivanja priprema reprezentativnih uzoraka je vršena pri istim standardnim i modifikovanim energijama zbijanja po Proktoru sa različitim vlažnostima koja se kretala u opsegu 0-12 %, da bi se uspostavio odnos vode i zapreminske težine i odgovarajući CBR_{dl} za svaki uzorak nakon procene svojstava zbijanja.

Tokom ispitivanja zbijanja pojedinačni uzorci šljunka korišćeni su samo jednom, inače se ne bi mogli smatrati reprezentativnim. Izabrani opseg vlažnosti odgovarao je nezasićenom stanju kako bi se stvorili terenski uslovi tokom određivanja parametara zbijenosti i nosivosti sloja podloge – posteljice. Svi uzorci obuhvatali su obe vrste CBR ispitivanja – statičku i dinamičku, i bili su opterećeni u skladu sa standardom 13286-47 koji preporučuje opterećenje od 2,44 kPa (4,54 kg).

Statičko (klasično) CBR ispitivanje je urađeno direktno na uzorcima šljunkovitog materijala nakon zbijanja. Kao rezultat toga, prihvaćena je veća CBR vrednost.

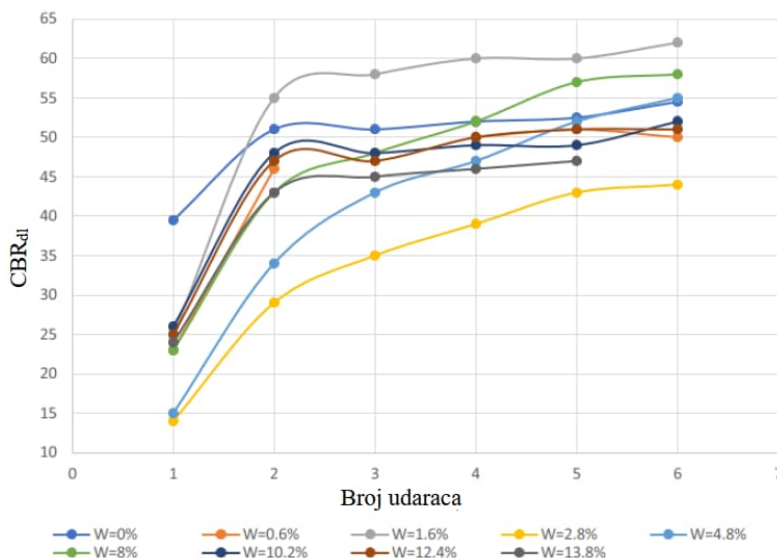
Dinamička CBR_{dl} ispitivanja su sprovedena korišćenjem LWD uređaja koji se sastojao od padajućeg teža težine (7,07 kN) koji se vertikalno pomerao duž šipke za navođenje i proizvodio pritisak (3,6 MN/m²) na CBR klip. Elektronski merni sistem je izmerio dubinu prodiranja klipa u ispitivani materijal nakon jednog udarca. Pojedinačni koraci pripreme uzorka i postupka ispitivanja u laboratoriji TPA u Beogradu prikazani su na Slci 4.17. Dinamičke vrednosti CBR_{dl} određene su korišćenjem jenačina (3.6) i (3.7) koje su prikazane u poglavlju 3.4.3.



Slika 4.17. Pojedinačni koraci pripreme uzoraka i postupka ispitivanja dinamičkog CBR_{dl} u laboratoriji TPA u Beogradu

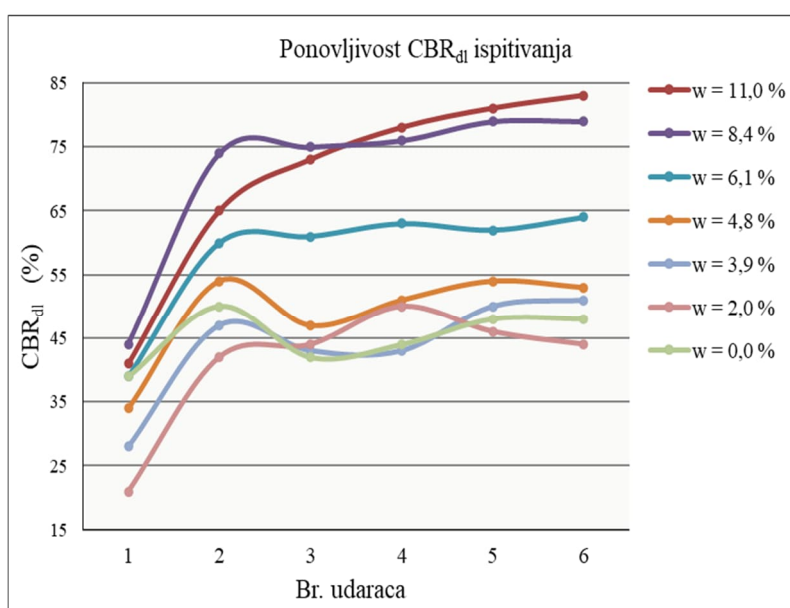
4.2.1.3 Ponovljivost laboratorijskog CBR_{dl} ispitivanja

Iz razloga uspostavljanja odgovarajućih korelacionih zavisnosti parametara laboratorijskog dinamičkog kalifornijskog indeksa nosivosti (CBR_{dl}) sa parametrima modifikovanih Proktorovih ispitivanja (γ_d - suva zapreminska težina, w - vlažnost) odnosno sa ispitivanjima statičkog kalifornijskog indeksa nosivosti (CBR), izvršena je ponovljivost ispitivanja. Ispitivanja su rađena kako bi se procenila ponovljivost merenja na uzorcima šljunkovitog materijala i definisale vrednosti CBR_{dl} koje su korišćene za korelacionu analizu. Dina Kuttah (2019) je u svojoj studiji, da bi procenila ponovljivost ispitivanja, pokazala kako broj udaraca utiče na vrednosti CBR_{dl} peskovitog materijala. Na Slici 4.18 se vidi da sa povećanjem broja udaraca postepeno i raste vrednost merenih rezultata.



Slika 4.18. Uticaj broja udaraca padajućeg teža na laboratorijske dinamičke vrednosti CBR_{dl} pri različitim sadržajima vode peskovitog uzorka (Dina Kuttah, 2019)

U okviru ovog rada ponovljivost laboratorijskog dinamičkog CBR_{dl} izvršena je do šest udaraca na svakom ispitivanom uzorku materijala L4-G, Slika 4.19. Rezultati ispitivanja su statistički analizirani i razmatrani u nastavku ovog poglavlja.



Slika 4.19. Uticaj uzastopnih udaraca padajućeg teža na laboratorijske dinamičke vrednosti CBR_{dl} pri različitim sadržajima vode, L4-G

Sa Slike 4.19 se jasno može zaključiti da se najveći porast vrednosti CBR_{dl} nalazi između prvog pada ($CBR_{dl,1}$) - predopterećenje i drugog pada ($CBR_{dl,2}$) za sve uzorke sa različitim sadržajima vlage. Ponovljenim ispitivanjima došlo se do zaključka da su se nakon predopterećenja, vrednosti dinamičkog CBR_{dl} ujednačili, i iz tog razloga udar predopterećenja ne treba uzimati u obzir.

Rezultati ispitivanja su pokazali da se CBR_{dl} značajno ne menja sa povećanjem broja udaraca. Zapaža se da vrednosti CBR_{dl} sa vlagama uzoraka blizu optimalnih $w_{opt} \pm 2,5\%$ imaju blagi trend povećanja nakon drugog udarca (mereni rezultat CBR_{dl}). Ovaj rastući trend ukazuje da uzorci imaju veću sposobnost pokazivanja zbijanja uzastopnim padanjem tega.

U radu su za potrebe korelacionih zavisnosti korišćeni rezultati ispitivanja dobijeni dinamičkim CBR_d uređajem nakon drugog udarca ($CBR_{dl,2}$).

4.2.2 Terenska ispitivanja

Disertacija je uključivala pored laboratorijskih sprovođenja i dodatnih terenskih ispitivanja na Lokaciji 4. - Petlja Batajnica (Autoput E75). Korišćena oprema za određivanje parametara E_{v1} - E_{v2} , E_{vd} , CBR_{dt} i R_c prikazana je na Slici 4.20. Ispitivanja su urađena na sloju posteljice izgrađene od prirodnog kamenog agregata – šljunka.

Sloj posteljice je urađen iznad sloja nasipa izgrađenog od prirodnog materijala (pesak) u slojevima (1-2 sloja) debljine od po 0,3 m. Svaki sloj nasipa je zbijan glatkim valjkom i kompaktorom sa 6 prelaza (3+3) koji su prethodno utvrđeni na probnoj deonici.



Slika 4.20. Korišćena oprema za određivanje parametara E_{v1} - E_{v2} , E_{vd} i CBR_{dt} pripremljenog sloja posteljice na lokaciji objekta Petlja Batajnica (Autoput E75) u Beograd

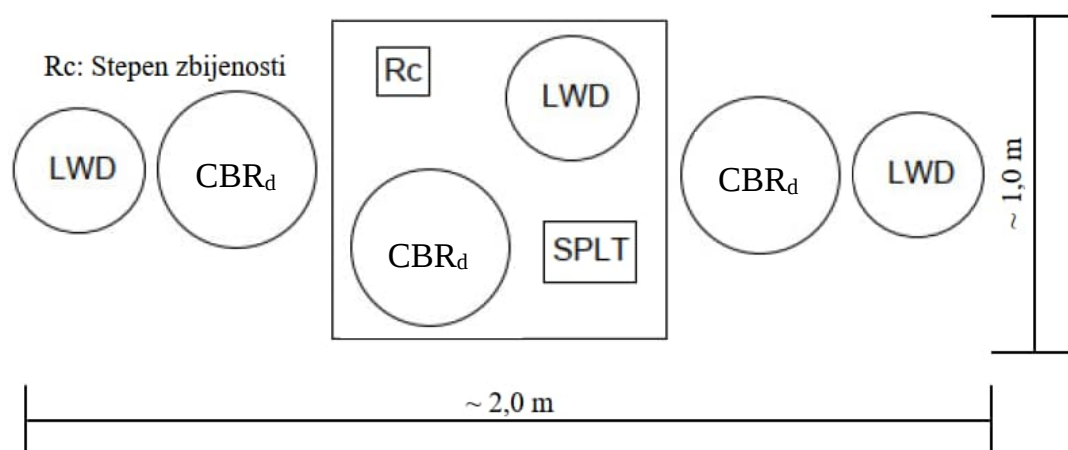
Za korelacione zavisnosti parametara zbijanja i nosivosti odabrana je kružna ploča prečnika 300 mm. Razlozi za to su, s jedne strane, što se ispitivanja s ovim prečnikom ploče najčešće koriste i što su sva tri uređaja bila dostupna s ovim prečnikom ploče. Uticaj dubine merenja je takođe identičan, što je neophodno za korelaciju bez nepotrebnih dodatnih faktora uticaja. Uticaj dubine ispitivanja opterećene ploče može se pretpostaviti dvostrukim prečnikom ploče. Ovo je poznati raspon moguće dubine uticaja standardnih proračuna sleganja. Pored toga, napominjem da se i u praksi najčešće koristi masa padajućeg tega od 10 kg.

Dovoženje i nasipanje materijala posteljičnog sloja je obavljeno nakon izgradnje nasipa. Navoženje i nasipanje materijala je vršeno ravnomernom raspodelom vozila po širini primljenog sloja.

Razastiranje je vršeno u sloju debljine 0,25 m u rastresitom stanju. Pre zbijanja, materijal je doveden do skoro optimalnog sadržaja vlage, što su uslovi na licu mesta dozvoljavali. Proces sabijanja bio je potpuno kontrolisan tako da površina sloja posteljice nije rastrešena tokom pripremnih radova. Uslovi unutar dubinskog opsega ispitivane lokacije pretpostavljeni su kao pouzdani i homogeni. Nakon 4 prelaza (2 prelaza valjka i 2 prelaza kompaktora), vršena su ispitivanja na sloju posteljice debljine 0,2 m u zbijenom stanju, što je potvrđeno i na probnoj deonici.

4.2.2.1 Vrste i postupak *in situ* ispitivanja

Na svakoj mikrolokaciji *in situ* ispitivanja obavljena su tri merenja terenskim dinamičkim CBR_{dt} uređajem i tri merenja dinamičkom kružnom pločom – LWD. Ispitivanje statičkom kružnom pločom – SPLT je takođe sprovedeno na svakoj mikrolokaciji kao referentno merenje. Suva zapreminska težina i sadržaj vlage dobijeni su pomoću uređaja sa konusom (uz pomoć kalibrisanog peska). Slika 4.21. opisuje raspored ispitivanja na terenu.



Slika 4.21. Raspored dodatnih ispitivanja na svakoj mikrolokaciji „*in situ*“

Razlog za izvođenje tri CBR_{dt} i LWD merenja na istoj mikrolokaciji ispitivanja je bila procena prosečne vrednosti i procena pouzdanosti ovih uređaja. U poglavlju 5. ove disertacije prikazane su prosečne vrednosti (μ), standardne devijacije (σ) i odgovarajući koeficijenti varijacija (C_v) *in situ* merenja. Kao što je već navedeno, pored prikazanih laboratorijskih zavisnosti, u poglavlju 7. su uspostavljene i korelacije parametara *in situ* ispitivanja posteljičnog sloja (L4-G) terenskog dinamičkog kalifonijskog indeksa nosivosti (CBR_{dt}) sa parametrima modula deformacije (E_{v1} - E_{v2}) i dinamičkog modula deformacije (E_{vd}).

5. DEFINISANJE PARAMETARA ZBIJANJA I NOSIVOSTI KORIŠĆENJEM STATISTIČKIH ANALIZA

Zbog brojnih uticaja koje nije moguće u celosti istražiti, a koji se mogu okarakterisati kao slučajni, može se smatrati da su rezultujuća svojstva nekog tla kao građevinskog materijala rezultat slučajnosti. To namaće upotrebu slučajne varijable, kao modela za njihovu analizu, što znači primenu statističkih metoda.

Parametri zbijanja i nosivosti donjih slojeva saobraćajnica koji su dobijeni istraživanjima, sređeni i obrađeni statističkim postupcima omogućuju potpuniju osnovu za interpretaciju, klasifikaciju ili rešavanje problema predviđanja kao i njihovu međusobnu korelacionu zavisnost što predstavlja i jedan od ciljeva ove disertacije.

Neki autori su upozoravali na nedovoljno korišćenje statističkih metoda u inženjerskoj geologiji i geotehnici (*Horvat i Škoro, 1982; Einstein i Baecher, 1982-1983*), ali ima i autora koji su ukazivali na slučajeve u kojima se upravo takvim pristupom mogu dopuniti istraživanja i tako doći do valjanih zaključaka (*Agterberg, 1974; Dementjev, 1980*).

Korišćenjem standardnih statističkih metoda, kojima se na posmatranim lokacijama procenjuju parametri zbijanja i nosivosti slojeva podloge kolovozne konstrukcije, moguće je sprovesti ispitivanje sličnosti lokacije.

Na taj se način može na lokacijama istovetne konstrukcije i vrste materijala smanjiti broj (opseg) ispitivanja, te se može znatno više posvetiti pažnja svojstvima materijala koja u prethodnim istraživanjima nisu bila podrobnije istražena, ili se, pak, mogu upotrebiti neke nestandardne metode istraživanja. Rezultati istraživanja sa sličnih lokacija (tj. sa približno istom kolovoznom konstrukcijom, vrstom materijala i metodologijom izgradnje) mogu poslužiti kao prva informacija o nosivim karakteristikama donjih slojeva saobraćajnica, a mogu biti i glavni izvor podataka za procenu traženih svojstava materijala.

Za potrebe disertacije, statistička obrada podataka je omogućila da se na osnovu laboratorijskih i terenskih ispitivanja proceni kvalitet i usvoje parametri zbijanja i nosivosti donjih slojeva saobraćajnica. Usvojeni parametri predstavljaju reprezent stvarnog stanja *in situ* i korišćeni su u korelacionim zavisnostima opisanim u poglavlju 7.

U ovom poglavlju biće prikazani osnovni statistički pojmovi kao i detaljna statistička analiza parametara zbijanja i nosivosti, dobijenih tekućim i dodatnim laboratorijskim i terenskim opitima na ispitivanim lokacijama izgradnje donjih slojeva saobraćajnica u Srbiji. Lokacije ispitivanja L1-C, L2-S, L3-S, L4-G i L5-G, nivoi podloge kolovozne konstrukcije i vrste materijala su detaljno opisane u prethodnom poglavlju.

5.1 Osnovni statistički podaci

Kvalitet dobijenih reprezentativnih vrednosti (srednja vrednost, standardna devijacija ili koeficijent varijacije) zavisi od načina izvođenja opita, broja ispitanih uzoraka ili opita, homogenosti ispitivanog materijala, veličine uzoraka i dr.

U opštem slučaju kada se definiše određena osobina nemoguće je ispitati neograničen broj probnih tela koja bi praktično predstavljala generalnu populaciju. Zbog toga se uzima tzv. statistički uzorak od (N) elemenata na kojima se vrši opit. Na osnovu statističke obrade ovog ograničenog broja rezultata nekog obeležja, donose se zaključci o njemu u generalnoj populaciji (*Elliot, A.C. i Woodward, W.A, 2007*).

Kada su izvršena laboratoriska ili terenska ispitivanja, kao njihov rezultat dobija se tzv. *osnovni statistički niz*. Za osnovni statistički niz, strogo uzevši, u matematičkom smislu ne može se reći da je to polazni (osnovni) statistički materijal.

Osnovni statistički niz se formira tako što se iz rapoložive nesređene statističke dokumentacije (npr.formulara) jednostavno preuzimaju podaci o jednom obeležju prema redosledu kako su dobijeni. Na ovaj način se dobija jedan neuređen niz podataka koji je potpuno neinformativan tj. na

osnovu njega je nemoguće uočiti zakonitosti koje postoje za date podatke (najčešće je nemoguće uočiti minimalne i maksimalne vrednosti, neočekivane ekstremne vrednosti i sl.). Da bi se na osnovu nesređenih podataka došlo do zaključka, potrebno je izvršiti statističku obradu koja omogućava da se dođe do parametara koji ukazuju na zakonitosti koje postoje u okviru datog niza.

Kada imamo puno podataka, prirodno je razmišljati o nekim važnim vrednostima koje opisuju te podatke. Tako nam, recimo, najveća i najmanja vrednost govore o rasponu podataka koje imamo, ali nam često oni nisu bitni. Važnija nam je vrednost kojoj je većina podataka bliska. Iz brojnih razloga danas se najčešće koristi aritmetička sredina.

Aritmetička sredina (ili *srednja vrednost* ili *prosek*), predstavlja jednu od osnovnih statističkih veličina, koja se izračunava pomoću jednačine:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N} \quad (5.1)$$

Gde je : μ - srednja vrednost

N - broj uzoraka

X_i - pojedinačno ispitivanje

Aritmetička sredina ukazuje na vrednosti oko koje se obično grupiše najveći broj rezultata. Ona na neki način reprezentuje parametre laboratorijskih i terenskih ispitivanja.

Standardna devijacija - je u statistici apsolutna mera disperzije u osnovnom skupu. Ona pokazuje, koliko u proseku elementi skupa odstupaju od aritmetičke sredine skupa. Označava se grčkim slovom sigma, (σ). Jednačina po kojoj se sračunava standardna devijacija glasi:

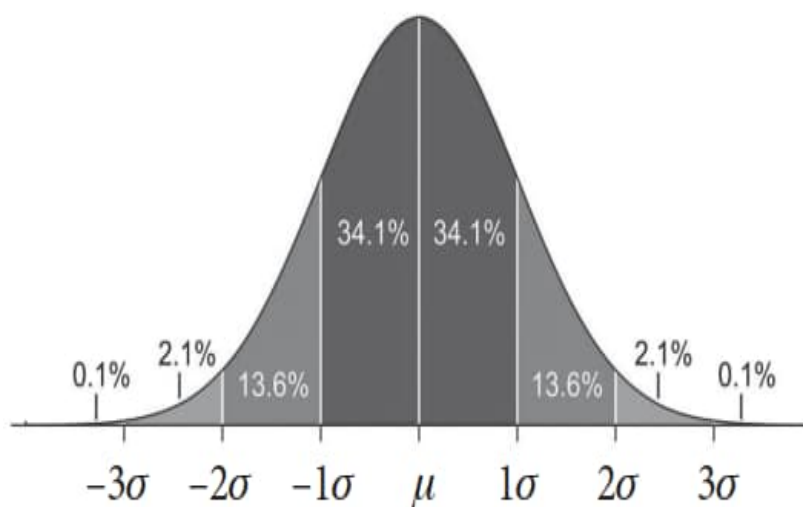
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \mu)^2}{N}} \quad (5.2)$$

Gde je: σ - standardna devijacija

N - broj elemenata u skupu

μ - aritmetička sredina skupa

X_i - član skupa ($i = 1, 2, \dots, N$)



Slika 5.1. Standardna normalna raspodela - procenat površine ispod Gaussove krive (Tvrtnko Tadić, 2017)

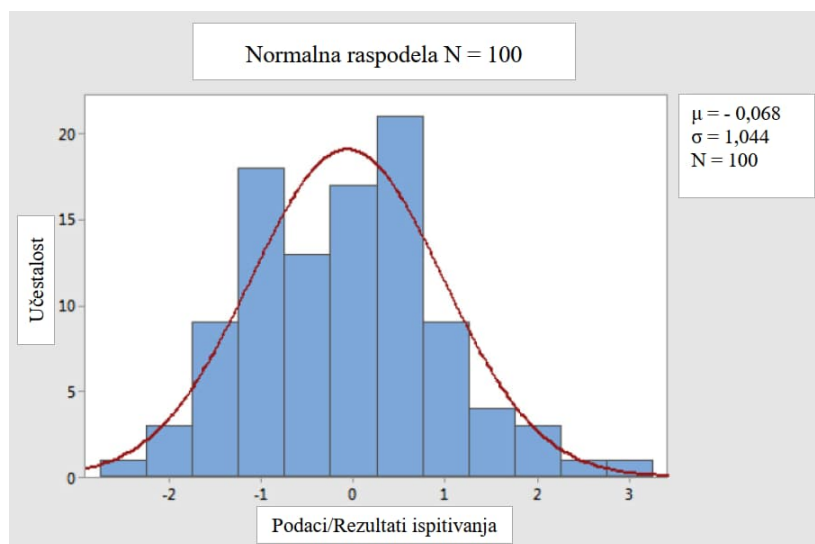
Standardna devijacija je mera rasipanja vrednosti slučajne promenljive oko matematičkog očekivanja (tj. srednje vrednosti) izražena u jedinicama u kojima je izražena i slučajna promenljiva. U praksi se (σ) ocenjuje iz podataka i očekuje se da vrednosti skoro svih merenja (preciznije, 99,7 % merenja) bude u intervalu ($\mu - 3\sigma$, $\mu + 3\sigma$). Pravilo tri sigme omogućava da se otkriju grube greške u merenju. Naime, podaci koji nisu u opsegu $\mu \pm 3\sigma$ su najverovatnije pogrešni (Merkle, 2010). Kriva zvonastog oblika, simetrična je oko vrednosti μ , proteže se u beskonačnost u oba pravca asimptotski težeći nuli (Slika 5.1)

Koeficijent varijacije - Prethodno definisani pokazatelji varijacije zavise od jedinica mere u kojima su dati posmatrani podaci, odnosno to su apsolutni pokazatelji. Prilikom upoređenja varijabiliteta više serija izraženih u različitim jedinicama mere, ukoliko bi se ovi pokazatelji posmatrali može doći do pogrešnog zaključka. Da bi se to izbeglo izračunava se relativni pokazatelj, od kojih se najčešće primenjuje koeficijent varijacije. Koeficijent varijacije u slučaju osnovnog skupa definisan je kao odnos standardne devijacije prema srednjoj vrednosti. Jednačina za izračunavanje je:

$$Cv = \frac{\sigma}{\mu} * 100 \quad (5.3)$$

Koeficijent varijacije koristimo za upoređivanje varijabiliteta dve ili više serija čije vrednosti obeležja su iskazane u različitim jedinicama mere, ali i za upoređivanje varijabiliteta serija koje imaju iste jedinice mere ali značajno različite aritmetičke sredine.

Histogram i kriva normalne raspodele - Pošto čisto bročano prikazivanje rezultata statističke obrade zahteva dobro poznavanje statistike da bi se dobijeni rezultati "dešifrovali", pribegava se grafičkom prikazivanju koje omogućava da se lakše uoči neka posebna i neočekivana karakteristika rezultata koju je vrlo teško uočiti prilikom pregleda čisto bročanih rezultata. Za potrebe ove disertacije statistički analizirani podaci su prikazani grafički histogramima sa krivama normalne raspodele. Na Slici 5.2 prikazan je opšti dijagram koji obuhvata histogram i normalnu raspodelu.



Slika 5.2. Opšti prikaz histograma sa normalnom raspodelom (<http://www.matf.bg.ac.rs>)

Srednja tačka histograma približno odgovara srednjoj vrednosti podataka i njena širina ukazuje na varijansu prikazanih podataka. U svrhu poređenja, srednja vrednost i standardna devijacija svakog skupa podataka su uključeni u njihove odgovarajuće histograme.

5.2 Statistički pokazatelji parametara zbijanja i nosivosti

Statistička analiza (tj. srednja vrednost - μ i standardna devijacija - σ) se obično koristi kao kriterijum kontrole efekta zbijanja i nosivosti donjih slojeva saobraćajnica. U ovom poglavlju su za razvoj i validaciju korelacionih zavisnosti prikazani i statistički analizirani parametri zbijanja i nosivosti dobijeni laboratorijskim i terenskim ispitivanjima. Kao što je i naglašeno u prethodnim poglavljima ispitivanja su rađena u skladu sa određenim tehničkim uslovima za potrebe kontrole kvaliteta izgradnje donjih slojeva saobraćajnica na nekim lokacijama u Srbiji. Detalji razvijenih korelacionih zavisnosti razmatrani su u poglavlju 7. Za potrebe disertacije svi rezultati ispitivanja su podeljeni na dva dela:

- Rezultati laboratorijskih i „in situ“ ispitivanja
- Rezultati dodatnih ispitivanja

5.2.1 Rezultati laboratorijskih i *in situ* ispitivanja

Ispitivanja su vršena u laboratorijskim uslovima pod kontrolisanim uticajima sredine sa ciljem da se procene detaljne fizičko-mehaničke karakteristike uzoraka materijala sa različitih lokacija. Vrednosti parametara terenskih ispitivanja dobijene su opitima uz pomoć kružnih ploča za određivanje modula deformacije E_{v1} - E_{v2} , modula stišljivosti M_s i dinamičkog modula deformacije E_{vd} . Za određivanje vlažnosti (w) i suve zapreminske težine (γ_d) korišćen je cilindar poznate zapremine i uređaj sa konusom uz pomoć kalibrisanog peska.

Spisak ispitivanja koja su obavljena u skladu sa smernicama koje predlažu srpski standardi prikazani su tabelarno u poglavlju 4.

Rezultati dobijeni iz svakog ispitivanja su analizirani, sumirani po unapred definisanim lokacijama odnosno materijalima i prikazani su grafički i tabelarno. Na osnovu detaljne statističke analize rezultata rasponi vrednosti važnih parametara kreću se u granicama koje su prikazane u sklopu Tabela 5.1 – 5.5.

5.2.1.1 Sitnozrni materijal

L1-C, Glina-prašinasta

Analizom su obuhvaćeni indentifikaciono-klasifikacioni parametri kao i parametri zbijanja i nosivosti završnog sloja nasipa. Granulometrijski sastav i raspon učešća određenih čestica odabranog materijala prikazan je u poglavlju 4.1.1. Vrednosti parametara terenskih ispitivanja sa ispitane lokacije (L1-C) dobijene su opitima uz pomoć kružnih ploča za određivanje modula deformacije E_{v1} - E_{v2} (134 opita) i modula stišljivosti M_s (134 opita). Za određivanje suve zapreminske težine γ_d (129 opita) korišćen je cilindar poznate zapremine.

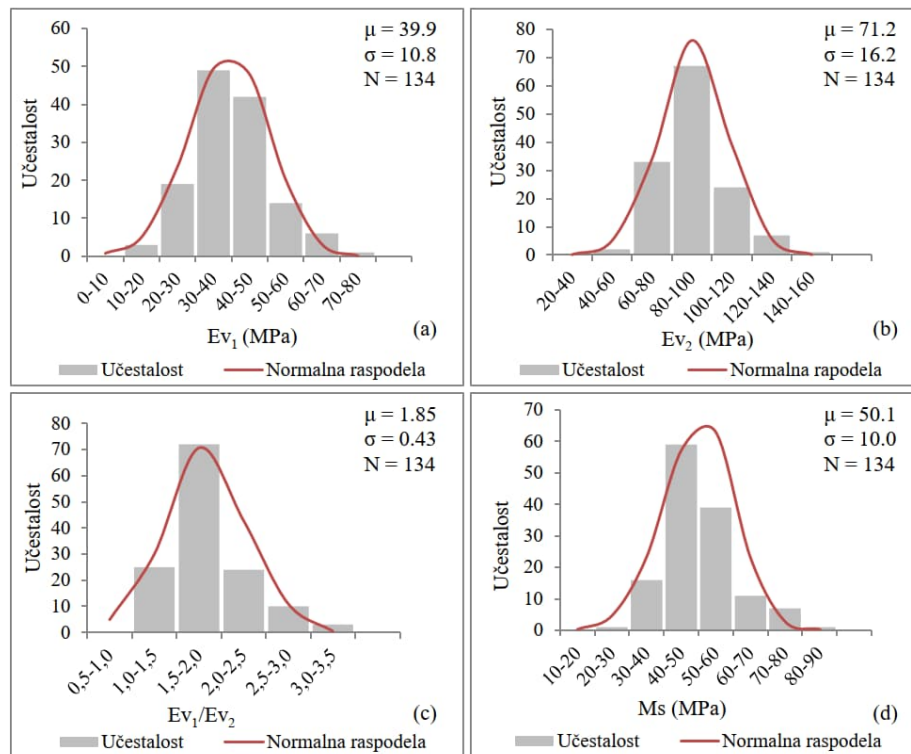
U Tabeli 5.1 prikazani su osnovni statistički podaci parametara glinovito-prašinastog materijala dobijenih laboratorijskim i *in situ* ispitivanjima na završnom sloju nasipa predmetne lokacije.

Krive raspodele i histogrami za L1-C modula deformacije E_{v1} - E_{v2} , njihovog odnosa kao i modula stišljivosti M_s prikazane su na Slici 5.3.

Na Slici 5.3 može se primetiti da su zabeležene vrednosti modula deformacije i stišljivosti rezultirale relativno dobro oblikovanim histogramima sa izdvojenim vrhovima oko srednje vrednosti.

Tabela 5.1. L1-C, sitnozrni materijal (glina-prašinasta)

Parametri	Osnovni statistički pokazatelji					
	Br.uzor. /opita	Min. vrednost	Max. vrednost	Aritm.sred. μ	Stand. devij. σ	Koef.var . Cv (%)
Laboratorijska ispitivanja						
Glina (%)	42	11.2	18.8	15.4	2.1	13.7
Prašina (%)	42	54.5	74.7	62.3	5.9	9.5
Pesak (%)	42	10.1	28.6	21.1	5.3	25.2
Šljunak (%)	42	0.1	3.9	1.2	0.3	25.1
w (%)	42	10.1	18.4	13.0	2.2	17.1
W_L (%)	17	29.0	42.0	35.1	3.8	10.9
W_P (%)	17	16.8	21.8	19.1	1.3	7.0
I_P (%)	17	11.7	22.0	16.1	2.9	18.0
γ_s (kN/m ³)	17	25.9	26.8	26.4	0.26	10.0
γ_{dmax} (kN/m ³)	17	16.31	17.52	16.84	0.40	2.4
w_{opt} (%)	17	14.0	17.6	16.0	1.22	7.6
O (%)	17	1.9	2.8	2.3	0.26	11.6
CBR (%)	17	2.6	3.5	2.9	0.33	11.3
„In situ“ ispitivanja - Završni sloj nasipa						
w (%)	129	7.3	21.2	13.1	2.4	18.2
γ (kN/m ³)	129	18.45	21.02	19.47	0.5	2.3
γ_d (kN/m ³)	129	16.48	17.63	17.22	0.3	1.7
Rc (%)	129	100.0	101.5	100.8	0.42	0.4
E_{v1} (MPa)	134	15.2	72.6	39.9	10.8	27.0
E_{v2} (MPa)	134	39.4	134.2	71.2	16.2	22.8
E_{v2}/E_{v1}	134	1.27	3.34	1.85	0.43	23.4
M_s (MPa)	134	24.8	81.9	50.1	10.0	19.9

Slika 5.3. Učestalost i distribucija „in situ“ parametara na završnom sloju nasipa, lokacija L1-C
(a) modul deformacije E_{v1} ; (b) modul deformacije E_{v2} ; (c) E_{v2}/E_{v1} ; (d) modul stižljivosti M_s

5.2.1.2 Krupnozrni materijal

L2-S i L3-S, Pesak

Tabela 5.2. Statistički parametri promenljivih, L2-S, krupnozrni materijal (pesak)

Parametri	Osnovni statistički pokazatelji					
	Br.uzor. /opita	Min. vrednost	Max. vrednost	Aritm.sred. μ	Stand. devij. σ	Koef.var. Cv (%)
Laboratorijska ispitivanja						
Glina i prašina (%)	41	8.1	17.1	12.1	2.2	17.9
Pesak (%)	41	82.9	91.9	87.9	2.2	2.5
Šljunak (%)	41	-	-	-	-	-
w (%)	41	6.1	13.3	8.5	1.6	19.3
W_L, W_P, I_P (%)	Materijal je neplastičan					
γ_{dmax} (kN/m ³)	11	16.02	17.02	16.64	0.32	1.9
w_{opt} (%)	11	15.2	19.6	17.0	1.2	7.1
„In situ“ ispitivanja - II sloj nasipa						
w (%)	72	6.2	13.3	9.0	1.8	20.4
γ (kN/m ³)	72	17.59	19.49	18.41	0.5	2.7
γ_d (kN/m ³)	72	15.82	17.56	16.89	0.4	2.1
Rc (%)	72	98.0	101.5	99.5	1.0	1.0
E_{v1} (MPa)	51	12.4	43.1	22.2	5.4	24.5
E_{v2} (MPa)	51	45.4	81.4	64.9	8.6	13.2
E_{v2}/E_{v1}	51	1.81	4.94	3.04	0.64	20.9
Ms (MPa)	95	19.9	68.2	41.2	9.9	24.1

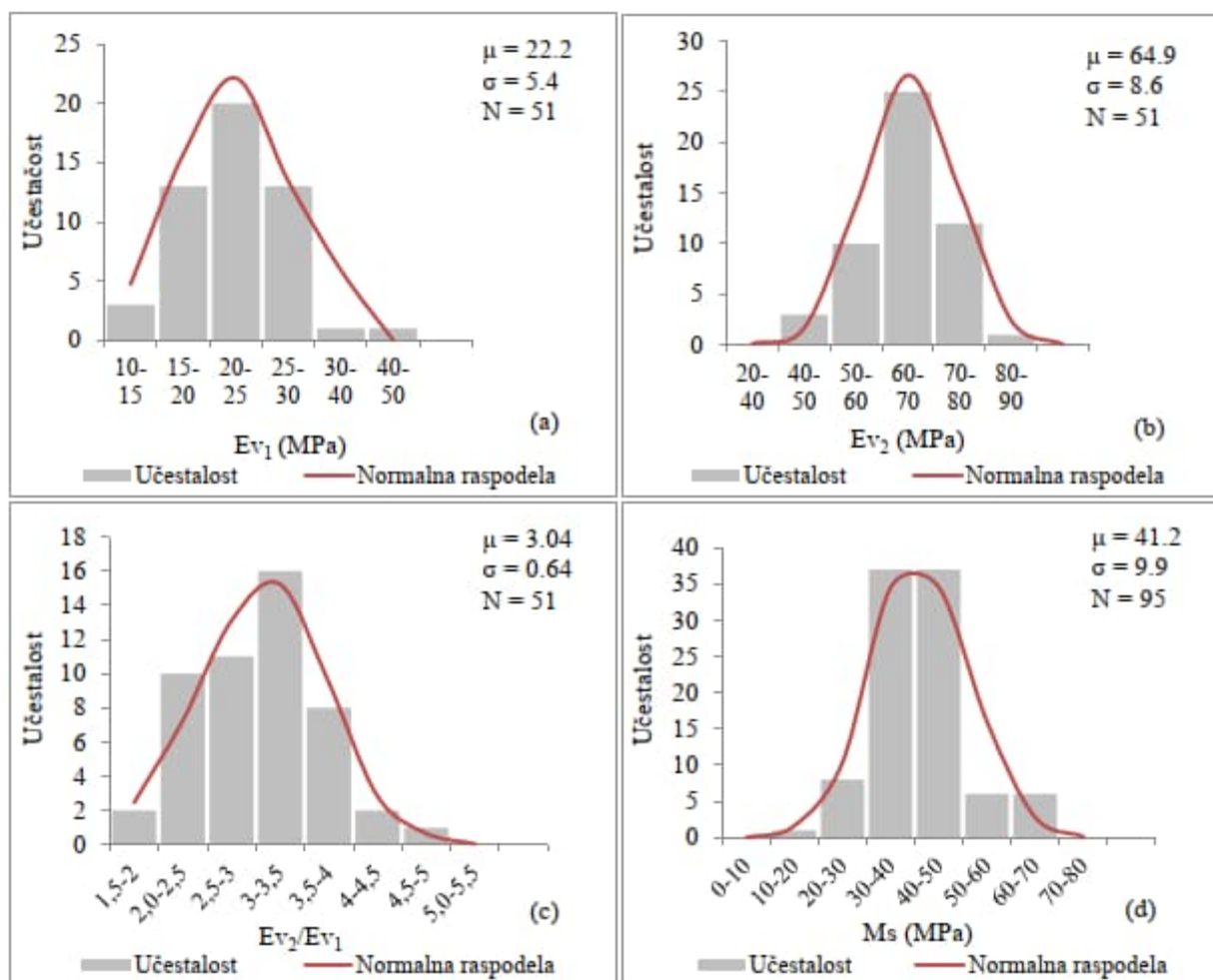
Tabela 5.3. Statistički parametri promenljivih, L3-S, krupnozrni materijal (refulisani pesak)

Parametri	Osnovni statistički pokazatelji					
	Br.uzor. /opita	Min. vrednost	Max. vrednost	Aritm.sred. μ	Stand. devij. σ	Koef.var. Cv (%)
Laboratorijska ispitivanja						
Glina i prašina (%)	22	0.7	1.8	1.2	0.3	25.5
Pesak (%)	22	97.6	98.8	97.6	0.3	0.4
Šljunak (%)	22	0.4	1.0	0.7	0.2	26.1
w (%)	22	9.1	12.2	10.8	0.7	6.5
W_L, W_P, I_P (%)	Materijal je neplastičan					
γ_{dmax} (kN/m ³)	6	16.04	16.12	16.08	0.03	0.2
w_{opt} (%)	6	17.6	17.9	17.8	0.12	0.7
„In situ“ ispitivanja – Završni sloj nasipa						
w (%)	108	8.6	12.7	10.9	0.80	7.3
γ (kN/m ³)	108	17.46	18.21	17.88	0.2	0.9
γ_d (kN/m ³)	108	15.84	16.32	16.12	0.1	0.5
Rc (%)	108	98.0	101.4	100.4	0.59	0.6
E_{v1} (MPa)	119	11.1	39.3	22.1	5.5	24.7
E_{v2} (MPa)	119	39.2	114.8	70.1	16.2	23.1
E_{v2}/E_{v1}	119	2.11	5.15	3.25	0.67	20.6

U Tabelama 5.2 i 5.3 za materijale sa lokacije L2-S i L3-S prikazani su rasponi vrednosti fizičko-mehaničkih-parametara, kod kojih preovlađuje peskovita frakcija kao i parametri terenskih ispitivanja izvedenih na pripremljenom slojevima nasipa.

Statističkom analizom peskovitih uzoraka lokacija L2-S i L3-S (22 do 41 uzoraka) utvrđeno je da je sadržaj glinovito-peskovite komponente skupa podataka L2-S veći za oko 11 % sto je uslovilo za oko 0.6 kN/m^3 veću maksimalnu zapreminsku težinu (γ_{dmax}).

Krive raspodele i histogrami učestalosti parametara zbijanja i nosivosti sa lokacija L2-S i L3-S prikazani su na Slikama 5.4 i 5.5. Ove informacije mogu pomoći u određivanju korelacionih zavisnosti između pomenutih parametara.



Slika 5.4. Učestalost i distribucija „in situ“ parametara na II sloju nasipa, lokacija L2-S
(a) modul deformacije E_{v1} ; (b) modul deformacije E_{v2} ; (c) E_{v2}/E_{v1} ; (d) modul stišljivosti M_s

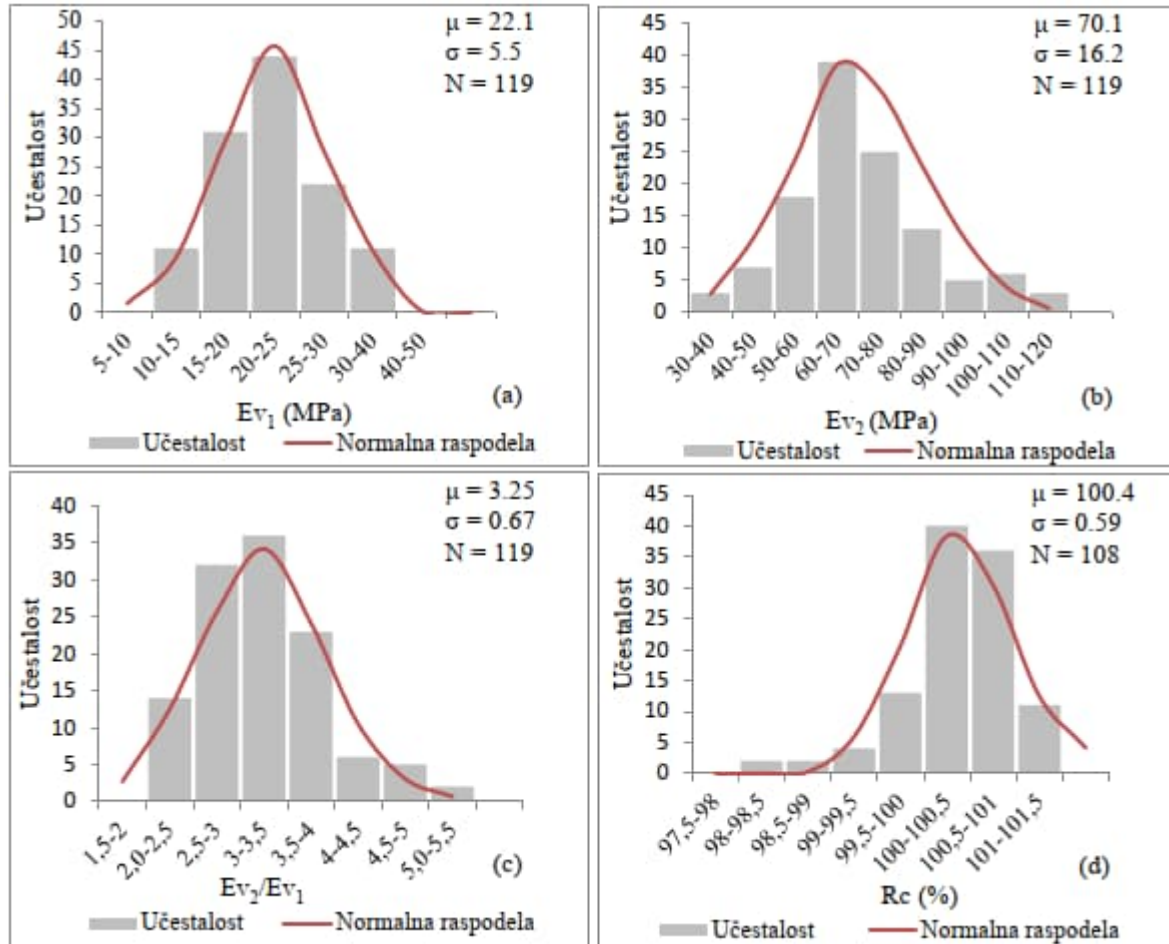
Slika 5.4 prikazuje histograme i krive normalne raspodele za parametre dobijene *in situ* ispitivanjima II sloja nasipa za potrebe izgradnje pristupnih saobraćajnica Robne kuće IKEA u Beogradu.

Može se videti da postoji jedan vrh u većini skupova podataka što je rezultat ujednačenosti fizičko-mehaničkih karakteristika materijala kao i dobre metodologije izgradnje pomenutog sloja. Takođe treba naglasiti i pravilan izbor upotrebe statističkog intervala.

Na Slici 5.4b opseg vrednosti E_{v2} je između 45,4 MPa i 81,4 MPa. Prosečna vrednost je 64,9 MPa sa standardnom devijacijom od 8,6 MPa. Koeficijent varijacije (C_v) je 13,2 %, što pokazuje da se ispitivana deonica II sloja nasipa može smatrati uniformnom.

Histogrami i krive normalne raspodele za modul deformacije (E_v) i stepen zbijenosti (R_c) dobijenih *in situ* ispitivanjima završnog sloja nasipa za potrebe izgradnje Intermodalnog terminala "Batajnica" su prikazane na Slici 5.5.

Rezultati modula deformacije E_{v2} izgrađenog od refulisanog peska (L3-S) su između 39,2 MPa i 114,8 MPa i prikazani su na histogramu 5.5b. Koeficijent varijacije (C_v) je 23.1 %, što ukazuje da se ispitivana deonica ne može smatrati striktno uniformnom. Ovo je verovatno uzrokovano neujednenošću procesa zbijanja kao i varijacijama vlažnosti peskovitog materijala pre i tokom *in situ* ispitivanja.



Slika 5.5. Učestalost i distribucija „in situ“ parametara na završnom sloju nasipa, lokacija L3-S
(a) modul deformacije E_{v1} ; (b) modul deformacije E_{v2} ; (c) E_{v2}/E_{v1} ; (d) stepen zbijenosti R_c

Generalno, trend parametara deformacije E_{v1} - E_{v2} za peskovite materijale sa lokacija L2-S i L3-S je sličan. Može se zapaziti da je deformacijski odnos E_{v2}/E_{v1} nije ujednačen što je posledica razlike fizičko-mehaničkih karakteristika peskovitih materijala, kao i uticaja vlažnosti tokom procesa ispitivanja.

L4-G i L5-G, Šljunak-peskovit

Za krupnozrne materijale kod kojih preovlađuje šljunkovito-peskovita frakcija sa lokacija L4-G, L5-G, na osnovu detaljne statističke analize (17 do 20 uzoraka) rasponi vrednosti fizičko-mehaničkih parametara, kao i parametara zbijanja i nosivosti izgrađenih donjih slojeva saobraćajnica kreću se u granicama prikazanim u Tabelama 5.4. i 5.5.

Na osnovu detaljne statističke analize rezultata laboratorijskih i *in situ* ispitivanja na posteljičnom sloju lokacije L4-G (Petlja Batajnica - Autoput E75) rasponi vrednosti parametara kreću se u granicama koje su prikazane u Tabeli 5.4 (20 do 83 uzoraka/opita).

Tabela 5.4. Statistički parametri promenljivih, L4-G, krupnozrni materijal (šljunak-peskovit)

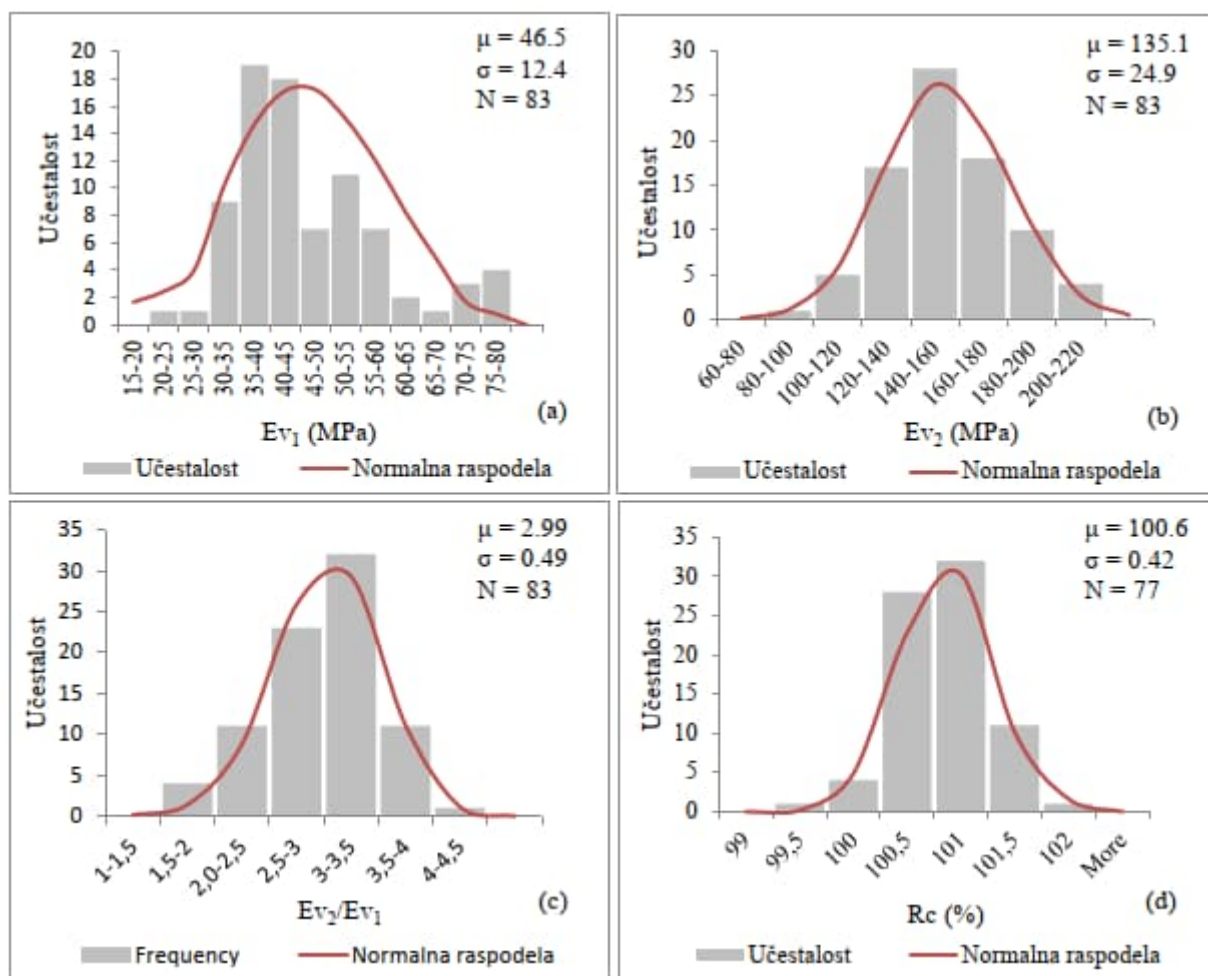
Parametri	Osnovni statistički pokazatelji					
	Br.uzor. /opita	Min. vrednost	Max. vrednost	Aritm.sred. μ	Stand. devij. σ	Koef.var. Cv (%)
Laboratorijska ispitivanja						
Glina i prašina (%)	20	1.6	4.2	2.7	0.6	22.8
Pesak (%)	20	35.1	54.7	42.8	6.7	15.7
Šljunak (%)	20	43.5	62.5	54.5	6.5	11.9
w (%)	20	2.3	7.8	4.2	1.4	32.3
W_L, W_P, I_P (%)	Materijal je neplastičan					
γ_{dmax} (kN/m ³)	20	20.18	21.03	20.64	0.3	1.4
w_{opt} (%)	20	4.6	6.3	5.4	0.48	8.9
O (%)	20	0.4	0.8	0.6	0.13	22.3
„In situ“ ispitivanja - Posteljica						
w (%)	77	2.8	7.8	4.8	1.2	25.5
γ (kN/m ³)	77	20.87	22.46	21.69	0.4	1.8
γ_d (kN/m ³)	77	20.17	21.46	20.68	0.3	1.6
Rc (%)	77	99.3	101.5	100.6	0.42	0.4
E_{v1} (MPa)	83	23.0	79.8	46.5	12.4	26.7
E_{v2} (MPa)	83	77.2	192.5	135.1	24.9	18.4
E_{v2}/E_{v1}	83	1.96	4.02	2.99	0.49	16.5

Tabela 5.5. Statistički parametri promenljivih, L5-G, krupnozrni materijal (šljunak-peskovit)

Parametri	Osnovni statistički pokazatelji					
	Br.uzor. /opita	Min. vrednost	Max. vrednost	Aritm.sred. μ	Stand. devij. σ	Koef.var. Cv (%)
Laboratorijska ispitivanja						
Glina i prašina (%)	17	1.8	4.5	2.9	0.7	23.1
Pesak (%)	17	30.1	41.2	36.2	3.7	10.2
Šljunak (%)	17	54.3	68.1	60.9	3.9	6.3
w (%)	17	2.7	5.1	3.9	0.7	18.7
W_L, W_P, I_P (%)	Materijal je neplastičan					
γ_{dmax} (kN/m ³)	8	20.80	22.16	21.49	0.5	2.2
w_{opt} (%)	8	3.9	5.6	4.7	0.67	14.4
„In situ“ ispitivanja - Završni sloj nasipa						
w (%)	86	3.1	5.7	4.1	0.60	14.6
γ (kN/m ³)	86	21.59	23.55	22.64	0.4	2.0
γ_d (kN/m ³)	86	20.82	22.38	21.75	0.4	0.8
Rc (%)	86	98.0	100.9	99.7	0.83	2.0
E_{v1} (MPa)	35	30.1	77.1	53.6	12.6	25.5
E_{v2} (MPa)	35	101.5	179.7	141.8	25.4	17.9
E_{v2}/E_{v1}	35	1.77	3.99	2.74	0.59	21.5
E_{vd} (MPa)	43	26.3	61.3	42.4	9.1	21.6

Tabela 5.5 predstavlja rezime rezultata indentifikaciono-klasifikacionih parametara kao i parametara nosivosti (E_{v1} - E_{v2} i E_{vd}) i zbijanja (vlažnosti i suve zapreminske težine) završnog sloja nasipa izgrađenog od šljunka. Ispitivanja su sprovedena tokom izgradnje deonice Merošina – Merošina 1. U skladu sa tehničkim uslovima zahtevana vrednost modula deformacije E_{v2} iznosila je 60 MPa, sa deformacijskim odnosom $E_{v2}/E_{v1} \leq 2.2$, (Ako je $E_{v1} > 0,5E_{v2}$ onda se odnos deformacionih modula E_{v2}/E_{v1} ne može primeniti za ocenu nosivosti). Zahtevani stepen zbijenosti (R_c) iznosio je 98%.

Osnovne statističke vrednosti zahtevanog parametra nosivosti (E_{v2}) sa lokacija L4-G i L5-G, srednja vrednost (μ) i standardna devijacija (σ) su ujednačene dok koeficijent varijacije iznosi 17,9 % odnosno 18,4 %.

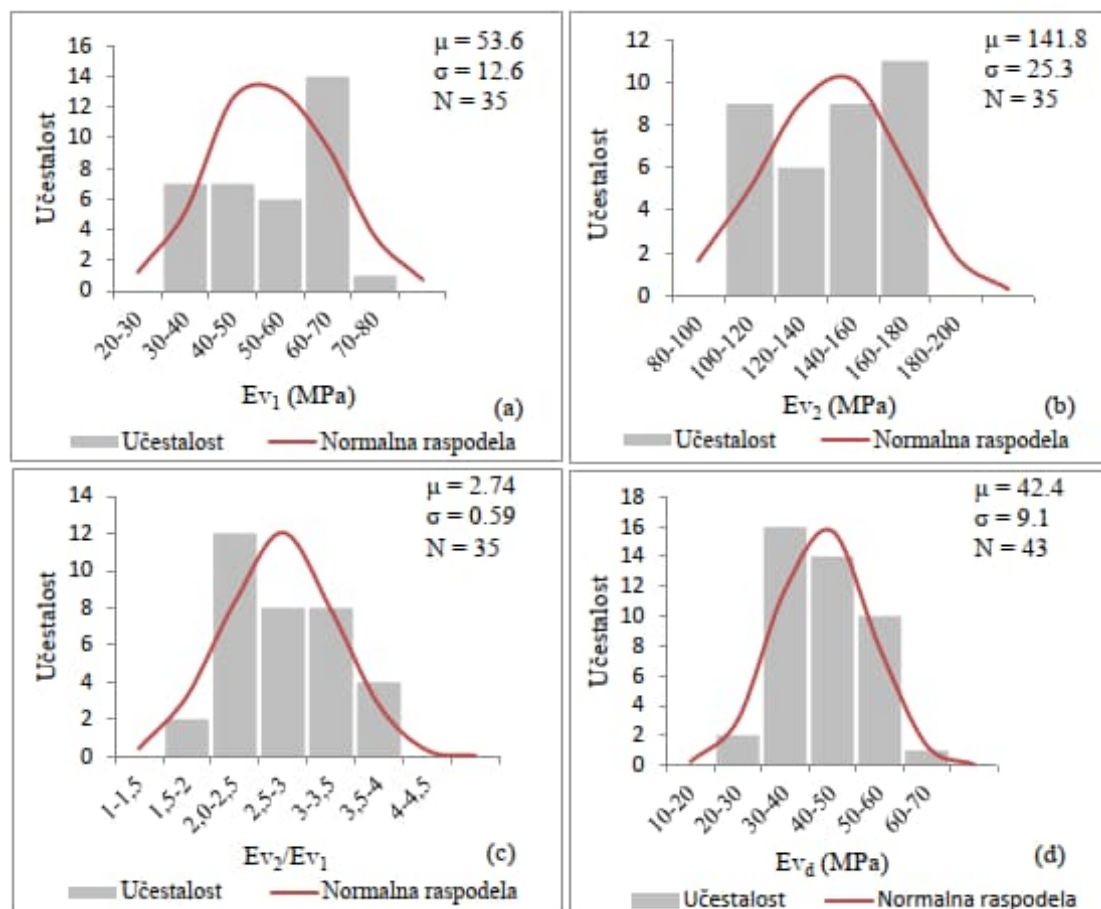


Slika 5.6. Učestalost i distribucija „in situ“ parametara na posteljičnom sloju, lokacija L4-G
(a) modul deformacije E_{v1} ; (b) modul deformacije E_{v2} ; (c) E_{v2}/E_{v1} ; (d) stepen zbijenosti R_c

Slika 5.6b i 5.7b ilustruje histograme i krive raspodele modula deforacije E_{v2} na izgrađenim slojevima podloge od šljunkovog materijala (L4-G i L5-G). Može se videti da na slici 5.7d postoje dva različita vrha u skupu podataka. Ovo je verovatno uzrokovano neujednačenošću (segregacijom) podloge odnosno može se pripisati heterogenosti i varijacijama sadržaja vlage krupnozrnih materijala.

Pregledom Slika 5.6 i 5.7 može se primetiti da su prikazane vrednosti modula deformacije E_{v1} , E_{v2} i njihovog odnosa lokacije L4-G rezultirale relativno dobro oblikovanim histogramima, u poređenju sa zabeleženim vrednostima sa lokacije L5-G. Ovo nije iznenađujuće, pošto na prikazane vrednosti sa lokacije L5-G utiče broj ispitivanja (N), što ih čini varijabilnijim i što može dovesti do toga da skupovi podataka histograma imaju sekundarne vrhove oko srednje vrednosti.

U stvari sve široke varijacije u velikoj meri utiču na odnose između različitih parametara tj. njihove međusobne korelacione zavisnosti.



Slika 5.7. Učestalost i distribucija „in situ“ parametara na završnom sloju nasipa, lokacija L5-G (a) modul deformacije E_{v1} ; (b) modul deformacije E_{v2} ; (c) E_{v2}/E_{v1} ; (d) din. modul deformacije E_{vd}

5.2.2 Zbirni prikaz srednjih vrednosti rezultata ispitivanja

Granulometrijski sastav

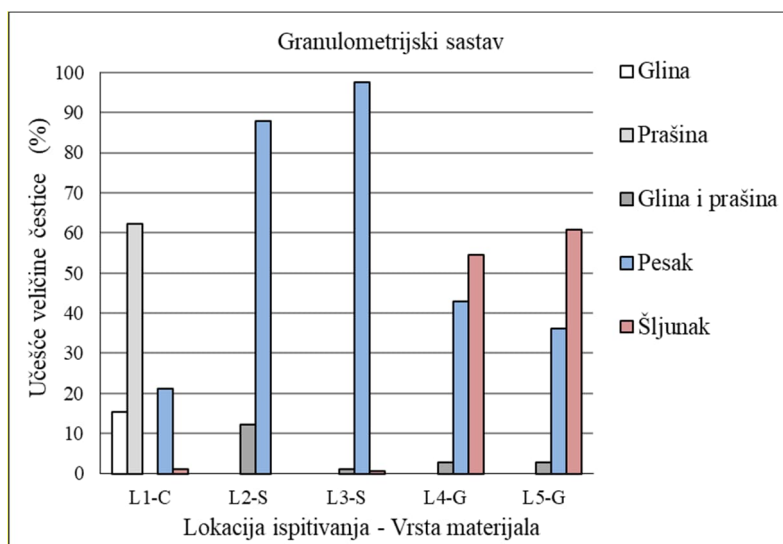
Za sve uzorke materijala izvršene su analize granulometrijskog sastava kako bi se izvršila njihova kategorizacija i klasifikacija posebno za svaku analiziranu lokaciju. Rezultati dobijeni ispitivanjima prikazani su na Slici 5.8. Može se videti da su uzorci materijala kategorisani u tri različite grupe, a to su: glina prašinasta, pesak (2 materijala) i šljunak peskovit (2 materijala).

Aterbergove granice

Aterbergove granice su procenjene za uzorke materijala da bi se izvršila dodatna kategorizacija sitnozrnih materijala prema stanju konzistencije. Ispitivanja potrebna za procenu granice tečenja (W_L), granice plastičnosti (W_P), indeksa plastičnosti (I_P) i indeksa konzistencije (I_c) su obavljena u skladu sa standardom SRPS U.B1.020.

Utvrđeno je da materijal oznake L1-C plastičan, rezultati ispitivanja su prikazani u Tabeli 5.1, dok materijali oznaka L2-S, L3-S, L4-G i L5-G su neplastični.

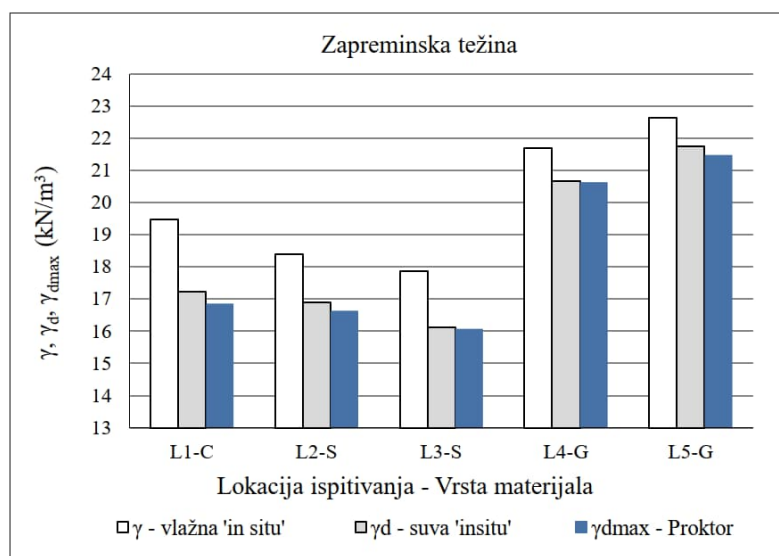
Rezultati ispitivanja prikazani na Slici 5.8 predstavljaju varijaciju u proporcijama veličine čestica za sakupljene uzorke materijala.



Slika 5.8. Zbirni prikaz srednjih vrednosti granulometrijskih sastava materijala uzorkovanih sa različitih lokacija tokom izgradnje donjih slojeva saobraćajnica

Proktorov opit

Standardni i modifikovani Proktorov opit je izveden da bi se odredila optimalna vlažnost (w_{opt}), tj. vlažnost pri kojoj dobijamo maksimalnu suhu zapreminsku težinu (γ_{dmax}) za datu energiju zbijanja.

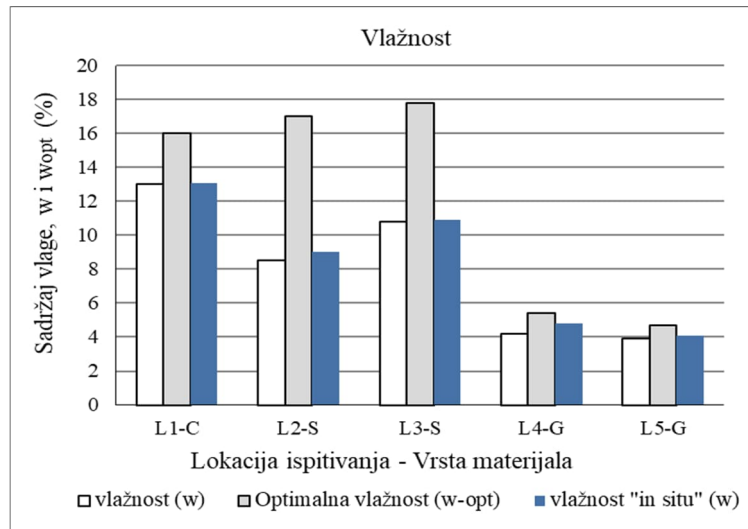


Slika 5.9. Zbirni prikaz srednjih vrednosti zapreminskih težina (γ , γ_d , γ_{dmax}) dobijenih u laboratorijskim i „in situ“ uslovima tokom izgradnje donjih slojeva saobraćajnica

Slika 5.9 prikazuje varijacije (γ_{dmax}) za različite tipove prirodnih uzoraka materijala kao i varijacije vlažnih i suvih zapreminskih težina (γ i γ_d) dobijenih sa ugrađenih donjih slojeva saobraćajnica.

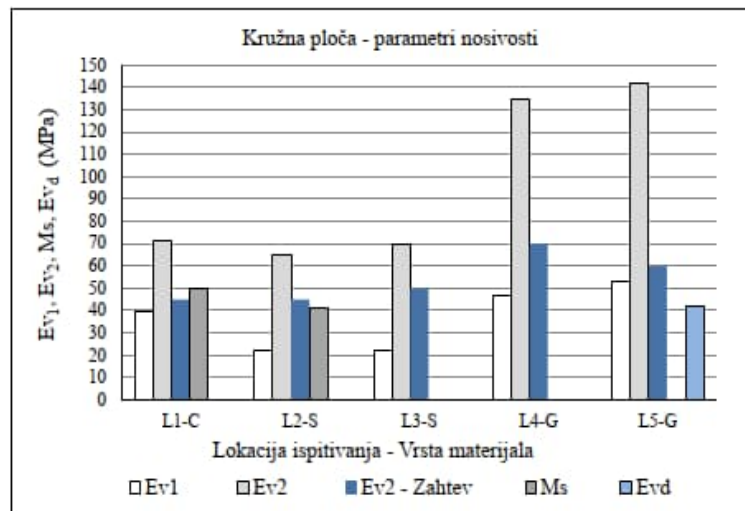
Vlažnost

Tri različita nivoa vlažnosti su dobijena za uzorke materijala, jedan je sadržaj vlage uzorkovanog materijala (w), drugi je optimalni sadržaj vlage (w_{opt}) i treći je sadržaj vlage tokom *in situ* ispitivanja kvaliteta ugrađenih donjih slojeva saobraćajnica. Rezultati su prikazani grafički na slici 5.10. koja pokazuje varijacije u nivoima sadržaja vlage različitih tipova materijala sa različitih lokacija.



Slika 5.10. Zbirni prikaz rezultata srednjih vrednosti sadržaja vlage

Sa dijagrama na Slici 5.10 može se zapaziti da se za peskovite materijale lokacija L2-S i L3-S optimalna vlaga (w_{opt}) i vlaga prilikom terenkih ispitivanja ($w_{in situ}$) znatno razlikuju. Manje vrednosti vlažnosti dobijene prilikom *in situ* ispitivanja su posledica uzorkovanja (tj. uzorkovanja sa površine sloja) kao i same metodologije ugradnje i zbijanja predmetnih slojeva. Nešto veća *in situ* energija zbijanja uslovlja je smanjenje $w_{in situ}$ kao i povećanje suve zapremine težine $\gamma_{d,in situ}$ (Slika 5.9).



Slika 5.11. Zbirni prikaz srednjih vrednosti parametara nosivosti predmetnih lokacija donjih slojeva saboraćajnica

Na osnovu detaljne statističke analize rezultata terenskih ispitivanja na donjim slojevima saboraćajnica lokacija srednje vrednosti parametara nosivosti kreću se u granicama koje su prikazane na Slici 5.11 za svih pet lokacija.

5.3 Statistički pokazatelji parametara zbijanja i nosivosti dodatnih ispitivanja

U ovom poglavlju su za razvoj i validaciju korelacionih zavisnosti prikazani statistički pokazatelji parametri zbijanja i nosivosti dobijeni dodatnim laboratorijskim i terenskim ispitivanjima. Kao što je i prikazano u Tabeli 4.14 u prethodnom poglavlju sva ispitivanja su rađena u skladu sa relevantnim srpskim standardima u laboratorijskim uslovima (Laboratorija TPA d.o.o.) i na lokaciji

Petlje Batajnica (Autoput E75). U okviru pomenute lokacije položaj mikrolokacija terenskih ispitivanja je posteljični sloj na deonici saobraćajnice Batjnički Bulevar od km 0+550 do 1+560 u punoj širini. Laboratorijskim ispitivanjima definisane su fizičko-mehaničke karakteristike šljunkovitog materijala (L4-G) koji je uzorkovan na privremenoj deponiji predmetne lokacije, poglavlje 4.2.1.1.

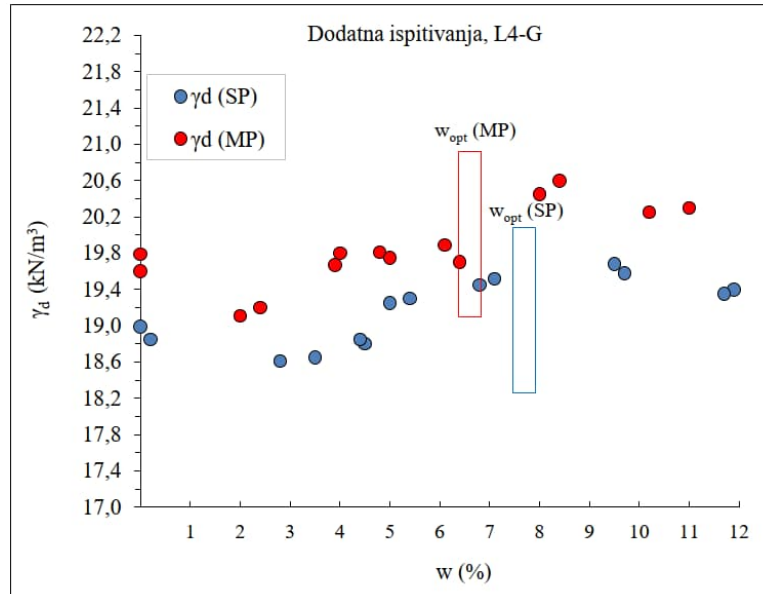
Kalifornijski indeks nosivosti CBR (dinamički CBR_d i statički CBR), statička kružna ploča - SPLT dinamička kružna ploča – LWD i uređaj s peščanim konusom korišćeni su za procenu svojstava zbijenosti i nosivosti odabranog prirodnog materijala – šljunka ugrađenog u završni sloj podloge – posteljice.

Rezultati dodatnih ispitivanja za razvoj korelacionih zavisnosti parametara zbijanja i nosivosti razmatrani su u nastavku kroz tabelarne i grafičke prikaze.

Tabela 5.6. L4-G, krupnozrni materijal (šljunak) - dodatna laboratorijska ispitivanja

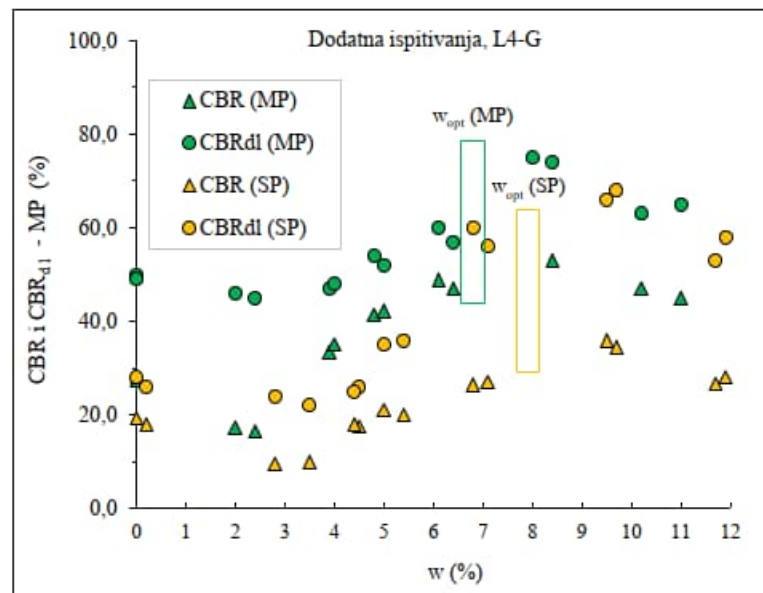
Dodatna laboratorijska ispitivanja									
Broj isp.	Epruveta	w		γ_d		CBR_{dl}		CBR	
		(SP)	(MP)	(SP)	(MP)	(SP)	(MP)	(SP)	(MP)
		%		(kN/m ³)		%			
1.	E-1	0.0	0.0	18.99	19.79	28	50	19.3	27.3
	E-2	0.2	0.0	18.85	19.60	26	49	18.0	28.0
2.	E-1	2.8	2.0	18.61	19.11	24	46	9.5	17.3
	E-2	3.5	2.4	18.65	19.20	22	45	10.0	16.5
3.	E-1	4.5	3.9	18.80	19.67	26	47	17.5	33.5
	E-2	4.4	4.0	18.85	19.80	25	48	18.0	35.0
4.	E-1	5.4	4.8	19.30	19.81	36	54	20.0	41.4
	E-2	5.0	5.0	19.25	19.75	35	52	21.0	42.3
5.	E-1	7.1	6.1	19.52	19.89	56	60	27.0	48.9
	E-2	6.8	6.4	19.45	19.70	60	57	26.5	47.0
6.	E-1	9.5	8.4	19.68	20.60	66	74	36.0	53.0
	E-2	9.7	8.0	19.58	20.45	68	75	34.5	54.5
7.	E-1	11.9	11.0	19.40	20.30	58	65	28.0	45.0
	E-2	11.7	10.2	19.35	20.25	53	63	26.6	47.0

U Tabeli 5.6 prikazani su rezultati dinamičkih CBR_{dl} i statičkih CBR ispitivanja, u zavisnosti od sadržaja vlage za različite energije zbijanja (SP -standardna 0,6 MJ/m³, MP - modifikovana 2,7 MJ/m³). Što se tiče uticaja sadržaja vlage za izradu epruveta od šljunkovitog materijala, može se zapaziti da CBR_{dl} dostiže najveću vrednost u slučaju uzoraka sabijenih pri vlažnosti blizu optimalne ($w_{opt}(SP) = 7,6 - 8,0 \%$; $w_{opt}(MP) = 6,7 - 7,1 \%$). Vrednosti parametara zbijanja (w, γ_d) i nosivosti (CBR, CBR_{dl}) nakon izrade epruveta pri standardnoj (SP) i modifikovanoj (MP) energiji zbijanja prikazani su na Slikama 5.12 i 5.13.



Slika 5.12. Dodatna laboratorijska ispitivanja - vrednosti parametara zbijanja (w , γ_d)

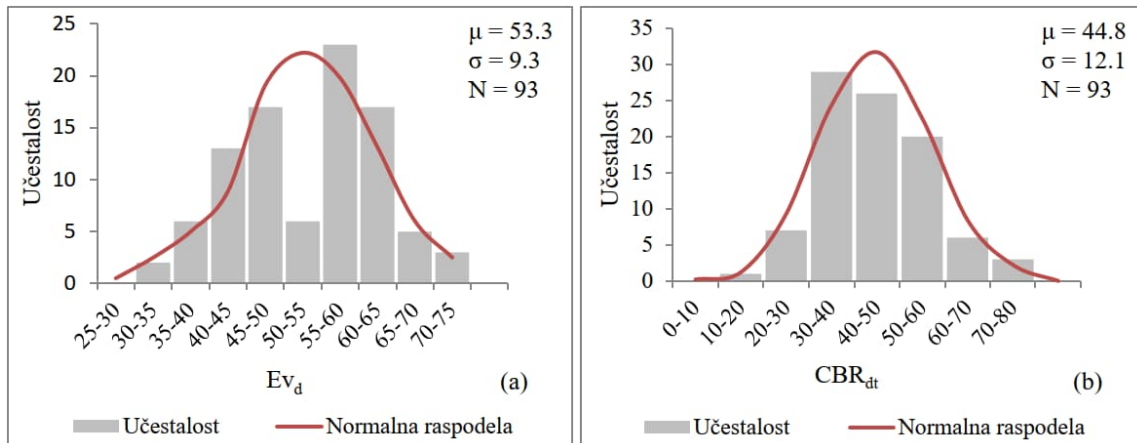
Maksimalne zapremine težine određene standardnim i modifikovanim Proktorovim ispitivanjima su veće za 0.3-0.4 kN/m³ od zapremine težina sa vlagama ($w_{opt} \pm 2.5\%$) dobijenih CBR_{dl} ispitivanjima. Više vrednosti maksimalne suve zapremine težine su posledica same metodologije ispitivanja. Za Proktorova ispitivanja korišćen je materijal sa najvećim zrnem 31,5 mm, krajnji rezultat zavisi i od procentualnog sadržaja nadmernih zrna (>31,5mm). Za izradu uzoraka CBR_{dl} ispitivanja korišćen je materijal sa najvećim zrnem 22,4 mm.



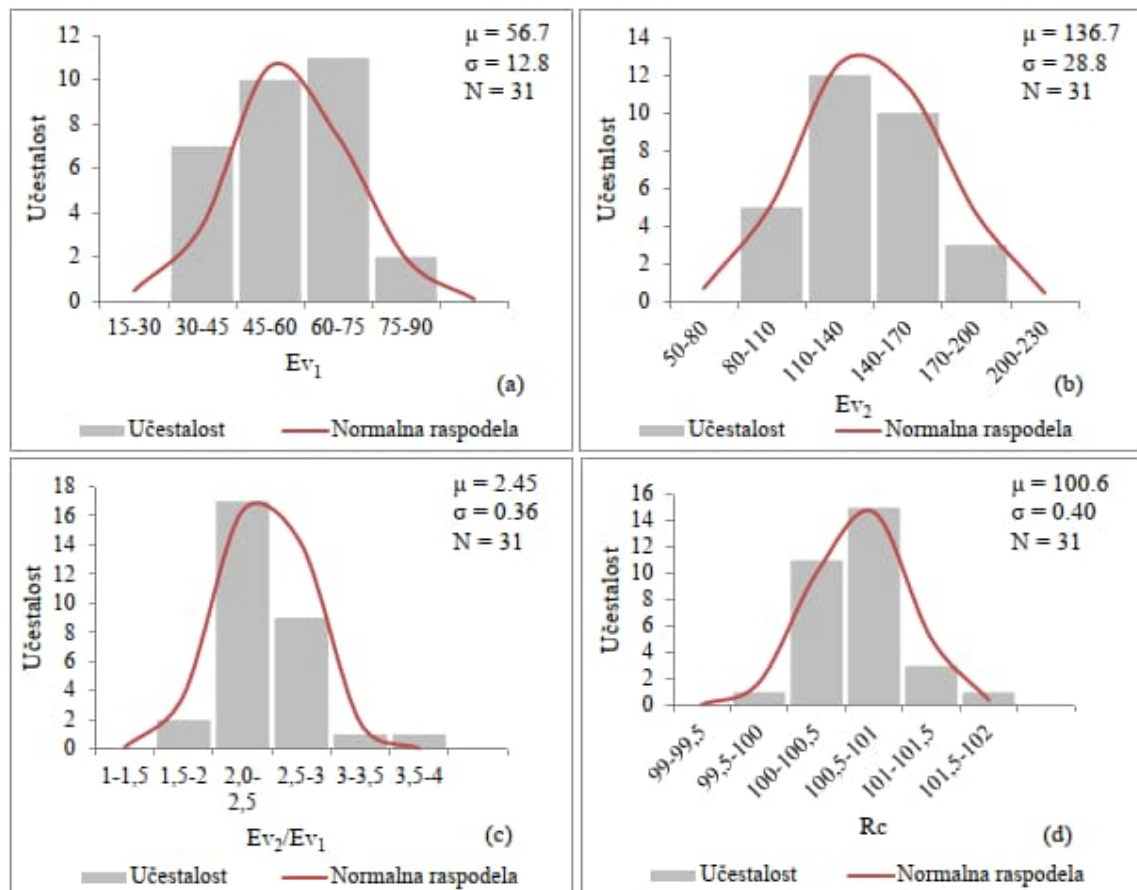
Slika 5.13. Dodatna laboratorijska ispitivanja - vrednosti parametara nosivosti (CBR, CBR_{dl})

Slika 5.14a i 5.14b ilustruje histograme i krive normalne raspodele dinamičkog modula deforacije E_{vd} (93 opita) i dinamičkog terenskog kalifornijskog indeksa nosivosti CBR_{dt} (93 opita) na izgrađenom posteljičnom sloju od šljunkovog materijala (L4-G).

Na osnovu vrednosti standardnih devijacija ($\sigma = 9.3-12.1$) može se zaključiti da su vrednosti skoro svih merenja, tj. 99,7 % u intervalu ($\mu - 3\sigma$, $\mu + 3\sigma$) i da nema grešaka prilikom merenja, odnosno da su obrađeni parametri E_{vd} i CBR_{dt} reprezentativni.



Slika 5.14. Učestalost i distribucija „in situ“ parametara na posteljičnom sloju, lokacija L4-G
(a) dinamički modul deformacije E_{vd} ; (b) dinamički terenski kalifornijski indeks nosivosti CBR_{dt}



Slika 5.15. Učestalost i distribucija „in situ“ parametara na posteljičnom sloju, lokacija L4-G
(a) modul deformacije E_{v1} ; (b) modul deformacije E_{v2} ; (c) E_{v2}/E_{v1} ; (d) stepen zbijenosti R_c ;

Krive raspodele i histogrami dodatnih ispitivanja modula deformacije E_{v1} - E_{v2} , njihovog odnosa kao i stepena zbijenosti prikazane su na Slici 5.15.

Na osnovu detaljne statističke analize rezultata dodatnih *in situ* ispitivanja na posteljičnom sloju lokacije L4-G rasponi vrednosti parametara zbijanja i nosivosti kreću se u granicama koje su prikazane u Tabeli 5.7.

Tabela 5.7. L4-G, krupnozrni materijal (šljunak), posteljični sloj – dodatna „in situ“ ispitivanja

Parametri	Osnovni statistički pokazatelji - dodatna „in situ“ ispitivanja					
	Br.uzor. /opita	Min. vrednost	Max. vrednost	Aritm.sred. μ	Stand. devij. σ	Koef.var. Cv (%)
w (%)	31	3.5	7.3	5.7	0.9	16.7
γ (kN/m ³)	31	21.29	22.33	21.76	0.3	1.4
γ_d (kN/m ³)	31	20.24	20.94	20.59	0.2	1.0
Rc (%)	31	100.0	101.5	100.6	0.40	0.4
E _{v1} (MPa)	31	33.5	80.5	56.7	12.8	21.9
E _{v2} (MPa)	31	85.4	197.8	136.7	28.8	20.9
E _{v2} /E _{v1}	31	1.96	3.66	2.45	0.36	13.9
E _{vd} (MPa)	93	34.7	73.0	53.3	9.3	17.5
CBR _{dt} (%)	93	20	77	44.8	12.1	26.9

Iz tabele se može zaključiti da su vrednosti modula deformacije E_{vd} i E_{v1} kao i dinamičkog terenskog CBR_{dt} bez većih odstupanja (standardne devijacije iznose od 9,3-12,8). Može se zapaziti da su vrednosti modula deformacije E_{v2} u širokom opsegu ~85-200 MPa, što ukazuje na raznolikost lokalnih mesta nosivih karakteristika i vlažnosti materijala.

6. LITERATURNI PREGLED POSTOJEĆIH KORELACIONIH ZAVISNOSTI PARAMETARA ZBIJANJA I NOSIVOSTI

Mnogi istraživači su sproveli opsežan istraživački rad u proceni čvrstoće podloge kolovozne konstrukcije razvijajući brojne korelacije zavisnosti za različite tipove materijala. Da bi se razumeli savremeni istraživački problemi, izvršena je analiza i pregled postojeće literature u vezi sa prethodno razvijenim korelacijama. Termin materijal je uveden kao „jedinstveni“ pojam za sve vrste tla. Treba napomenuti da se u ovoj disertaciji pojam zapravo odnosi samo na tla kao građevinske materijale (Tabela 6.1).

Tabela 6.1. Tlo kao građevinski materijal

Materijal	Simbol	Veličina zrna (mm)
Krupnozrni		
Šljunak	Gr	> 2.0 do 63
Pesak	Sa	> 0.063 do 2.0
Sitnozrni		
Prašina	Si	> 0.002 do 0.063
Glina	Cl	≤ 0.002

U tekstu i u tabelama teksta većina oznaka su date prema važećem standardu SRPS EN ISO 14688-1. Međutim, neki autori su analizirali materijale prema USCS klasifikaciji s obzirom da u to vreme nije postojala evropska klasifikacija. Ovaj pregled uključuje neke postojeće korelacije parametara materijala koji opisuju stanje zbijenosti i nosivosti donjih slojeva saboraćjanica.

Pregled literature na temu korelacija između parametara zbijanja i nosivosti pruža niz korelacija koje su ovde prikazane. Prva stvar koju treba primetiti je da su korelacije zasnovane na različitim graničnim uslovima. Korelacije se često daju samo za određene materijale, odnosno drugačija korelacija za pesak (Sa) nego za šljunak (Gr). Pored toga, često se pretpostavlja „dobra“ zbijenost, koja nije tačno definisana. Štaviše, često se daju samo parovi vrednosti, a ne formula koja se može koristiti za pretvaranje bilo koje vrednosti.

6.1 Postojeće korelacione zavisnosti između konvencionalnih parametara

CBR je važan parametar koji se koristi u projektovanju kolovoza. Ovde treba napomenuti da CBR vrednosti u projektovanju kolovoza ne odražavaju smičuće napone koji nastaju usled ponovljenog saobraćajnog opterećenja (Rico Rodrikuez i dr., 1988).

Turnbull i Foster (1956) su sproveli obimne studije o CBR vrednostima nakon zbijanja tla. Odredili su otpornost na prodiranje klipa u nezasićenim uzorcima gline, zbijenih pomoću četiri različite energije zbijanja i pri različitim sadržajima vlage. Dokazano je da je CBR vrednost zbijene gline zavisi od vlažnosti kao i od suve zapremine težine. Zbijeni uzorci su dostigli veće vrednosti CBR kada su primenjene veće energije zbijanja, ali se sa povećanjem vlažnosti zbijenih uzoraka smanjila vrednost CBR. Zasićenje vodom uzoraka izazvalo je smanjenje CBR vrednosti, prilično značajno kod zbijenih uzoraka „suvi deo Proktorove krive“, manje značajno pri optimalnom sadržaju vode.

Najmanje smanjenje je primećeno kod uzoraka zbijenih „vlažni deo Proktorove krive“. Rodriguez i dr. (1988) opisali su zavisnost CBR od parametara zbijanja – sadržaja vlage i suve zapremine težine, kao i od uslova zbijanja – energije i metodologije zbijanja. Autori ukazuju na činjenicu da CBR vrednost tla zbijenog sa većom energijom može biti niža od one koja je rezultat zbijenosti sa manjom energijom zbijanja.

CBR korelacije sa svojstvima materijala

Dakle, za brzu procenu vrednosti CBR-a, potrebno je povezati CBR vrednost sa svojstvima materijala koja se brzo mogu odrediti. U ovom kontekstu su radili različiti istraživači. Različite studije, npr. Black (1962), Graft-Johnson i Bhatia (1969), Agarval i Ghanekar (1970) i NCHRP (2001), fokusirale su efekat geotehničkih karakteristika tla i tipova materijala na vrednosti CBR-a. Mnogi istraživači su pokušali da razviju efikasne korelacije za predviđanje kalifornijskog indeksa nosivosti (CBR) na osnovu indeksnih svojstava materijala. Black je 1962. imao za cilj da razvije približnu metodu za brzo predviđanje vrednosti CBR. On je uspostavio modele za predviđanje vrednosti CBR na osnovu indeksa plastičnosti.

Agarval i Ghanekar su 1970. godine uspostavili vezu između vrednosti CBR i različitih indeksnih svojstava materijala. Predložen je sledeći model predviđanja koristeći granicu tečenja (W_L) i optimalnu vlažnost (w_{opt}), prikazan u jednačini 6.1

$$CBR = 2 - 16 \log(w_{opt}) + 0.07W_L \quad (6.1)$$

Yildirim i Gunaidin (2011) su predložili sledeću korelaciju za zasićenu CBR vrednost sa indeksnim svojstvima finozrnih materijala. Korelaciona zavisnost je prikazana jednačinom 6.2.

$$CBR = 0.62(w_{opt}) + 5.89 \gamma_d + 0.11W_L + 0.53I_p - 126.18 \quad (6.2)$$

Varghese George i dr. (2009), razvili su korelacije za tla od prašinstog peska (SM) i glinovitog peska (SC) između CBR i geotehničkih svojstava kao što su suva zapreminska težina (γ_d), indeks plastičnosti (I_p), sadržaj vlage (w) i granica tečenja (W_L). Autor je naveo da suva zapreminska težina ima značajan uticaj na predviđanje CBR-a. Matematički odnos je prikazan u jednačini 6.3.

$$CBR = 23.048 + 1.423 \gamma_d - 0.213I_p - 0.916w - 0.368W_L \quad (6.3)$$

Dharam Singh i dr. (2011) su razvili regresione modele uzimajući u obzir različite nezavisne indeksne parametre materijala i to sadržaj vlage, stepen zbijenosti, granicu plastičnosti i zavisne parametre kao zasićeni i nezasićeni CBR za glinovite materijale, jednačine 6.4 i 6.5.

$$CBR_{zas} = 104.71 - 0.671 * \left(\frac{w}{w_{opt}} * 100 \right) + 0.239 \left(\frac{\gamma_d}{\gamma_{dmax}} * 100 \right) - 2.004 * W_p \quad (6.4)$$

$$CBR_{nez} = -2.213 - 0.055 * \left(\frac{w}{w_{opt}} * 100 \right) + 0.328 \left(\frac{\gamma_d}{\gamma_{dmax}} * 100 \right) - 2.004 * W_p \quad (6.5)$$

Modeli predviđanja vrednosti CBR dokumentovani u Nacionalnom kooperativnom programu za istraživanje autoputeva Sjedinjenih Američkih Država - NCHRP (2001), kroz „Vodič za mehaničko-empirijsko projektovanje novih i rehabilitovanih kolovoznih konstrukcija“ su modeli koji se najviše citiraju. Model zasnovan na indeksu plastičnosti je za finozrne materijale,

pretstavljen jednačinom 6.6. Korišćen je ponderisani indeks plastičnosti (wIp), koji se izračunava uz pomoć jednačine 6.7.

$$CBR = \frac{75}{1 + 0.728wIp} \quad (6.6)$$

$$wIp = Prolaz kroz sito 0.075 mm * I_p = P_{200} * I_p \quad (6.7)$$

Za krupnozrni materijal ($I_p=0$) model zasnovan na D_{60} , prečnik na 60% prolaza iz granulometrijskog sastava materijala, jednačina 6.8.

$$CBR = 28.09D_{60}^{3581}, \text{ ako je } 0.01 \text{ mm} \leq D_{60} \leq 30 \text{ mm} \quad (6.8)$$

Mnogi istraživači poput Satyanarayana Reddy i Pavani (2007), Vinoda i Rene (2008) i Katte i dr (2018) razvili su odnose između CBR i indeksnih parametara tla na osnovu uzoraka dobijenih iz specifičnog regiona i tipa materijala.

Tabela 6.2. Rezultati još nekih prethodnih korelacija i odgovarajući statistički parametri

Autori	Razmatrani parametri i njihov opseg	Korelacije	Statistički parametar
Satyanarayana Reddy i Pavani (2006)	$F = 9.0\text{--}34.8\%$ $W_L = 22\text{--}48\%$ $\gamma_{dmax} = 19.0\text{--}23.2 \text{ kN/m}^3$ $CBR = 12.8\text{--}56.8\%$	$CBR = -0.388F - 0.064 W_L + 2.038 \gamma_{dmax}$	$R=0.96$
Vinod and Reena (2008)	$C = 33\text{--}65\%$ $W_L = 38.10\text{--}63.00\%$ $CBR = 8.9\text{--}30.4\%$	$CBR = -0.889W_{LM} + 45.616$ Gde je $W_{LM} = W_L (1-C/100)$	$R=0.979$
Roy i dr. (2009)	$\gamma_{dmax} = 15.2\text{--}18.4 \text{ kN/m}^3$ $w_{opt} = 12.0\text{--}21.9\%$	$\text{Log}(CBR) = \text{Log}(\gamma_{dmax} / \gamma_w) - \text{Log}(w_{opt})$	-
Patel i Desai (2010)	$W_L = 52.98\text{--}70.78\%$ $W_P = 17.09\text{--}26.8\%$ $W_s = 8.03\text{--}19.5\%$ $\gamma_{dmax} = 15.8\text{--}17.3 \text{ kN/m}^3$ $w_{opt} = 17.23\text{--}24.70\%$ $I_p = 24.19\text{--}74.78$ $CBR = 1.54\text{--}4.42\%$	$CBR = 43.907 - 0.093I_p - 1.878 \gamma_{dmax} - 0.3081w_{opt}$	-
Katte i dr. (2018)	$W_L = 43.6\text{--}92.6\%$ $w_{opt} = 9.6\text{--}16.5\%$ $CBR = 14.2\text{--}49.5\%$	$CBR = -175.006 + 9.9869\gamma_{dmax}$ $CBR = 99.086 - 5.162w_{opt}$ $CBR = 24.377 + 0.151W_L$	$R=0.879$ $R=0.861$ $R=0.189$
Gde je: CBR kalifornijski indeks nosivosti, F procentualni sadržaj gline i prašine ($F \% < 0.075 \text{ mm}$), C sadržaj frakcije ($C \% > 0.425 \text{ mm}$), W_{LM} – modifikovana granica tečenja, W_L granica tečenja, W_P granica plastičnosti, W_s granica skupljanja, I_p indeks plastičnosti, γ_{dmax} max. suva zapreminska masa, ρ_w zapreminska masa vode, w_{opt} optimalna vlažnost.			

Opšti odnosi se takođe razvijaju korišćenjem univerzalno prihvaćenih sistema klasifikacije materijala. Ove korelacione metode imaju opšti pristup i pokušavaju da obuhvate mnoge ili sve moguće tipove materijala. Rezultati još nekih prethodnih korelacija i odgovarajući statistički parametri dati su u Tabeli 6.2.

CBR korelacije sa paremetrima statičkih i dinamičkih ispitivanja nosivosti (E_{v1} - E_{v2} , E_{vd} , M_s)

Utvrđeni odnos parametara modula deformacije (E_{v2}), dinamičkog modula deformacije (E_{vd}), modula stišljivosti (M_s) i vrednosti kalifornijskog indeksa nosivosti (CBR), koje se mogu koristiti za određivanje merodavnih vrednosti nosivosti podloge kolovozne konstrukcije navedene su u Tabeli 6.3.

Tabela 6.3. Odnos nosivosti parametara podloge
(Priručnik za projektovanje puteva u Republici Srbiji, 2012)

Vrednost CBR	Modul deformacije E_{v2}		Dinamički modul deformacije E_{vd}	Modul stišljivosti M_s
	koherentno tlo	nekoherentno tlo		
%	MN/m ²	MN/m ²	MN/m ²	MN/m ²
3	15	-	-	4
5	20	-	10	8
7	(30)	45	20	13
10	-	60	25	20
15	-	80	35	35
20	-	100	45	50

Informativna procena vrednosti CBR, u zavisnosti od vrste materijala, zapreminske mase i hidroloških uslova, navedena je u Tabeli 6.4.

Tabela 6.4. Procena vrednosti CBR
(Priručnik za projektovanje puteva u Republici Srbiji, 2012)

Klasifikacija materijala (USCS)	Opis materijala	Zapreminska masa (t/m ³)	Vrednosti CBR (%) Hidrološki uslovi	
			povoljni	nepovoljni
GW	dobro granuliran šljunak	2.00 – 2.25	30	30
GP	slabo granuliran šljunak	1.75 – 2.10	20	20
SW	dobro granuliran pesak	1.75 – 2.10	15	15
SP	slabo granuliran pesak	1.65 – 1.90	10	10
GM	prašinski šljunak	2.10 – 2.30	20	15
GC	glinoviti šljunak	1.90 – 2.25	7	5
SM	prašinski pesak	1.90 – 2.15	10	7
SC	glinoviti pesak	1.70 – 2.10	5	3
CL	prašinska glina	1.60 – 1.80	5	3
ML	prašina	1.60 – 1.80	3	2

U švajcarskom standardu SN 640 317 b nosivost podloge je podeljena na klase. Modul deformacije (prvi stupanj opterećenja) E_{v1} i CBR vrednost su uključeni kao parametri nosivosti (Tabela 6.5). Sa vrednostima CBR < 3% ili modulima E_{v1} < 4,5 MN/m², nosivost je opisana kao niska, a sa vrednostima CBR > 25% ili modulima E_{v1} > 45 MN/m² kao veoma visoka.

Tabela 6.5. Klase nosivosti podloge kolovozne konstrukcije (Švajcarski standard SN 640 317 b)

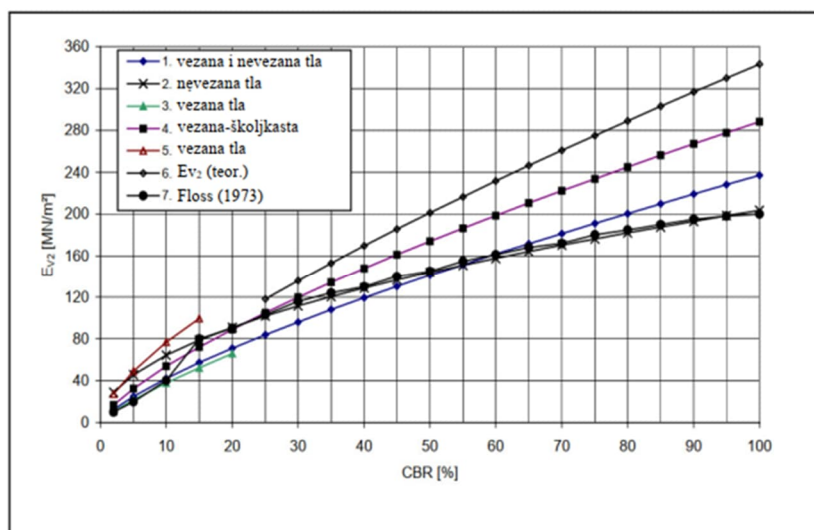
Klase nosivosti	E_{v1} (MN/m ²)	CBR vrednost (%)
S0 – veoma nizak	< 4.5	< 3
S1 – nizak	4.5 – 11.25	3 – 6
S2 – srednji	> 11.25 – 22.5	> 6 – 12
S3 – visok	> 22.5 – 45.0	> 12 – 25
S4 – veoma visok	> 45.0	> 25

Floss (1973) ističe da su za koherentne i nekoherentne materijale proporcija plastične deformacije prvog i drugog opterećenja E_{v1} - E_{v2} , a samim tim i odnos modula deformacije E_{v2}/E_{v1} veoma različiti. Nekoherentni materijali su skloniji daljem zbijanju od koherentnih materijala. Shodno tome, ne može postojati jednaka veza između CBR i E_{v1} i između CBR i E_{v2} u koherentnih i nekoherentnim materijalima. Iz tog razloga, autor pravi razliku kada definiše odnos između vrednosti CBR i modula E_{v1} i E_{v2} za različite tipove materijala (Tabela 6.6).

Tabela 6.6. Odnos između modula deformacije E_{v1} - E_{v2} i CBR vrednosti (Floss, 1973)

CBR (%)	E_{v1} (MN/m ²)	E_{v2} (MN/m ²)		CBR (%)	E_{v1} (MN/m ²)	E_{v2} (MN/m ²)	
		Koher. materijal	Nekoher. materijal			Koher. materijal	Nekoher. materijal
2,0	6,6	10,7	-	10,0	21,0	35,0	61,0
3,0	9,0	15,0	-	13,6	27,0	45,0	-
4,0	10,9	18,5	-	15,0	28,3	-	76,0
4,5	12,0	20,0	-	16,4	30,0	-	80,0
5,0	12,9	22,0	43,0	20,0	35,0	-	90,0
5,6	14,0	-	45,0	24,0	40,0	-	100,0
6,0	14,6	24,5	47,0	30,0	46,5	-	112,0
6,2	15,0	25,0	-	34,0	51,0	-	120,0
7,0	16,2	27,5	-	40,0	57,5	-	131,0
8,0	18,0	30,0	50,0	50,0	68,0	-	147,0
9,0	19,5	33,0	58,0	85,0	100,0	-	187,0
9,6	20,5	-	60,0				

Prema studijama Floss (1973), E_{v2} modul od 45 MN/m² odgovara vrednosti CBR od 13,6% za kohezivna tla i CBR vrednosti od 5,6% za nekohezivna tla. E_{v2} modul od 100 MN/m² odgovara vrednosti CBR od oko 24% u nekohezivnim materijalima.

Slika 6.1. Korelaciona zavisnost između vrednosti CBR i modula deformacije E_{v2} (sastavio na osnovu literaturnih podataka, Weingart 1998)

Weingart (1998) sakuplja utvrđene korelacione zavisnosti između CBR vrednosti i modula deformacije E_{v2} iz referentne literature, koje su prikazane na Slici 6.1.

Jednačine kriva između modula deformacija E_{v2} i CBR vrednosti date su u Tabeli 6.7.

Tabela 6.7. Uspostavljene zavisnosti između modula deformacija E_{v2} i CBR vrednosti (sastavio na osnovu literaturnih podataka, Weingart 1998)

Jednačine između E_{v2} i CBR	Vrsta tla/materijala
$E_{v2} = 7.5 \cdot \text{CBR}^{0.75}$	vezana i nevezana
$E_{v2} = 20.35 \cdot \text{CBR}^{0.5}$	nevezana
$E_{v2} = 6 \cdot \text{CBR}^{0.8}$	vezana
$E_{v2} = 17.6 \cdot \text{CBR}^{0.64}$	Vezana (TRRL-laboratorija UK)
$E_{v2 \text{ teor.}} = 9.9 \cdot \text{CBR}^{0.77}$	E_{v2} (teorijski)

Korelacije između parametara statičkih i dinamičkih ispitivanja nosivosti (E_{v1} - E_{v2} , E_{vd} , M_s)

Obimno istraživanje literature na temu korelacija između statičkih i dinamičkih ispitivanja pruža niz korelacija koje su ovde predstavljene. Prva stvar koju primetite je da su korelacije zasnovane na različitim graničnim uslovima.

Najpoznatija korelacija je $E_{v2} = 2 \cdot E_{vd}$. To se takođe ustalilo u praksi jer se bez problema može koristiti direktno na gradilištu. Interesantna činjenica je da kada se porede austrijski i nemački korelacioni pristup, u Austriji je vrednost dinamičkog modula deformacije (E_{vd}) u korelaciji sa vrednošću modula deformacije prvog stupnja opterećenja (E_{v1}), a ne sa vrednošću drugog stupnja opterećenja (E_{v2}) kao u Nemačkoj.

Bobe Rolf i Helga Hubacek (1986) su dali jednu od prvih korelacija između ova dva ispitivanja za šljunak i pesak. Međutim, razlika je napravljena samo na osnovu koeficijenta uniformisanosti:

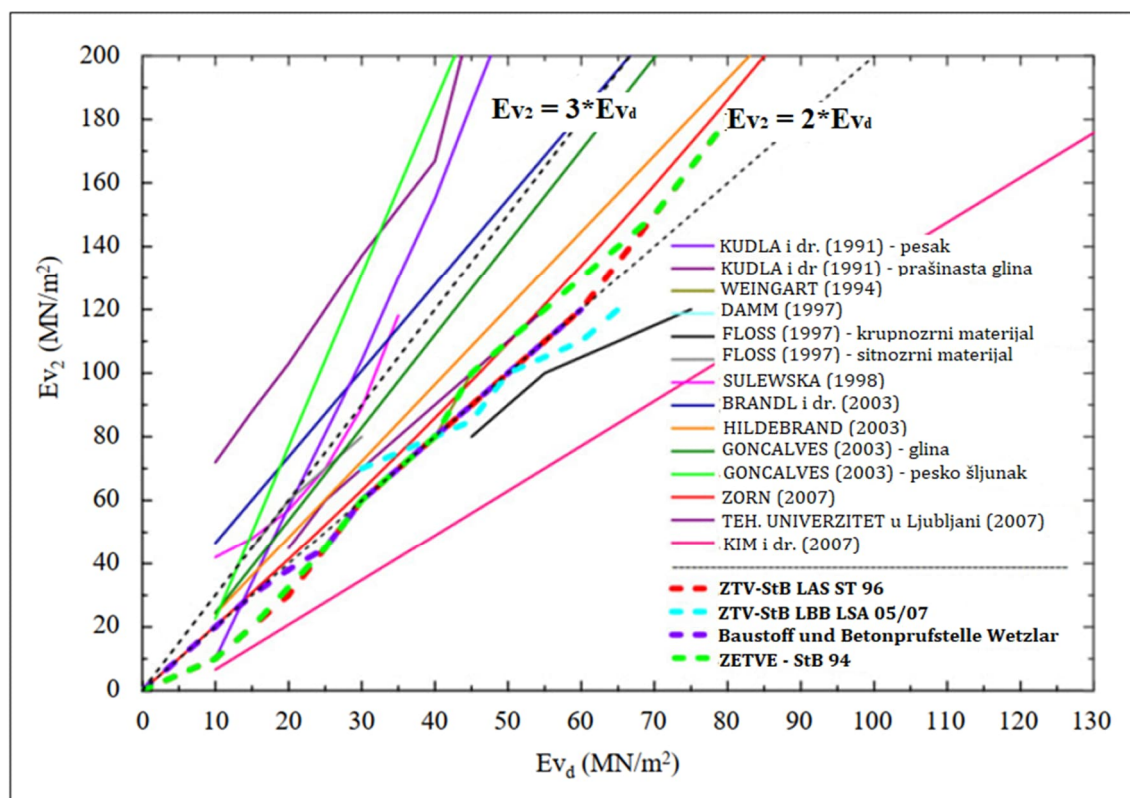
$$\text{Za } C_u \leq 3; E_{vd} = 40 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2} \Rightarrow E_{v2} = 50 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2} \quad (6.9)$$

$$\text{Za } C_u > 3; E_{vd} = 50 \text{ MN/m}^2 \Rightarrow E_{v2} = 60 \text{ MN/m}^2 \quad (6.10)$$

Postoje određene korelacije između E_{v2} i E_{vd} koje su dostupne u međunarodnoj literaturi. Najrelevantniji rezultate je sumirao Tompa (2008) i prikazani su na Slici 6.2.

U četiri različita nemačka standarda daju se slične granične vrednosti, koje su takođe prikazane na Slici 6.2 (podebljane isprekidane crtice). Slika 6.2 pokazuje da vrednost ispitivanog modula statičkog opterećenja ploče (E_{v2}) očigledno premašuje najmanje dva puta veću vrednost od E_{vd} modula. Neki od rezultata pokazuju čak i veće odnose. Samo dve korelacione zavisnosti daju odnos manji od dva, ali su obe zasnovane na vrednostima modula merenim samo u nekoliko tačaka i u malim intervalima.

Takođe se može jasno primetiti da svi nemački standardi definišu potrebne dinamičke vrednosti oko korelacione linije koja odražava odnos dva. To znači da većina standarda primenjuju najniži koeficijent konverzije (ili čak nešto manji) za određivanje graničnih vrednosti dinamičkog modula (E_{vd}).



Slika 6.2. Korelacione zavisnosti između vrednosti E_{v2} i E_{vd} za sitnozrne i krupnozrne materijale na osnovu literaturnih podataka (Tompai, 2008)

Tabela 6.8 predstavlja odnos između modula deformacije E_{v2} i dinamičkog modula deformacije E_{vd} za sva sitnozrna i krupnozrna tla (Nemački institut za istraživanje puteva i saobraćaja - FGSV). Iz tabele se može zapaziti da je srednja vrednost odnosa $E_{v2}/E_{vd} = 1,9$, približno 2. Iz tog razloga, takođe je od velikog interesa razmotriti pravilo $E_{v2} = 2 E_{vd}$.

Tabela 6.8. Korelacije za sitnozrne i krupnozrne materijale, između modula deformacije E_{v2} i dinamičkog modula deformacije E_{vd}

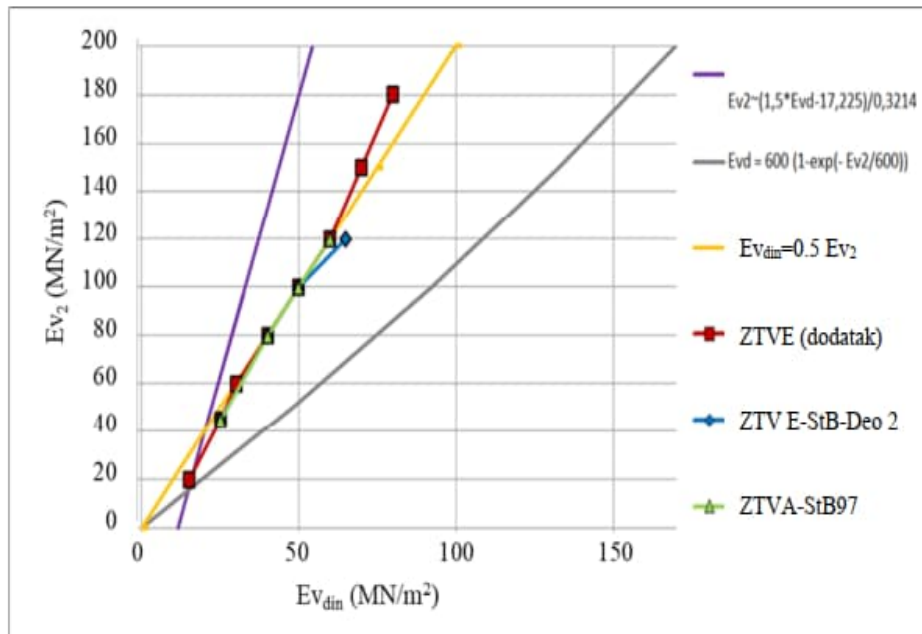
Izvor	E_{v2}	E_{vd}	E_{v2}/E_{vd}	Materijal
	MN/m ²	MN/m ²	-	
ZTV E-StB 2009, (Deo 2) Dodatni tehnički uslovi i smernice za zemljane radove u izgradnji puteva	120	65	1.8	Sitnozrni i krupnozrni
	100	50	2	
	80	40	2	
	45	25	1.8	
ZTVT (Dodatak)	180	80	2.3	
	150	70	2.1	
	120	60	2	
	100	50	2	
	80	40	2	
	60	30	2	
	45	25	1.8	
	20	15	1.3	
ZTVA-StB97 (Prilog 14)	120	60	2	
	100	50	2	
	80	40	2	
	45	25	1.8	

Postoje korelacioni pristupi koji su dati i jednačinama 6.11 (Adam i Kopf, 2002) i 6.12 (Seminar NRW, 2006):

$$Ev_{din} = 600(1 - \exp(-Ev_2/600)) \quad (6.11)$$

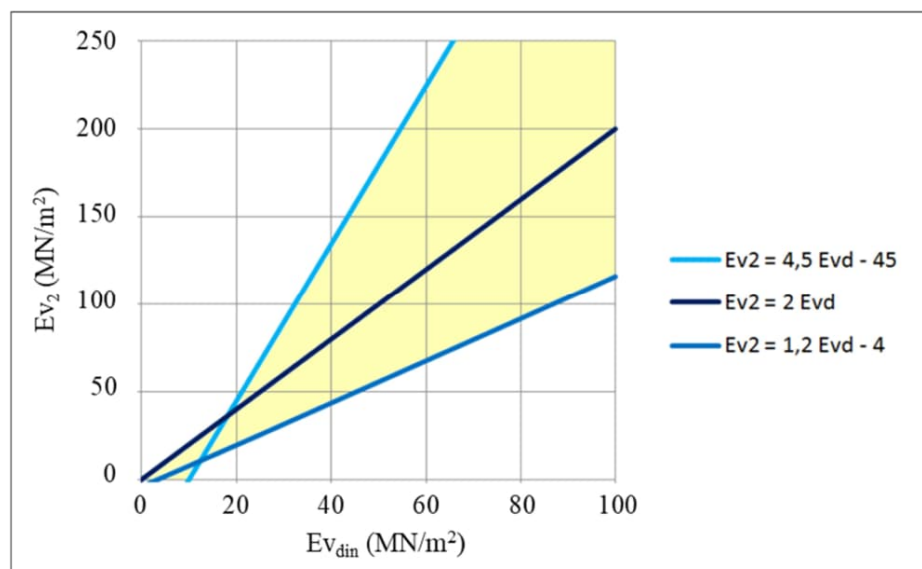
$$Ev_2 \sim (1.5 * Ev_{din} - 17.225)/0.3214 \quad (6.12)$$

Lehmann (2011) je navedene korelacione zavisnosti iz tabele 6.8 kao i vrednositi parova jednačina 6.11 i 6.12 između parametara Ev_2 i Ev_{vd} prikazao grafički na Slici 6.3.



Slika 6.3. Korelacione zavisnosti između vrednosti Ev_2 i Ev_{vd} za sitnozrne i krupnozrne materijale (Lehmann, 2011)

Slika 6.4 sa uprošćenim graničnim jednačinama je koristan i sumirajući rezultat (Lehmann, 2011).



Slika 6.4. Uprošćene korelacione zavisnosti između vrednosti Ev_2 i Ev_{vd} (Lehmann, 2011)

Uprošćavanjem graničnih jednačina 6.11 i 6.12 iste se mogu napisati u drugom obliku kao jednačine 6.13 i 6.14:

$$Ev_2 = 4.5Ev_d - 45 \quad (6.13)$$

$$Ev_2 = 1.2Ev_d - 4 \quad (6.14)$$

Takođe je lako zapaziti iz ovih uprošćenih jednačina da je njihov nagib (odnos E_{v2} prema E_{vd}) između 1,2 i 4,5. Prema literaturi, na primer, izmereni $E_{vd} = 40 \text{ MN/m}^2$ može se pripisati $E_{v2} = 135 \text{ MN/m}^2$, ali i 44 MN/m^2 . Opšte pravilo je tada 80 MN/m^2 . Pojedinačna ispitivanja iz prakse još više odstupaju

Takođe nemački institut za istraživanje puteva i saobraćaja, predstavio je korelaciju različitih zrnastih tla sa minimalnim zahtevima za deformabilnost i stepen zbijenosti uočenim na terenu. Granulometrijska klasifikacija je prema standardu DIN 18 196, koja podržava pomenutu korelaciju koja je prikazana u Tabeli 6.9. (ZTVE – STB 09, 2009).

*Tabela 6.9. Korelacije za krupnozrna, sitnozrna i mešana tla, modul deformacije E_{v2} , dinamički modul deformacije E_{vd} i stepen zbijenosti R_c
(prilagođeno iz priručnika za laki deflektometar – LWD, ZFG 3.0, Zorn, 2016)*

Vrsta tla	Stepen zbijenosti R_c	Modul deformacije E_{v2}	Dinamički modul def. E_{vd}
DIN 18 196	%	MN/m^2	MN/m^2
GW, GI (npr. kamenito zemljište ili mineralni agregat 0/32)	≥ 103	≥ 120	≥ 60
	≥ 100	≥ 100	≥ 50
	≥ 98	≥ 80	≥ 40
	≥ 97	≥ 70	≥ 35
GE, SE, SW, SI	≥ 100	≥ 80	≥ 40
	≥ 98	≥ 70	≥ 35
	≥ 97	≥ 60	≥ 32
mešana i sitnozrna tla	≥ 100	≥ 45	≥ 25
	≥ 97	≥ 30	≥ 15
	≥ 95	≥ 20	≥ 10

U Srbiji su date granične vrednosti za vrednost E_{v2} odnosno vrednosti dinamičkih deformacionih modula E_{vd} treba da iznose najmanje 50 % navedenih vrednosti deformacionih modula E_{v2} (u skladu sa tehničkim uslovima građenja puteva u Republici Srbiji, 2012).

Kao merodavna korelacija između parametara E_{vd} i E_{v1} može se odabrati predolog Adama (2008) za Austrijsku regulativu. U Austriji, vrednost E_{vd} je u korelaciji sa vrednošću E_{v1} , a ne sa vrednošću E_{v2} (Slika 6.5).

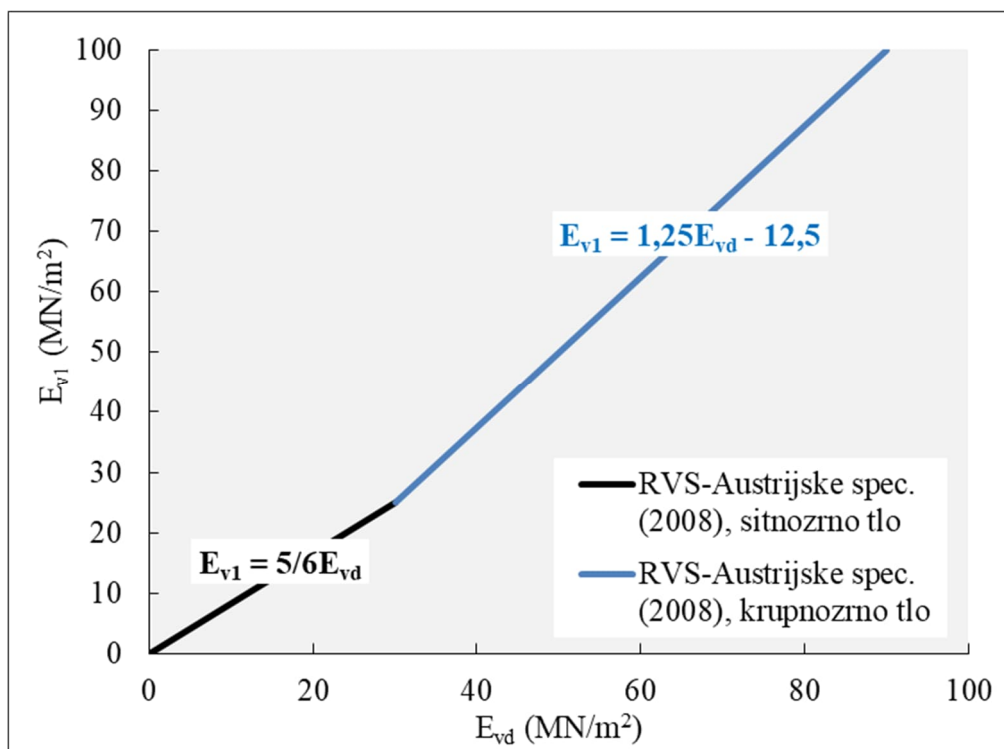
Korisna napomena koja se može izdvojiti za odnos između E_{vd} i E_{v1} prikazanog na Slici 6.5 za sitnozrna i krupnozrna tla je sledeća:

- kada je $E_{vd} \leq 50 \text{ MPa}$, $E_{vd} > E_{v1}$ i kada $E_{vd} \geq 50 \text{ MPa}$, $E_{v1} > E_{vd}$

Korelaciona zavisnost za sitnozrna i krupnozrna tla prikazana je jednačinama 6.15 i 6.16.

$$\text{Sitnozrno tlo} - \text{Za } Ev_1 \leq 25 \text{ MN/m}^2 \Rightarrow Ev_1 = 5/6 Ev_d \Rightarrow Ev_d = 1,2Ev_1 \quad (6.15)$$

$$\text{Krupozrno tlo Za } Ev_1 > 25 \text{ MN/m}^2 \Rightarrow Ev_1 = 1.25Ev_d - 12.5 \quad (6.16)$$



Slika 6.5. Korelaciona zavisnost između vrednosti modula deformacije E_{v1} i dinamičkog modula deformacije E_{vd} (RVS, Austrijske specifikacije)

Preuzimanjem inostrane regulative, pre svega nemačke i austrijske, koje ne daju vezu između E_{vd} - M_s ali uz modul deformacije E_{v1} - E_{v2} uvodi i kriterijume nosivosti preko E_{vd} , pa bi se mogla uspostaviti korelacija inostranih graničnih vrednosti E_{vd} i domaćih M_s .

Samardaković (2009) predlaže korelacije E_{vd} - M_s na osnovu veza E_{vd} - E_{v1} , koje je u svom radu prikazao Adam, D. (2008). Matematički odnos je prikazan u jednačinama 6.17, 6.18 i 6.19:

Sitnozrno tlo:

Za $E_{vd} \leq 30 \text{ MN/m}^2$ ($M_s \leq 35 \text{ MN/m}^2$)

$$M_s = 1.75(E_{vd} - 10); \quad E_{vd} = 0.57M_s + 10 \quad (6.17)$$

Krupnozrno tlo:

Za $E_{vd} \leq 30 \text{ MN/m}^2$ ($M_s \leq 35 \text{ MN/m}^2$)

$$M_s = 1.16E_{vd}; \quad E_{vd} = 0.86M_s \quad (6.18)$$

Za $E_{vd} > 30 \text{ MN/m}^2$ ($M_s > 35 \text{ MN/m}^2$)

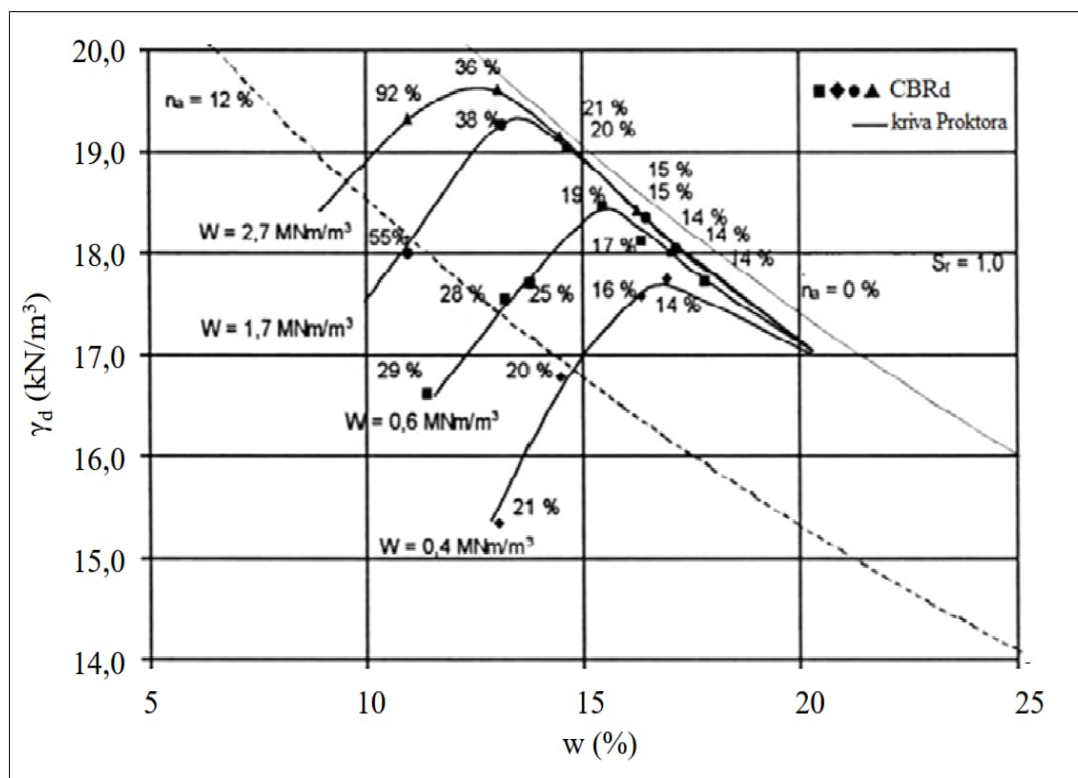
$$M_s = 1.42(E_{vd} - 30) + 35; \quad E_{vd} = 0.71(M_s - 35) + 30 \quad (6.19)$$

6.2 Korelacione zavisnosti između dinamičkog CBR_d i parametara konvencionalnih ispitivanja zbijanja i nosivosti

Rezultati dinamičkog CBR-a su izuzetno slabo zastupljeni u literaturi, što je verovatno posledica slabe rasprostranjenosti ove metode u svetu. Prvu studiju CBR_d , urađenu na materijalima za puteve,

predstavili su Weingard i dr. (1986). Dobra korelacija između rezultata ispitivanja dobijena je statičkom i dinamičkom metodom.

Studija koju su sprovedeli Schmidt i Volm (2000) predstavlja rezultate istraživanja CBR_d -a sprovedenog na kohezivnom tlu sa različitim uslovima zbijanja. Istraživanje je sprovedeno za glinoviti materijal sa sadržajem vlage od 11 do 18%, tj. oko $\pm 4\%$ w_{opt} . Maksimalna suva zapreminska težina iznosila je $\gamma_{dmax} = 18,2 \text{ kN/m}^3$ sa optimalnom vlagom od $w_{opt} = 15,6 \%$. Karakteristike plastičnosti materijala su definisane sledećim parametrima: granica tečenja ($W_L = 32,8\%$), granica plastičnosti ($W_P = 16,7\%$), indeks plastičnosti ($I_P = 16,1\%$). CBR_d ispitivanja sprovedena su u laboratoriji na uzorcima tla zbijenih sa različitim energijama zbijanja i sadržajem vode (Slika 6.6).



Slika 6.6. Proktorove krive za različite uslove zbijanja sitnozrnog tla sa pripadajućim vrednostima CBR_d , (Schmidt i Volm, 2000)

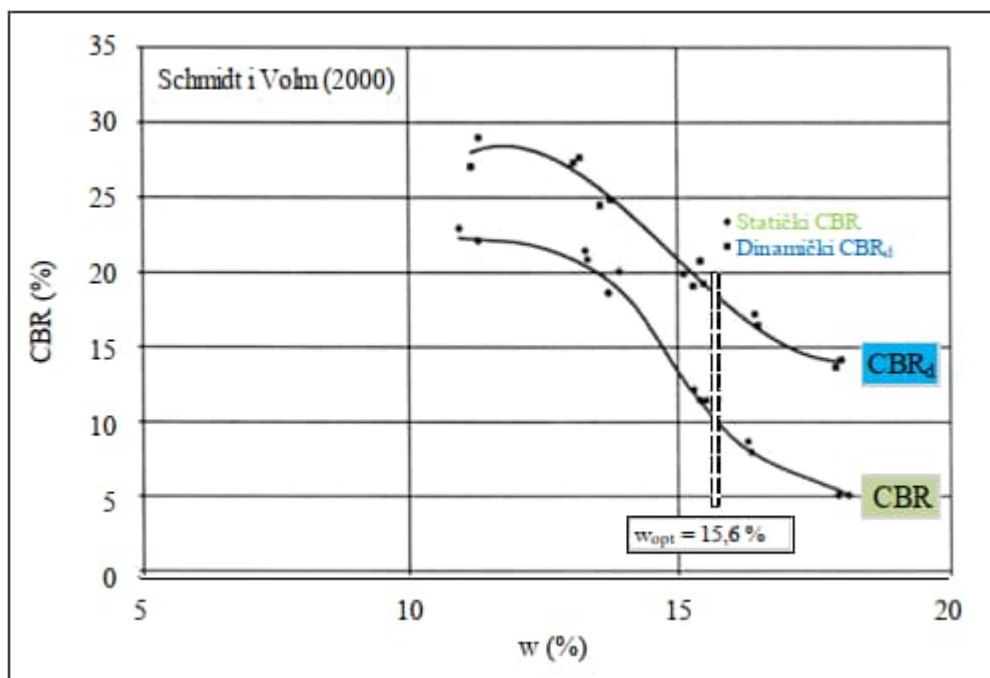
Sa Slike 6.6 se može videti da su vrednosti CBR_d -a, a time i nosivost, u velikoj meri zavisne od sadržaja vode. Vrednosti CBR_d su veće kada tlo sadrži manje vode, odnosno one se smanjuju sa povećanjem sadržaja vode. U slučaju uzoraka s valžnošću ispod optimalne (w_{opt}), povećanje zbijenosti takođe uzrokuje povećanje vrednosti CBR_d . U slučaju vlažnosti veće od w_{opt} , povećanje energije zbijanja dovodi do smanjenja CBR_d vrednosti. To znači da se povećanje nosivosti može postići samo zbijanjem materijala sa vlažnošću ispod w_{opt} .

Rezultati istraživanja CBR_d su usko povezani sa karakteristikama zbijenosti. Dakle, uz pretpostavku istih uslova zbijanja CBR_d ispitivanja (nosivosti) i Proktorovog opita u laboratorijskim uslovima kao i određivanjem graničnih vrednosti CBR_d koje treba postići, CBR_d ispitivanja na terenu mogu se koristiti za donošenje zaključaka o stepenu zbijenosti. Dinamičko CBR_d ispitivanje iz tog razloga zadovoljava zahteve kontrolnog ispitivanja, tj. pruža informacije o nosivosti i stupnju zbijenosti.

Korelaciona zavisnost za potrebe zemljanih radova može se uočiti između statičkog i dinamičkog CBR ispitivanja za gore pomenuti materijal sa vlažnostima manjim od w_{opt} . Što je veći sadržaj vode, veća je razlika između statičke i dinamičke CBR vrednosti. S jedne strane to je povezano sa

povećanjem pornih pritisaka, a sa druge strane s prigušivanjem udarnog opterećenja usled pojave trenja u dinamičkom CBR testu (Schmidt i Volm, 2000). Slika 6.7 prikazuje rezultate statičkih i dinamičkih laboratorijskih ispitivanja CBR-a sprovedenih pod istim uslovima (sadržaj vode, energija zbijanja).

Kao rezultat laboratorijskih studija, pomenuti autori su dobili dve krive $CBR_d(w)$ i $CBR(w)$, kod kojih je razlika u CBR vrednostima iznosila od 5 – 7 %. U slučaju sadržaja vlage većeg od optimalnog, razlika između statičkih i dinamičkih vrednosti se menja na približno 9%. Veća vrednost nosivosti dobijena je dinamičkim ispitivanjima. Autori su predložili dinamički CBR_d za kontrolna istraživanja pri izgradnji nasipa uz upotrebu sitnozrnog tla sabijenog pri sadržaju vlage nižem od optimalnog.



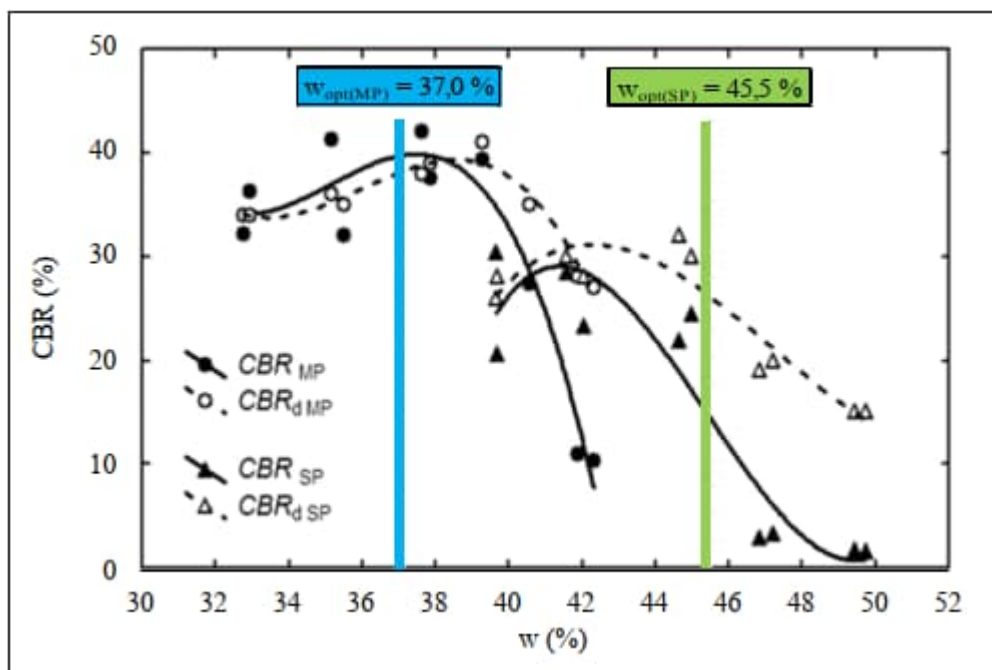
Slika 6.7. Korelacione zavisnosti statičkih i dinamičkih CBR ispitivanja za koherentno sitnozrno tlo (Schmidt i Volm, 2000)

Pored ispitivanja koja su vršena na sitnoznom tlu, autori su vršili ispitivanja i na krupnozrnim materijalima.

Poređenje rezultata CBR istraživanja obavljenog za statičke-klasične (CBR) i dinamičke metode (CBR_d) na uzorcima pepela (materijal dobijen iz termoelektrane u Bjalistoku u Poljskoj) u stanju prikazano je u radu Zabielska-Adamska, K. and Sulewska, M. J. (2015). U zavisnosti od sadržaja vlage pri sabijanju primenom standardne (SP) i modifikove (MP) energije zbijanja - Zbijanje po Proktoru, prikazani su na Slici 6.8.

CBR uzoraka letećeg pepela zbijenih standardnom energijom (SP) dostiže najveće vrednosti pri sadržaju vlage nižem od optimalnog. Uzorci sabijeni iznad optimalnog sadržaja vode imaju još niže vrednosti CBR istovremeno sa povećanjem sadržaja vlage. Ovi odnosi se mogu posmatrati u obe metode zbijanja — standardnoj metodi i modifikovanoj metodi.

Oblik krivih $CBR_d - (w)$ je sličan obliku dobijenom po standardnoj metodi – $CBR - (w)$. U slučaju modifikovanog zbijanja, krive $CBR_d(w)$ i $CBR(w)$ karakteriše sličan sadržaj vlage u intervalu od $w_{opt(MP)} - 5\%$ do optimalnog sadržaja vlage (razlika vrednosti statičkog i dinamičkog CBR-a ne prelazi više od 2,5%). Pri vlažnosti $w_{opt(MP)} + 5\%$ razlika vrednosti statičkog i dinamičkog CBR-a prelazi više od 15%.



Slika 6.8. Poređenje rezultata CBR ispitivanja na uzorcima pepela u odnosu na vlažnost pri sabijanju: MP - modifikovana, SP - standardna energija zbijanja - Zbijanje po Proktoru; (Zabielska-Adamska, K. i Sulewska, M. J., 2015)

U slučaju standardne energije zbijanja, na nivou vlage $w_{opt(SP)}$ –5%, vrednost CBR_d jednaka je vrednosti CBR. Nakon toga, kako se sadržaj vlage povećava, razlika se takođe povećava i kada je nivo vlage jednak $w_{opt(SP)}$, razlika vrednosti statičkog i dinamičkog CBR-a prelazi više od 5%.

Korelacione zavisnosti su definisane polinomskim jednačinama:

$$CBR (MP) = -1026.64 + 59.09w - 0.82w^2 \quad R^2 = 0.8751 \quad (6.20)$$

$$CBR_d (MP) = -467.44 + 27.46w - 0.37w^2 \quad R^2 = 0.7768 \quad (6.21)$$

$$CBR (SP) = -297.17 + 16.96w - 0.22w^2 \quad R^2 = 0.8047 \quad (6.22)$$

$$CBR_d (SP) = -519.42 + 25.88w - 0.30w^2 \quad R^2 = 0.8468 \quad (6.23)$$

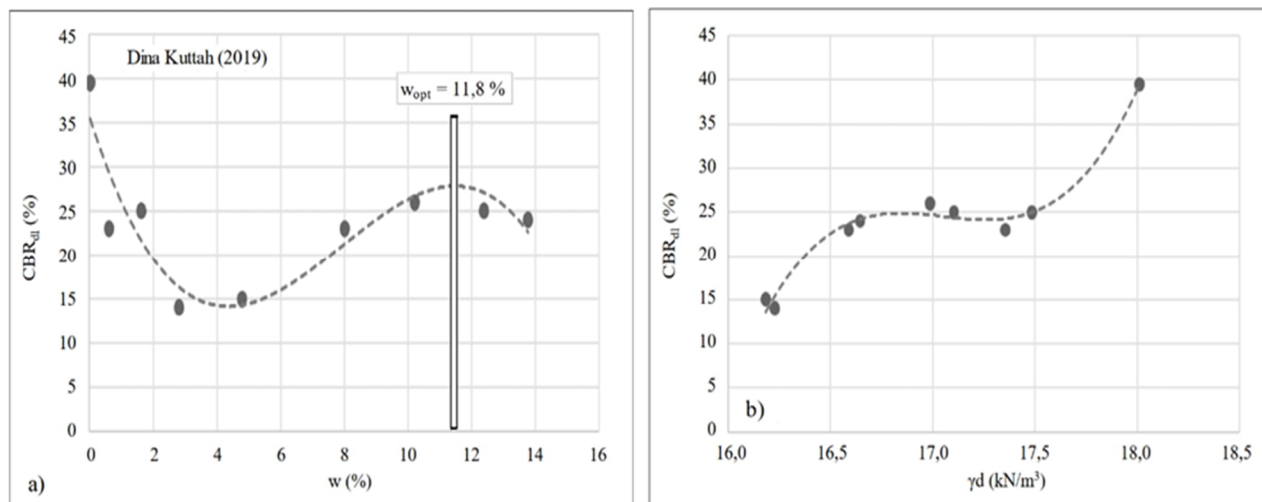
Zabielska-Adamska, K. i Sulewska, M. J. (2015) su izvršile laboratorijska istraživanja kako bi povezale rezultate CBR ispitivanja za statički (klasični) i dinamički metod na uzorcima pepela. Uzorci su pripremljeni i zbijani primenom standardne (SP) i modifikove (MP) energije zbijanja - Zbijanje po Proktoru, sa različitim vlažnostima blizu optimalne w_{opt} . Program laboratorijskih istraživanja rezultirao je kvantitativnim korelacijama između CBR i CBR_d na sledeći način:

$$CBR_d (SP) = 12.29 + 0.66CBR \quad SEE = 2.44\% \quad R^2 = 0.9030 \quad (6.24)$$

$$CBR_d (MP) = 14.69 + 0.59CBR \quad SEE = 3.02\% \quad R^2 = 0.8520 \quad (6.25)$$

Gde je CBR_d dinamički kalifornijski indeks nosivosti, izražen u %.

Dina Kuttah (2019) je vršila istraživanje sa primarnim ciljem da poveže laboratorijski dinamički kalifornijski indeks nosivosti (CBR_{dl}) sa karakteristikama zbijanja izabranog peskovitog materijala. Podatke o CBR_{dl} i zbijanju je statistički analizirala i razvila modele za procenu vrednosti CBR_{dl} na osnovu dva konvencionalna parametra zbijanja (vlažnost, suva zapreminske težina), Slika 6.9.



Slika 6.9. CBR_{dl} u odnosu na vlažnost i suhu zapreminsku težinu (Kuttah, 2019)

U svom radu je dala korelacione zavisnosti između parametra laboratorijskog dinamičkog kalifornijskog indeksa nosivosti (CBR_{dl}) i parametara Proktorovih ispitivanja. Pokazano je da CBR_{dl} može biti u korelaciji sa suvom zapreminskom težinom (γ_d) i sadržajem vode (w) u kalupu koristeći polinomske jednačine:

$$CBR_{dl} (\%) = -0.0757w^3 + 1.7955w^2 - 11.318w + 35.589 \quad R^2 = 0.896 \quad (6.26)$$

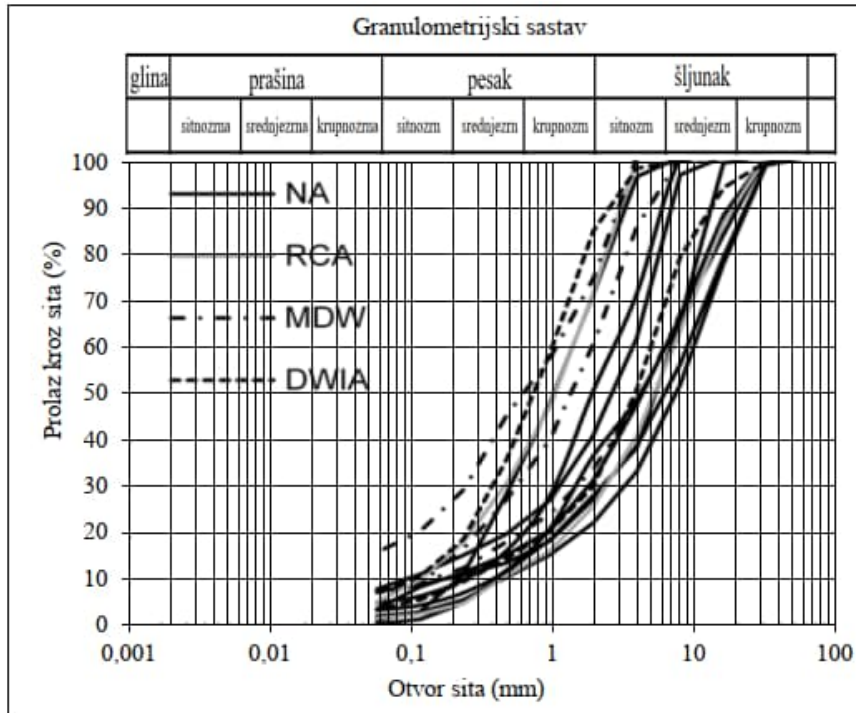
$$CBR_{dl} (\%) = 19.915\gamma_d^3 - 1018.97\gamma_d^2 + 17376\gamma_d - 98729 \quad R^2 = 0.990 \quad (6.27)$$

Visok koeficijent korelacije jednačina (6.26) i (6.27) ukazuje na dobru zavisnost laboratorijskog dinamičkog CBR_{dl} sa konvencionalnim parametrima zbijanja (tj. sadržaja vode i suve zapreminske težine). Iz tog razloga autor je kao primarni cilj istraživanja prikazao jednostavnu korelaciju višestruke regresivne analize. Matematički odnos je prikazan u jednačini 6.28.

$$CBR_{dl} (\%) = 0.3546w + 11.83\gamma_d - 178.866 \quad R^2 = 0.913 \quad (6.28)$$

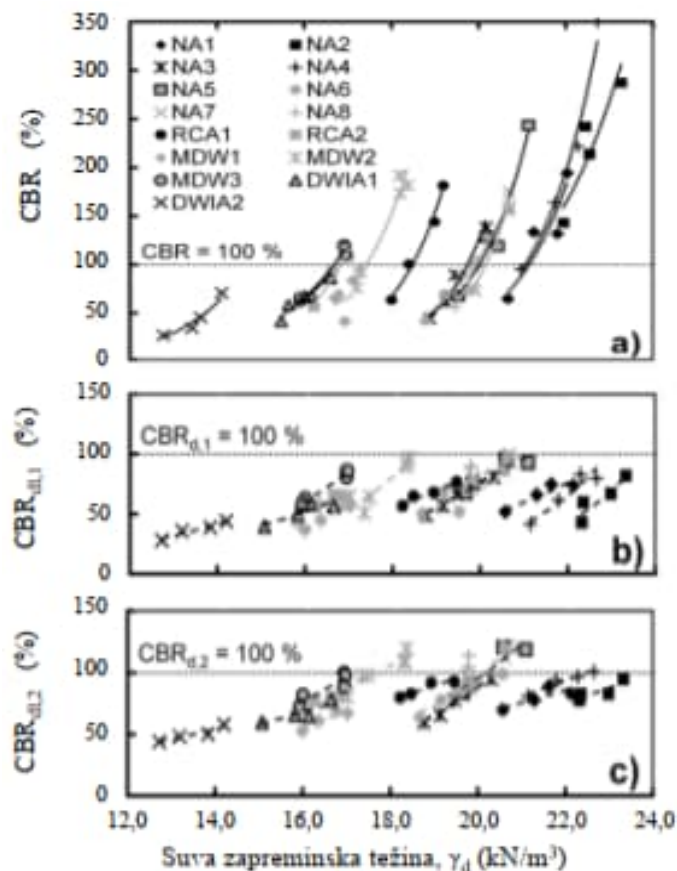
gde je sadržaj vode izražen u %, a zapreminska težina u kN/m^3 .

Christoph Henzinger i Stefan Vogt (2019) su u svom radu na osnovu eksperimentalnih podataka iz laboratorijskih i terenskih ispitivanja, dali ocenu primene dinamičkog CBR_d -a na krupnozrnim materijalima. Ukupno su koristili 15 materijala: 8 prirodnih agregata (NA), 2 reciklirana betonska agregata (RCA), 3 agregata iz recikliranog mešanog otpada od rušenja (MDW = prvenstveno se sastoji od RCA plus drobljene cigle) i 2 agregata kategorizovana kao pepeo (DVIA). Krive granulometrijskog sastava navedenih materijala prikazane su na Slici 6.10. Materijali su zbijani do različitih suvih zapreminskih težina, a ispitivani su konvencionalnim i dinamičkim CBR ispitivanjima. Dodatna terenska ispitivanja izvršena su na četiri materijala.



Slika 6.10. Granulometrijski sastav ipitivanih materijala (Henzinger, C. i Vogt, S., 2019)

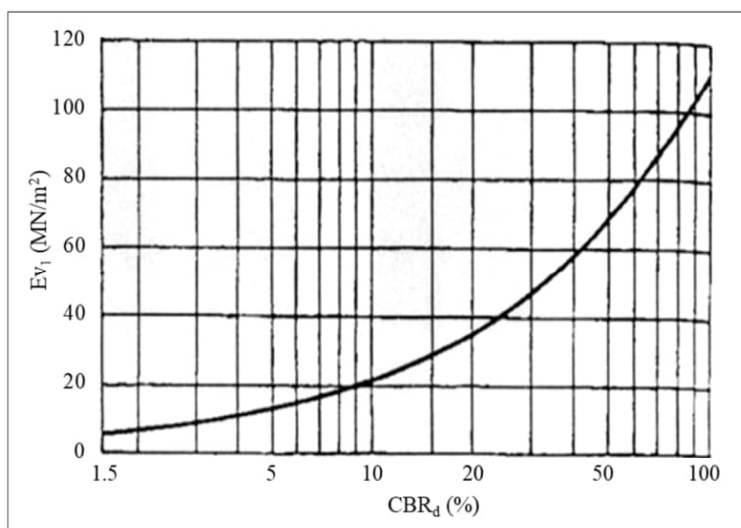
Na Slici 6.11, grafički su prikazani sumirani rezultati krupnozrnih materijala između CBR-a (dinamički i konvencionalni) u odnosu na suhu zapreminsku težinu (γ_d) ispitanih uzoraka.



Slika 6.11. Korelaciona zavisnost između suve zapreminske težine (γ_d) i: a) Konvencionalnog-statičkog CBR-a; b) Dinamičkog CBR_{d1,1}; c) Dinamičkog CBR_{d1,2}; (Henzinger, C. i Vogt, S., 2019)

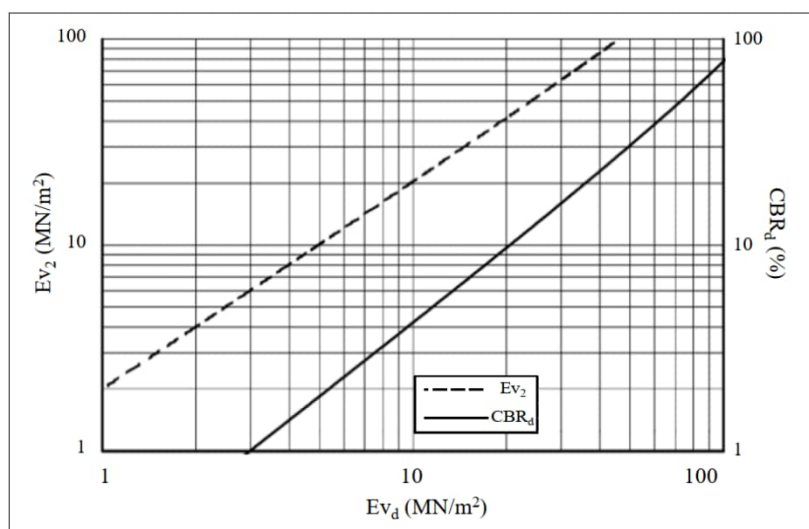
Rezultati konvencionalnih CBR ispitivanja su dati na Slici 16.11a, rezultati dinamičkog CBR ispitivanja su dati na Slici 16.11b za $CBR_{dl,1}$, a na Slici 16.11c za $CBR_{dl,2}$. Podaci pokazuju da su vrednosti CBR_{dl} manje ili više linearno povezane sa suvom zapreminskom težinom, dok vrednosti CBR dobijene iz konvencionalnih CBR-ispitivanja rastu eksponencijalno sa suvom zapreminskom težinom (ovakve trendove za konvencionalne vrednosti CBR takođe su izvestili Vaz i Darke, 1970).

Nažalost CBR_d *in situ* ispitivanje se malo koristi za određivanje nosivosti podloge kolovozne konstrukcije. Shodno tome, malo je objavljenih radova i studija o *in situ* ispitivanju. Korelaciona zavisnost između vrednosti modula deformacije E_{v1} i CBR_d vrednosti prikazana je na Slici 6.12 (Floss, 1997).



Slika 6.12. Korelaciona zavisnost između „in situ“ dinamičkog CBR_d i modula deformacije E_{v1} (Floss, 1997)

Zorn Instruments GmbH & Co. KG ukazuje na korelacije između rezultata dinamičkog CBR_d ispitivanja sa vrednostima dinamičkog modula deformacije - E_{vd} i sa vrednostima modula deformacije E_{v2} za dobro zbijena krupnozrna tla (Slika 6.13). Međutim, nije definisano šta je dobro zbijeno tlo, niti su dati intervali za njegovo identifikovanje. Veruje se da su to isti intervali za E_{vd} i E_{v2} primenjeni u Tabeli 6.8.



Slika 6.13. Korelacione zavisnosti između „in situ“ dinamičkog CBR_d , modula deformacije E_{v2} i dinamičkog modula deformacije E_{vd} , za krupnozrno tlo (Zorn, 2016)

Na osnovu kratkog pregleda literature, došlo se do određenih zaključaka i o njima se govori u nastavku. Međutim, svaka korelacija ima svoje prednosti i nedostatke. Neke korelacije su empirijske, malo modela je analitičke prirode. Na primer, nekoliko empirijskih korelacija je ograničeno na određeni tip materijala, a neke korelacije su specifične za određenu lokaciju. Tlo kao građevinski materijal je veoma podložno promenama u zavisnosti od promene vlažnosti. Varijacije u sadržaju vlage, stepenu zbijenosti treba detaljno ispitati kako bi se izbegli pogrešni rezultati. U idealnom slučaju, za razvoj empirijskih korelacija, sva laboratorijska i terenska ispitivanja treba da se izvode u kontrolisanim uslovima okoline, što nije naglašeno u prethodnim literaturnim podacima. Stoga je, na osnovu pregleda literature, sveobuhvatna metodologija istraživanja strukturisana tako da ostvari definisane ciljeve rešavajući prethodno pomenute probleme za razvoj realističnijih empirijskih korelacionih zavisnosti.

7. RAZVOJ I VERIFIKACIJA KORELACIONIH ZAVISNOSTI

7.1 Opšte o korelacionim zavisnostima

Za definisanje korelacionih zavisnosti između parametara zbijanja i nosivosti donjih slojeva sagrađajnica, važan je broj uzoraka ali i izbor primenjene metode pri laboratorijskom i *in situ* ispitivanju. Sve fizičko-mehaničke karakteristike tla kao građevinskog materijala čine složen sistem i mogu da budu u međusobnim korelacionim odnosima.

Ispitivanje zavisnosti u statističkoj analizi ima dva osnovna pravca:

- oblik zavisnosti koji se dobija regresionom analizom,
- jačinu zavisnosti koju određuje korelaciona analiza.

Kod regresione analize potrebno je unapred odrediti koji parametar će imati ulogu zavisne a koja nezavisne promenljive. Ovo utvrđujemo na osnovu teorijskih ili empirijskih saznanja, ili pretpostavki o prirodi analiziranih parametara. Korelaciona analiza je skup statističkih metoda kojima se istražuje jačina veze između posmatranih parametara. Korelacija predstavlja međusobnu povezanost obeležja posmatranih parametara. Ako nema regresije, nema ni korelacije. Ovde nije bitno koja promenljiva je zavisna a koja nezavisna.

Ciljevi regresione i korelacione analize su utvrđivanja kvantitativnog slaganja varijacija između dve ili više parametara koji se analiziraju. Prilikom istraživanja međusobnih veza između dve promenljive primenjuju se metode proste (linearne i krivolinijske) regresione i korelacione analize, a u slučaju posmatranja više promenljivih metode višestruke (linearne i nelinearne) regresije i korelacije. Važno je napomenuti da pomoću regresije i korelacije nismo u stanju da otkrijemo postojanje uzročno-posledične veze između ispitivanih parametara u smislu da je jedna pojava uzrok, a druga posledica. To možemo utvrditi drugim kvantitativnim metodama ili pomoću kvalitativne analize.

Stepen povezanosti rezultata izražava se *Pearson*-ovim koeficijentom korelacije (r). Kada se korelacija prikazuje grafički (u koordinatnom sistemu) uobičajeno je da se na apscisu nanose vrednosti nezavisne, a na ordinatu zavisno promenljive. Preporučljivo je da se pre određivanja koeficijenta korelacije prvo nacrtaju dobijeni rezultati, pa da se na osnovu rasporeda tačaka odluči kakva zavisnost želi da se uspostavi. Ranije u geotehnici najčešće je korišćena linearna zavisnost, dok u novije vreme sve više su zastupljene i nelinearne – krivolinijske zavisnosti.

Veličina koeficijenta korelacije ukazuje na stepen povezanosti, tj. apsolutno veći broj znači i veću povezanost, a predznak + označava smer povezanosti. Pozitivan predznak znači da je porast nezavisno promenljive (x) povezan sa porastom zavisno promenljive (y), a negativan predznak da je porast promenljive (x) povezan sa padom promenljive (y). Najveća moguća povezanost je kada je $r = +1$ ili $r = -1$ a ukoliko je $r = 0$ onda ne postoji nikakva povezanost dveju promenljivih (*Baecher i Christian, 2003*).

Koeficijent korelacije izračunava se pomoću sledeće jednačine:

$$r = \frac{N \sum xy - \sum x \sum y}{\sqrt{[N \sum x^2 - (\sum x)^2] * [N \sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad (7.1)$$

Gde je (x) nezavisna promenljiva, (y) zavisna promenljiva a (N) broj rezultata.

Da bi smo ustanovili da li je dobijeni koeficijent korelacije reprezentativan vrši se testiranje koeficijenta korelacije koje se zasniva na Studentovom rasporedu za $n-2$ stepena slobode, a dobijena t -vrednost se tumači na isti način kao i kod klasičnog Studentovog t - testa.

$$t_y = \frac{r_{xy}}{S_r} \text{ tj. } t_y = \frac{r_{xy}}{\sqrt{\frac{1-r_{xy}^2}{n-2}}} = r_{xy} \frac{\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_{xy}^2}}, \Rightarrow S_r = \sqrt{\frac{1-r_{xy}^2}{n-2}} \quad (7.2)$$

Gde je (S_r) standardna greška ocene koeficijenta korelacije, (r_{xy}^2) dobijena vrednost koeficijenta determinacije iz uzoraka sa (n) parovima i ($n-2$) broj stepeni slobode.

Na kraju proveravamo da li je apsolutna vrednost statističkog ispitivanja veća ili manja od kritične vrednosti za ($n-2$) stepena slobode sa određenim pragom značajnosti.

Napominjem da se Pearson-ov koeficijent koristi samo u slučaju linearne korelacije. Ako su podaci takvi da među njima postoji neka nelinearna veza, tada je moguće da vrednost Pearson-ovog koeficijenta bude bliska nuli, što nas može navesti na pogrešan zaključak da korelacije (zavisnosti) nema.

Kvadrat Pearson-ovog koeficijenta korelacije naziva se koeficijent determinacije (R^2). Ova veličina je pokazatelj koliko su promene jedne promenljive prouzrokovane promenama druge promenljive, i težnja je da se izražava u procentima. Koeficijent determinacije se može izračunati jednostavnom formulom pomoću ocenjene vrednosti nagiba b :

$$R^2 = b^2 \frac{\sum x_i^2 - nx_{sr}^2}{\sum y_i^2 - ny_{sr}^2} \quad (7.3)$$

Vrednost koeficijenta (R^2) varira i kreće se u intervalu od 0 do 1, tj. $0 \leq R^2 \leq 1$ i predstavlja odnos zbiru kvadrata odstupanja empirijskih podataka i podataka dobijenih regresijom.

Često nije dovoljno samo znati da postoji korelacija između dve promenljive, i kolika je njena vrednost, već je potrebno da iz podataka jedne promenljive zaključimo koji rezultat najverovatnije odgovara drugoj promenljivoj. Ako između posmatranih parametara postoji neka vrsta zavisnosti, postavlja se pitanje kakva je ta povezanost, odnosno može li se, i u kom obliku, uspostaviti veza na matematički način. Tada govorimo o regresiji i određujemo jednačinu pravca regresije.

Suština je u tome da se odredi pravac regresije koji ima najmanju sumu kvadrata odstupanja pojedinačnih rezultata od tog pravca (*Draper i Smith, 1998*). U ovoj analizi se ispituju linearni i nelinearni regresijski modeli. U modelima linearne regresije, pretpostavlja se da je zavisna promenljiva linearna funkcija jedne ili više nezavisnih promenljivih plus greška uvedena da bi se uzeli u obzir svi drugi faktori. Tipičan oblik regresionog linearnog modela je sledeći:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \dots + \beta_k x_{ik} \quad (7.4)$$

Gde je (y_i) zavisna promenljiva, ($x_{i1} + \dots, \beta_k x_{ik}$) su nezavisne promenljive i (β_0) odstupanje ili greška (*Pejdić, 2020*).

7.2 Korelacione zavisnosti parametara zbijanja i nosivosti

U okviru ove disertacije, na primeru parametara zbijanja i nosivosti donjih slojeva saboraćajnica izvršena je korelaciono-regresiona analiza. Kao specifični pokazatelji reprezentativnosti korelacionih zavisnosti korišćeni su koeficijent korelacije (r) i koeficijent determinacije (R^2). Model regresije je reprezentativniji što je koeficijent determinacije bliži jedinici, a njegova značajnost se može proceniti na osnovu Chadockove skale (Tabela 7.1).

Tabela 7.1. Ocena jačine veze između parova vrednosti dve promenjive (Chaddockova skala)

Koeficijent korelacije (r)	Koeficijent determinacije (R^2)	Tumačenje
0,00	0,00	Odsutnost veze
0,00 – 0,50	0,00 – 0,25	Slaba veza
0,50 – 0,80	0,25 – 0,64	Veza srednje jačine
0,80 – 1,00	0,64 – 1,00	Čvrsta veza
1,00	1,00	Potpuna veza

U ovoj disertaciji koeficijent determinacije, R^2 , standardna greška i nivo značajnosti prikazani su za svaki razvijeni model regresije. Koeficijent determinacije (R^2) predstavlja proporciju varijacije u zavisnoj promenljivoj koja se obračunava regresionim modelom i ima vrednosti od 0 do 1. Ako je jednak jedan, cele posmatrane tačke leže na predloženoj najmanjoj kvadratnoj liniji, što znači potpuna veza - korelacija postoji. Nivo značajnosti je rezultat statističkog testa sa nultom hipotezom ($\beta_1=0$), izražava se u procentima. Što je veći nivo značaja, to je veća podrška modelu prema alternativnoj hipotezi ($\beta_1 \neq 0$), što ukazuje da relacija postoji između zavisne i nezavisne promenljive. Standardna greška predstavlja kvadratni koren srednje kvadratne greške (SE). U pogledu kriterijuma za odabir modela, niska veličina varijanse greške ukazuje na viši kvalitet modela.

Drugi kriterijumi koji su korišćeni za donošenje odluke o kvalitetu uklapanja modela su koeficijent značajnosti (F) i *p-vrednosti* koji su označeni kao rezultat analize modela. U statistici, *p-vrednost* (ili verovatnoća značajnosti) se odnosi na verovatnoću da je efekat koji je barem toliko ekstremno kao što je trenutno posmatranje slučajno nastao. *P-vrednosti* manje od 0,05 su univerzalno prihvaćene kao granica prihvatljivosti za različite tipove regresionih modela (Schervish, 1996). U nekim slučajevima, *p-vrednost* manja od 0,01 se takođe koristi kao granica prihvatanja (Schervish, 1996). Međutim, pokazalo je se da je ovaj kriterijum previše ograničen za analizu trenutnog skupa podataka.

Kvalitetno i brzo određivanje svojstava čvrstoće podloge kolovozne konstrukcije zahteva jednostavne procedure i metode ispitivanja kao i pouzdane empirijske korelacije. Ove empirijske korelacije treba razviti identifikacijom odgovarajućih parametara zbijanja i nosivosti donjih slojeva saobraćajnica, koji imaju veliku zavisnost što je bio i primarni cilj ove disertacije. Iz tog razloga a za razvoj empirijskih korelacija korišćen je značajan broj parametara dobijenih tekućim i dodatnim laboratorijskim i *in situ* ispitivanjima na nekim lokacijama u Srbiji, čiji su rezultati analizirani i prikazani u poglavlju 5.

U ovom poglavlju su na osnovu statistički analiziranih i prikazanih parametara zbijanja i nosivosti donjih slojeva saobraćajnica (L1-C, L2-S, L3-S, L4-G i L5-G), razvijene korelacione zavisnosti jednostavnim i višestrukom parametarskom regresionom analizom koristeći MS-Excel.

Korelacione zavisnosti su razvijene na osnovu tri značajna kriterijuma:

- Vrste tla kao građevinskog materijala (sitnozrni, krupnozrni)
- Tipa promenljive (zavisna ili nezavisna)
- Tipa korelacione zavisnosti kao što je jednostavna ili višestruka parametarska regresiona analiza

Na osnovu gore definisanih kriterijuma, razvijene korelacione zavisnosti su opisane u dva podpoglavlja kao što je prikazano u nastavku:

Podpoglavlje 7.2.1, obuhvata korelacione zavisnosti između parametara zbijanja i nosivosti dobijenih tekućim laboratorijskim i *in situ* ispitivanjima. U prvom delu su za korišćeni sitnozrni materijal (glina-prašinasta) date korelacione zavisnosti između konvencionalnih parametara zbijanja i nosivosti dobijenih u laboratorijskim uslovima i terenskim ispitivanjima na izgrađenom završnom sloju nasipa (L1-C). Korelacije parametara zbijanja i nosivosti za korišćene krupnozrne materijale (pesak,

šljunak) date su u drugom delu. Ispitivanja *in situ* su vršena na izgrađenim donjim slojevima saobraćajnica, predhodno definisanih oznaka (L2-S, L3-S, L4-G, L5-G). Tabela je data statistička procena dobijenih koeficijenata korelacija (r).

Podpoglavlje 7.2.2, obuhvata razvoj korelacija između parametara zbijanja i nosivosti dobijenih dodatnim ispitivanja u laboratoriji i „in situ“. Za potrebe formiranja korelacionih zavisnosti između parametara dobijenih u laboratorijskim i terenskim uslovima korišćen je isti krupnozrni materijal (šljunak). U prvom delu dat je razvoj korelacionih zavisnosti za procenu parametara dinamičkog kalifornijskog indeksa nosivosti (CBR_{dl}) korišćenjem parametara zbijanja i nosivosti (γ_d , w , CBR) u laboratorijskim uslovima. Drugi deo uključuje razvoj korelacionih zavisnosti za procenu parametara zbijanja i nosivosti (E_{v1} - E_{v2} i E_{vd}) na osnovu vrednosti dinamičkog kalifornijskog indeksa nosivosti (CBR_{dt}). Ispitivanja „in situ“ paralelno su rađena na pripremljenom posteljičnom sloju lokacije oznake (L4-G).

7.2.1 Korelacione zavisnosti između parametara zbijanja i nosivosti dobijenih laboratorijskim i *in situ* ispitivanjima

7.2.1.1 Sitnozrni materijal - glina prašinata

U ovom podpoglavlju razvijene su korelacione zavisnosti između konvencionalnih parametara zbijanja i nosivosti donjeg sloja saobraćajnice, tj. završnog sloja nasipa izgrađenog od glinovitog materijala sa lokacije L1-C koji sadrži prašinsto-peskovitu komponentu (klasifikovan kao A6, odnosno CL). Parametri korišćeni za korelacione zavisnosti statistički su analizirani i prikazani u poglavlju 5. ove disertacije (Tabela 5.1).

U ovom poglavlju date su korelacione zavisnosti koje opisuju odnos između osnovnih fizičko-mehaničkih svojstava glinovitog materijala (oznake L1-C) i kalifornijskog indeksa nosivosti (CBR) kao i između modula stišljivosti (M_s) i modula deformacije (E_{v1} - E_{v2}), na pomenutom sloju podloge predmetne kolovozne konstrukcije.

Kao što je objašnjeno u uvodnom delu ovog poglavlja, jedan od načina da se identifikuje linearna korelacija između skupa stvarnih vrednosti i skupa odgovarajućih predviđenih vrednosti je izračunavanje i analiza relevantnog koeficijenta korelacije.

U ovoj fazi, izračunati su koeficijenti korelacije između rezultata klasifikacionih laboratorijskih ispitivanja i vrednosti CBR -a. Analiza je rađena na 17 reprezentativnih uzoraka. Tabela 7.2 predstavlja rezultujuće koeficijente korelacije između fizičko-mehaničkih svojstava materijala sadržaja gline (G_L), granice tečenja (W_L), indeksa plastičnosti (I_p), optimalne vlažnosti (w_{opt}), max. zareminske težine (γ_{dmax}), zapreminske težine čvrstih čestica (γ_s) i vrednosti CBR za svaki pojedinačan uzorak.

Tabela 7.2. Ocena Koeficijenta korelacije (r) između CBR -a i odgovarajućih parametara glinovitog materijala (L1-C)

	G_L (%)	W_L (%)	I_p	w_{opt} (%)	γ_{dmax} (kN/m^3)	γ_s (kN/m^3)	CBR (%)
G_L (%)<0.002 mm	1						
W_L (%)	0,79618	1					
I_p	0,75182	0,95902	1				
w_{opt} (%)	0,63309	0,69840	0,66754	1			
γ_{dmax} (kN/m^3)	-0,79787	-0,87911	-0,85829	-0,72355	1		
γ_s (kN/m^3)	-0,70037	-0,77669	-0,74499	-0,76040	0,91572	1	
CBR (%)	-0,87378	-0,81269	-0,80224	-0,72714	0,90286	0,87942	1

U cilju istraživanja dobijenih laboratorijskih parametara, izvršena je regresivna analiza za utvrđivanje korelacionih zavisnosti između skupova podataka.

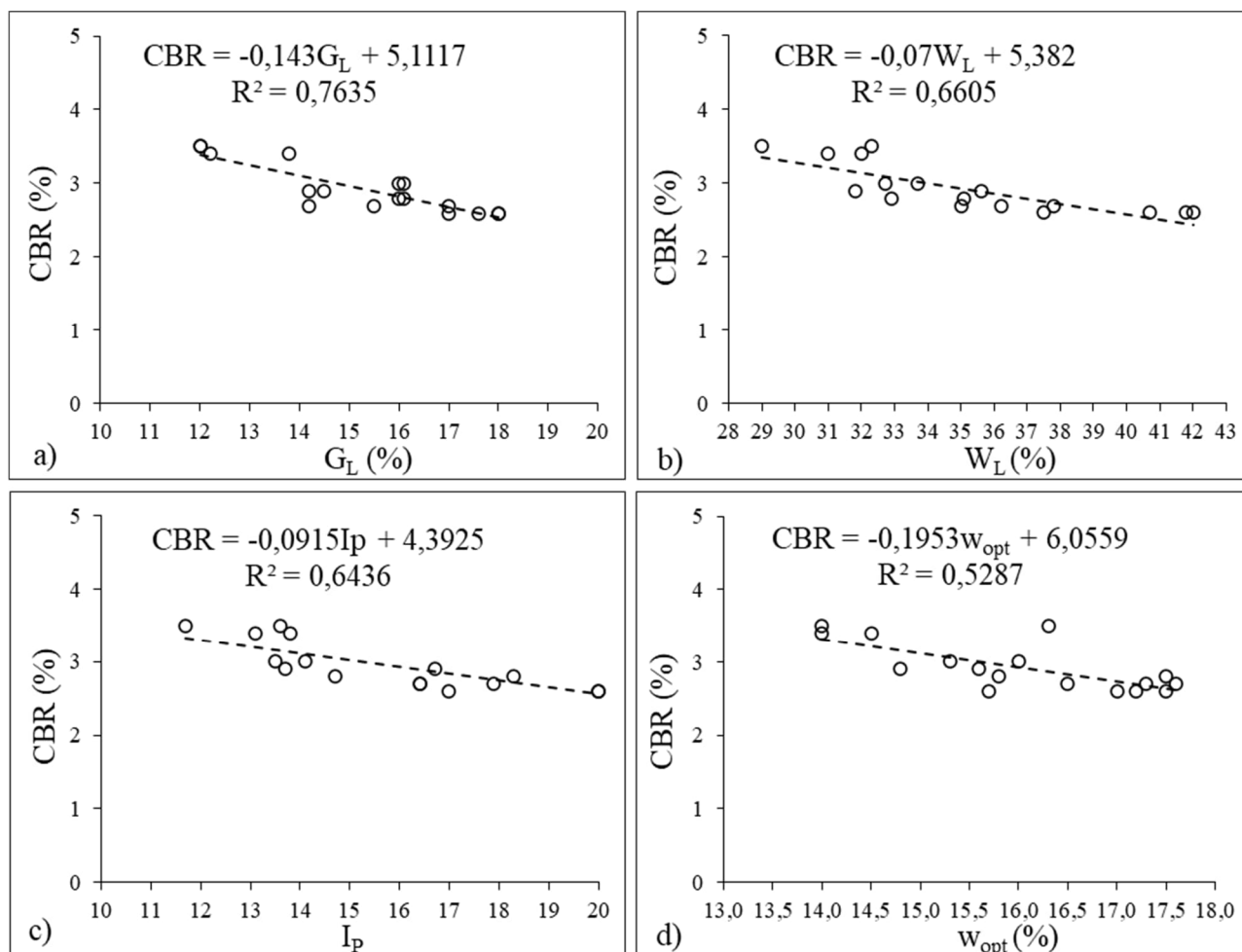
Jednostavne linearne parametarske regresije su grafički jasno prikazane na Slikama 7-1 i 7.2. Na osnovu dijagrama regresije razvijena je korelaciona zavisnost za liniju najboljeg uklapanja za svaki parametar zbijanja i nosivosti gore pomenutog sloja podloge kolovozne konstrukcije. Takođe su za razmatrane odnose parametara prikazane vrednosti koeficijenta determinacije za svaku korelaciju kao i matematičke jednačine dobijenih kriva (Tabela 7.3).

CBR u odnosu (G_L , W_L , I_p i w_{opt})

Odnos između vrednosti CBR i drugih različitih svojstava tla prikazan je na Slikama 7.1 i 7.2. Vrednosti CBR koje su uočene na Slici 7.1 opadaju sa povećanjem vrednosti indentifikaciono-klasifikacionih parametara tla.

Na Slici 7.1a grafički je prikazana korelacija između CBR i procentualnog sadržaja gline (G_L %<0.002 mm), sa linearnom linijom trenda, dobijen je koeficijent determinacije $R^2=0,7635$, što je dobra vrednost za korelaciju. Primećeno je da je G_L obrnuto proporcionalna CBR-u, što ukazuje da tlu sa povećanjem sadržaja glinovitih čestica opada nosivost, tj. smanjuje se vrednost CBR-a.

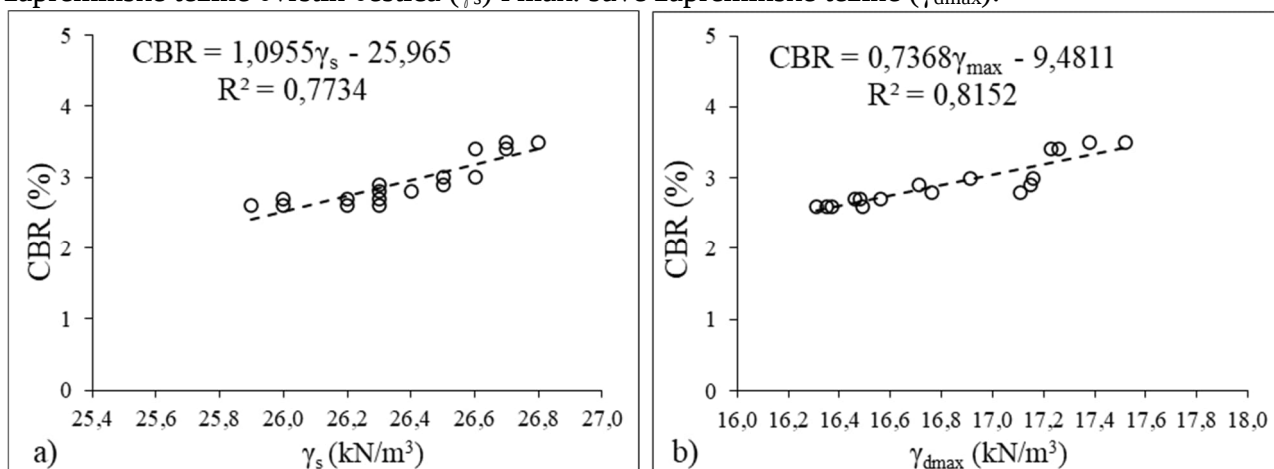
Korelacije između CBR-a u odnosu na granicu tečenja i indeks plastičnosti prikazane su na Slikama 7.1b i 7.1c. Sa dobrim vrednostima koeficijenta determinacije $R^2>0,64$ uočava se da povećanje W_L odnosno I_p smanjuje vrednost CBR-a. Može se zaključiti da tlo što ima veću količinu vode, nosivost se smanjuje i dobijaju se niže vrednosti CBR. Takođe vrednosti CBR-a opadaju sa većim optimalnim sadržajem vode (w_{opt}), Slika 7.1d.



Slika 7.1. Uspostavljene korelacije izmerenih vrednosti CBR-a u odnosu na: a) Sadržaj gline (G_L); b) Granicu tečenja (W_L); c) Indeks plastičnosti (I_p); d) Optimalnu vlažnost (w_{opt})

CBR u odnosu (γ_s i γ_{dmax})

S druge strane, vrednosti CBR-a koje su uočene na Slici 7.2a i 7.2b rastu sa povećanjem vrednosti zapreminske težine čvrstih čestica (γ_s) i mak. suve zapreminske težine (γ_{dmax}).



Slika 7.2. Uspostavljene korelacije izmerenih vrednosti: a) CBR-a u odnosu na zapreminsku težinu čvrstih čestica (γ_s); b) CBR-a u odnosu na max.zapreminsku težinu (γ_{dmax})

U Tabeli 7.3 prikazane su jednačine negativne linearne korelacije osim odnosa između parametara kalifornijskog indeksa nosivosti (CBR-a) i parametara zapreminskih težina (γ_s i γ_{dmax}) koji su prikazani jednačinama pozitivne linearne korelacije.

Tabela 7.3. Korelacione zavisnosti između CBR vrednosti i parametara fizičko-mehaničkih karakteristika materijala (L1-C)

Jednačina	R^2	Br. Jed.
$CBR = 5,1117 - 0,143G_L$	0,7635	7.5
$CBR = 5,382 - 0,07W_L$	0,6605	7.6
$CBR = 4,3925 - 0,0915I_p$	0,6436	7.7
$CBR = 6,0559 - 0,1953 w_{opt}$	0,5287	7.8
$CBR = 1,0955\gamma_s - 25,965$	0,7734	7.9
$CBR = 0,7368\gamma_{dmax} - 9,4811$	0,8152	7.10

Kao što je prikazano na Slikama 7.1 i 7.2 postoji čvrsta linearna veza između fizičko-mehaničkih karakteristika glinovitog materijala oznake L1-C i odgovarajuće CBR vrednosti. Izuzetak pravi parametar optimalne vlažnosti (w_{opt}) koji se nalazi u intervalu veze srednje jačine. Ovaj zaključak je u skladu sa procenom koeficijenta determinacije (R^2) na osnovu Chadockove skale (Tabela 7.1).

U Tabeli 7.4. dat je prikaz podataka ovih regresivnih analiza parametara fizičko-mehaničkih karakteristika nezavisnih promenjivi i CBR-a zavisne promenjive. Procena korelacija je izvršena pomoću koeficijenta značajnosti (F) i P-vrednosti.

Kao što je prikazano u Tabeli 7.4, najjača izmerena veza koja se mogla utvrditi regresionom analizom pojedinačnih vrednosti imala je vrednost $R^2=0.815$. Ovaj rezultat je odgovarao korelacionoj zavisnosti između kalifornijskog indeksa nosivosti (CBR) i maksimalne suve zapreminske težine. Iz tabele vidimo da su dobijene P-vrednosti i vrednosti značaja (F) koeficijenta

korelacije manje od 0.05, pa je Pearsonov koeficijent linearne korelacije statistički značajan, tj. postoji statistička značajna povezanost između parametra CBR-a i fizičko-mehaničkih parametara materijala L1-C (G_L , W_L , I_p , w_{opt} , γ_s i γ_{dmax}).

Tabela 7.4. Regresiona statistička analiza, procena statističkih parametara između CBR vrednosti i parametara fizičko-mehaničkih karakteristika materijala (L1-C)

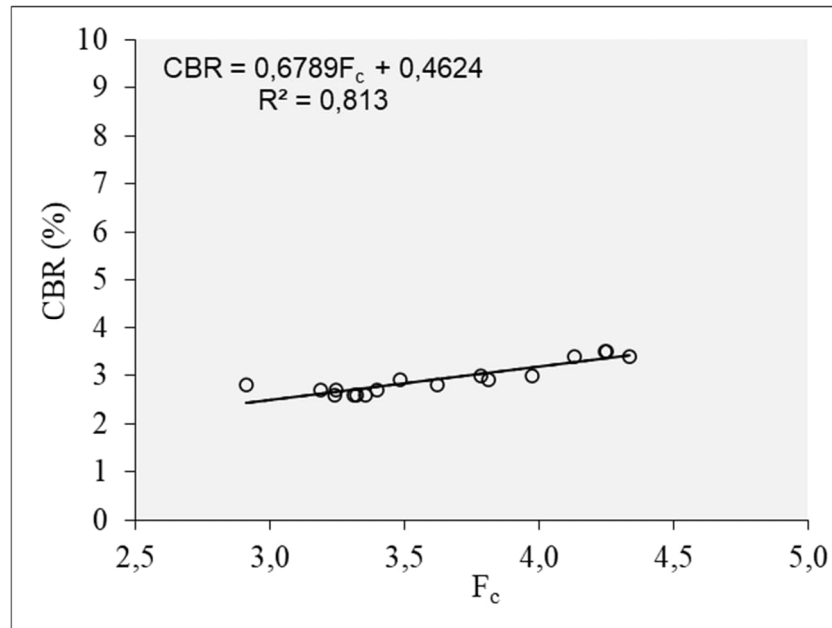
Nivo značajnosti (α)>95% (0,05)	Regresiona statistika – zavisna promenljiva CBR					
Nezavisne promenljive	G_L	W_L	I_p	w_{opt}	γ_s	γ_{dmax}
Koeficijent kor. (r)	0,87378	0,81269	0,80224	0,72713	0,87941	0,90286
Koeficijent deter. (R^2)	0,76349	0,66046	0,64359	0,52873	0,77337	0,81515
Prilagođeni (R^2)	0,74772	0,63782	0,61983	0,80283	0,75827	0,80283
Standardna greška (SE)	0,16518	0,19792	0,20277	0,14603	0,16169	0,14603
Broj parova (n)	17	17	17	17	17	17
P-vrednost	6,959E-11	5,696E-09	1,426E-10	9,905E-07	1,133E-05	1,655E-05
Značaj (F)	4,586E-06	7,345E-06	0,000107	0,000942	3,311E-06	7,020E-07

CBR u odnosu faktor konzistencije tla (F_c)

Faktor konzistencije zbijenog tla uveo je A.E.M. Mohamed (1986), a zatim ga je modifikovao M.M.E. Zumrawi (2000). Fizičko-mehanički parametri materijala L1-C su kombinovani tako da pokazuju uticaj svakog od njih na CBR vrednost. Faktor konzistencije (F_c) je definisan kao kombinacija fizičko-mehaničkih parametara materijala kao što su max. zareminske težina (γ_{dmax}), zareminske težina vode (γ_w), koeficijent poroznosti (e) i indeks konzistencije (I_c) i izražen je na sledeći način:

$$F_c = \frac{\gamma_{dmax} * I_c}{\gamma_w * e} \quad (7.11)$$

Da bi se istražio odnos između razvijenog faktora konzistencije F_c (Jednačina 7.11) i CBR-a, analizirani su rezultati ipitivanja sitnozrnog materijala L1-C (Tabela 5.1). Vrednost CBR-a u odnosu na faktor konzistencije prikazan je na Slici 7.3.



Slika 7.3. Uspostavljena korelacija izmerenih vrednosti CBR-a u odnosu na faktor konsistencije (F_c)

Sa slike se može primetiti da je za sve analizirane podatke utvrđena veoma čvrsta linearna veza ($R^2 > 0,80$). Ovaj rezultat potvrđuje zavisnost vrednosti CBR-a od fizičko-mehaničkih svojstava tla. Korelaciona zavisnost je definisana jednačinom 7.12:

$$\text{CBR} = 0.6789(F_c) + 0.4624 \quad \text{za} \quad 2.91 < F_c < 4.33 \quad (7.12)$$

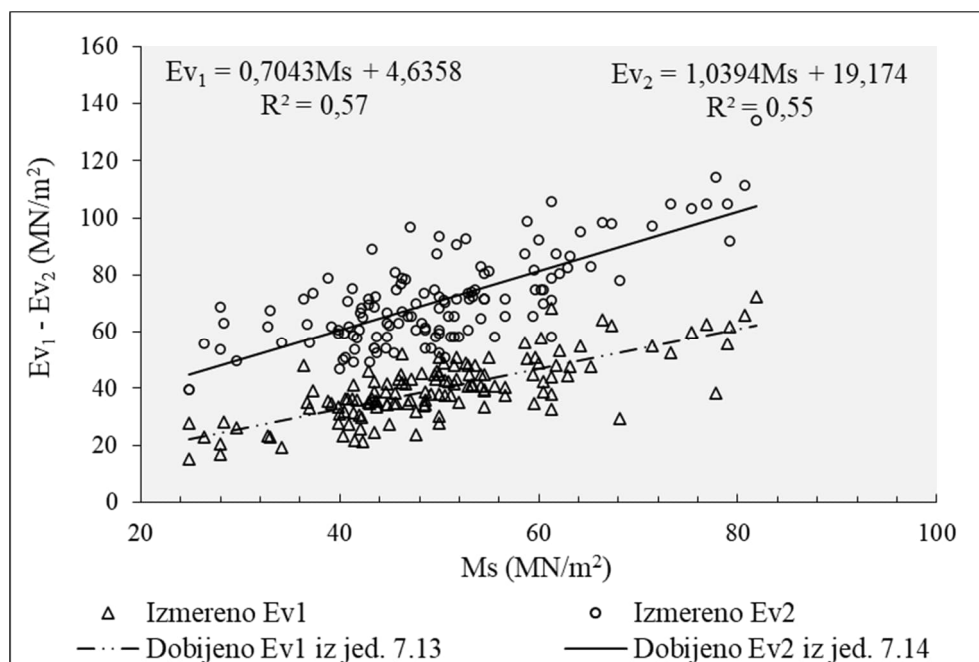
E_{v1} i E_{v2} u odnosu na M_s

Linearne funkcije opisuju odnos između modula stišljivosti (M_s) i modula deformacije E_{v1} - E_{v2} . Ovi parametri uz deformacijski odnos E_{v2}/E_{v1} su prikazani grafički uz pomoć histograma i krive normalne raspodele (Slika 5.3). Na izgrađenom završnom sloju nasipa od glinovitog materijala (L1-C) za potrebe kontrole kvaliteta u periodu od septembra do decembra 2019. godine na dužini oko 7.2 km izvedeno je po 134 opita. Pored određivanja parametara nosivosti (M_s i E_{v1} - E_{v2}) vršena je i provera zbijenosti ugrađenog sloja metodom cilindra poznate zapremine (Tabela 5.1). Srednja vrednost stepena zbijenosti (R_c) pripremljenog sloja iznosila je 100.8 %.

Korelacione zavisnosti između parametara nosivosti prikazane su na Slici 7.4 i definisane su jednačinama 7.13 i 7.14:

$$E_{v1} = 0.7043(M_s) + 4.6358 \quad \text{za} \quad 25 \text{ MN/m}^2 < M_s < 82 \text{ MN/m}^2 \quad (7.13)$$

$$E_{v2} = 1.0394(M_s) + 19.174 \quad \text{za} \quad 25 \text{ MN/m}^2 < M_s < 82 \text{ MN/m}^2 \quad (7.14)$$



Slika 7.4. Korelaciona zavisnost „in situ“ parametara, modula deformacije E_{v1} - E_{v2} i modula stišljivosti M_s na završnom sloju nasipa, lokacija L1-C

U Tabeli 7.5. dat je prikaz podataka regresivne analize parametara modula deformacija nezavisne promenjive M_s i zavisnih promenjivih E_{v1} i E_{v2} .

Tabela 7.5. Regresiona statistička analiza, procena statističkih parametara između statičkih modula M_s i E_{v1} - E_{v2}

Nivo značajnosti (α) >95 % (0,05)	Regresiona statistika – nezavisna promenjiva M_s	
Zavisna promenjiva	E_{v1}	E_{v2}
Koeficijent kor. (r)	0,759875193	0,745173388
Koeficijent deter. (R^2)	0,577410309	0,555283378
Prilagođeni (R^2)	0,574208872	0,551914313
Standardna greška (SE)	7,04246831	10,8715458
Broj parova (n)	134	134
p-vrednost	0,08771 (*)	9,42189E-06
Značaj (F)	1,85521E-26 što je < 0.05	5,48929E-25 što je < 0.05

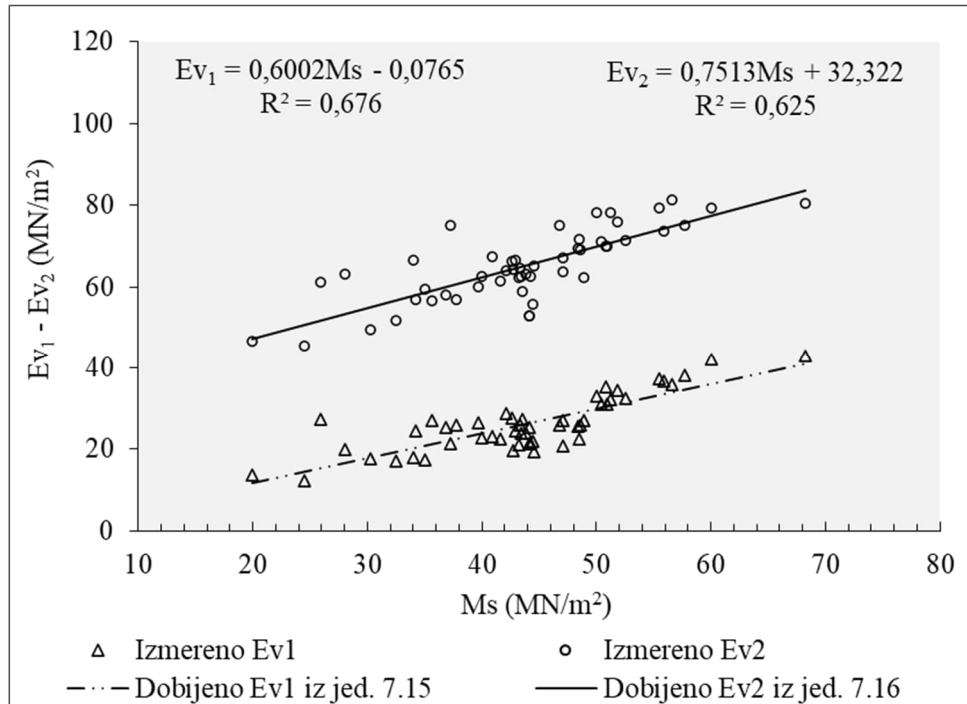
Iz tabele vidimo da je dobijena vrednost značaja (F) koeficijenta korelacije manja od 0.05, pa je Pearsonov koeficijent linearne korelacije statistički značajan, tj. postoji statistička značajna povezanost između parametra M_s i parametara E_{v1} - E_{v2} . U slučaju gde je verovatnoća $p > 0.05$ ne odbacuje se nulta hipoteza, jer je verovatnoća da je uočena veza između parametara M_s i E_{v1} veća od 5% (polje označeno zvezdicom). Praksa je pokazala da statistička značajnost se razlikuje od praktične značajnosti, tj. mala razlika između parametara može biti statistički značajna a da nema praktični značaj.

7.2.1.2 Krupnozrni materijal - pesak

Na osnovu terenskih ispitivanja za potrebe izgradnje slojeva nasipa pristupnih saobraćajnica objekta Robne kuće „Ikea“ u Beogradu na peskovitom materijalu, za konverziju između statičkih modula E_{v1} - E_{v2} i M_s mogu se koristiti sledeće direktne veze (rezultati ispitivanja su prikazani jednačinama 7.15 i 7.16 kao i grafički na Slici 7.5:

$$E_{v1} = 0.6002(M_s) + 0.0765 \quad \text{za} \quad 20 \text{ MN/m}^2 < M_s < 68 \text{ MN/m}^2 \quad (7.15)$$

$$E_{v2} = 0.7513(M_s) + 32.322 \quad \text{za} \quad 20 \text{ MN/m}^2 < M_s < 68 \text{ MN/m}^2 \quad (7.16)$$



Slika 7.5 Korelaciona zavisnost „in situ“ parametara, modula deformacije E_{v1} - E_{v2} i modula stižljivosti M_s na II sloju nasipa, lokacija L2-S

Sa slike 7.5. može se videti da nema velikih rasipanja statičkih parametara nosivosti što ukazuje i približno paralelan raspored krivih. Deformacijski odnos E_{v2}/E_{v1} je oko 3 što može ukazivati na nešto manju vlagu od optimalne tokom vršenja merenja kao i na jednoličnost peskovitog materijala (Slika 5.4c). Sa dobijenim koeficijentima korelacije u intervalu od 0.6-0.7 njihov odnos se može definisati kao čvrsta veza, tj. da postoji međusobna zavisnost.

7.2.1.3 Krupnozrni materijal – šljunak

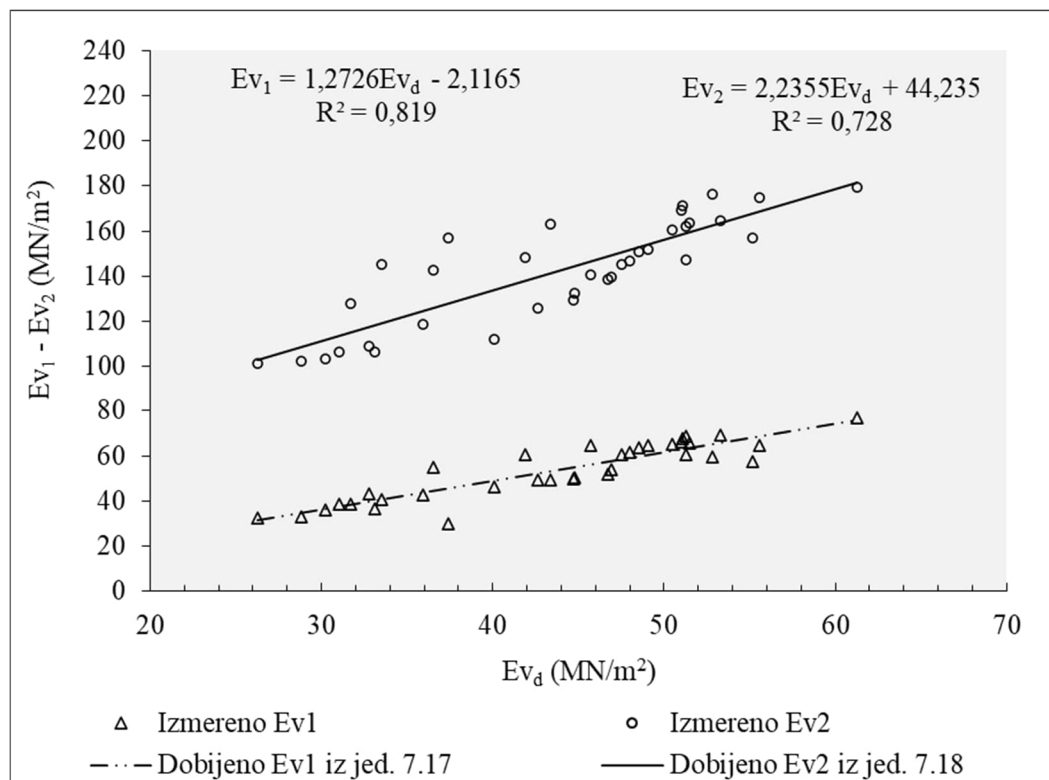
Za potrebe doktorske disertacije na deonici Merošina – Merošina 1 koja je deo autoputa E-80 Niš-Merdare, izvršena su terenska ispitivanja zbijanja i nosivosti donjeg sloja saobraćajnice (završni sloj nasipa). Rezultati ispitivanja su statistički analizirani i prikazani tabelarno (Tabela 5.5) i grafički (Slika 5.7) u poglavlju 5. ove disertacije, nakon čega su korišćeni za upostavljanje korelacionih zavisnosti.

S obzirom na postojanje velikog broja jednačina pogodnih za korelaciju različitih parametara nosivosti, neke od njih su korišćene za proveru moguće korelacije rezultata šljunkovitog materijala u ovoj disertaciji.

Pre svega, u vezi sa dinamičkim modulum E_{vd} (određenim pomoću LFVD) i modulum deformacije E_{v1} - E_{v2} , postoji prihvatljiv faktor determinacije ($R^2 = 0,73-082$). Grafički prikaz korelacionih zavisnosti je predstavljen na Slici 7.6. Linearne zavisnosti jednačina (7.17) i (7.18) opisuju odnos između pomenutih parametara.

$$E_{v1} = 1.2726(E_{vd}) - 2.1165 \quad \text{za} \quad 26 \text{ MN/m}^2 < E_{vd} < 61 \text{ MN/m}^2 \quad (7.17)$$

$$E_{v2} = 2.2355(E_{vd}) + 44.235 \quad \text{za} \quad 26 \text{ MN/m}^2 < E_{vd} < 61 \text{ MN/m}^2 \quad (7.18)$$



Slika 7.6. Korelaciona zavisnost „in situ“ parametara, modula deformacije E_{v1} - E_{v2} i dinamičkog modula deformacije E_{vd} na završnom sloju nasipa, lokacija L5-G

7.2.2 Korelacione zavisnosti između parametara zbijanja i nosivosti dobijenih dodatnim laboratorijskim i *in situ* ispitivanjima

Da bi se uspostavile nove i potvrdile postojeće korelacije između parametara zbijanja i nosivosti, u okviru ove disertacije analizirani su rezultati dodatnih laboratorijskih i terenskih ispitivanja prirodnog materijala – šljunka, ugrađenog u donji sloj saobraćajnice – posteljica na lokaciji gradilišta Petlja Batajnica (Autoput E75), oznake L4-G, u Beogradu.

Opisna statistika rezultata dobijena pomoću laboratorijskih i „in situ“ metoda prikazana je tabelarno i grafički u poglavlju 5.

Rezultati su iskorišćeni radi definisanja vrednosti i načina upotrebe dinamičkog kalifornijskog indeksa nosivosti (CBR_d) u laboratorijskim i terenskim uslovima. U vezi sa tim u nastavku su prikazane različite korelacione zavisnosti sa parametrima standardnih ispitivanja zbijanja i nosivosti.

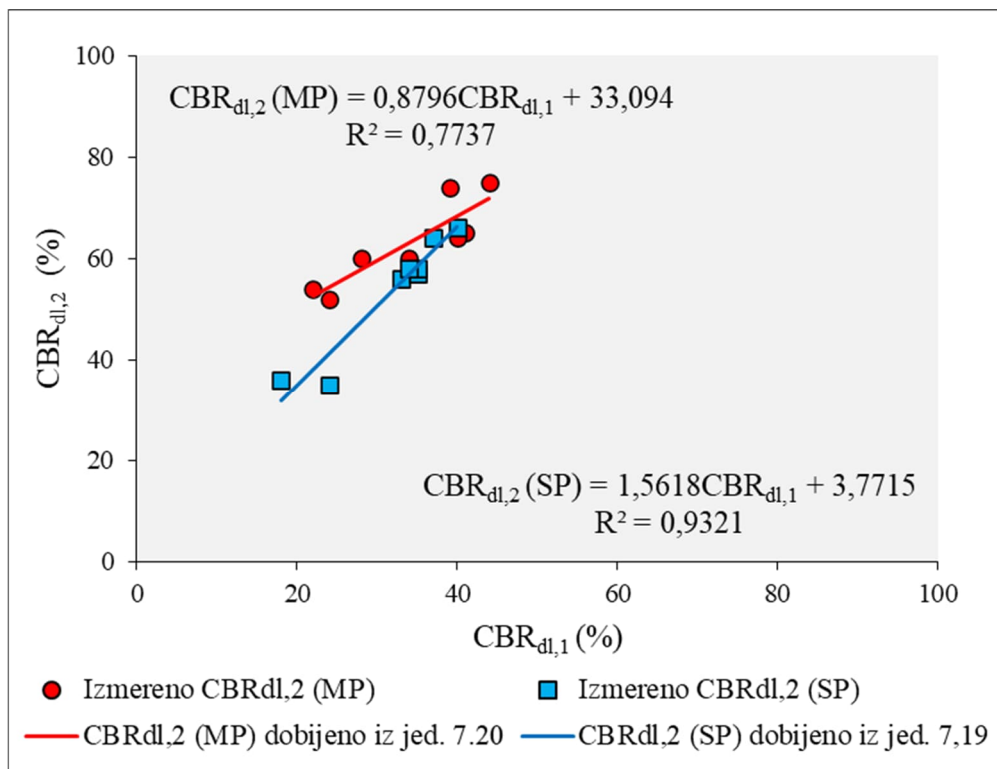
7.2.2.1 Procena parametra dinamičkog CBR_{dl} korišćenjem parametara (w , γ_d i CBR) u laboratorijskim uslovima

Za svaki uzorak šljunkovitog materijala zabeležena su pomeranja nastala od šest pojedinačnih udaraca padajućeg tega (dinamička CBR_{dl} -ispitivanja). Podaci na Slici 4.19 pokazuju da drugi udarac daje veće vrednosti CBR_d od prvog udarca u zavisnosti od vlažnosti pri modifikovanoj energiji zbijanja.

Na Slici 7.7 prikazana je korelaciona zavisnost između vrednosti $CBR_{dl,2}$ (drugi udarac) i vredosti $CBR_{dl,1}$ (prvi udarac – predopterećenje) dobijenih na uzorcima sa različitim vlažnostima pri standardnoj (SP) i modifikovanoj (MP) energiji zbijanja. Sa slike se može zapaziti da je obično vrednost nakon drugog udarca padajućeg tega CBR_d uređaja viša za oko 20 %. Linearna zavisnost jednačina 7.19 i 7.20 opisuje odnos između $CBR_{dl,1}$ i $CBR_{dl,2}$:

$$CBR_{dl,2}(SP) = 1.5618 CBR_{dl,1} + 3.7715 \quad R^2 = 0,9321 \quad (7.19)$$

$$CBR_{dl,2}(MP) = 0.8796 CBR_{dl,1} + 33.094 \quad R^2 = 0,7737 \quad (7.20)$$



Slika 7.7. Korelaciona zavisnost između vrednosti CBR_{dl} dobijenih iz prvog i drugog udarca padajućeg tega CBR_d uređaja

U cilju istraživanja prirode odnosa između parametara dinamičkog kalifornijskog indeksa nosivosti (CBR_{dl}) i parametara zbijanja i nosivosti (w , γ_d , CBR) u laboratorijskim uslovima, izvršena je serija regresionih analiza da bi se odredile korelacione zavisnosti između skupova podataka. Za dobijanje linija trenda prikazanih na Slikama 7.8, 7.9 i 7.10 izvršena je regresiona analiza korišćenjem linearne i polinomske regresije trećeg stepena.

CBR_{dl} u odnosu na vlažnost (w)

Vlažnost se široko pominje kao jedan od najznačajnijih faktora koji mogu uticati na mehanička svojstva zbijenog tla (Adam, 1997; White i dr., 2007). Slika 7.8 prikazuje rezultate dinamičkih CBR_{dl} ispitivanja, u zavisnosti od vlažnosti pri različitim energijama zbijanja.

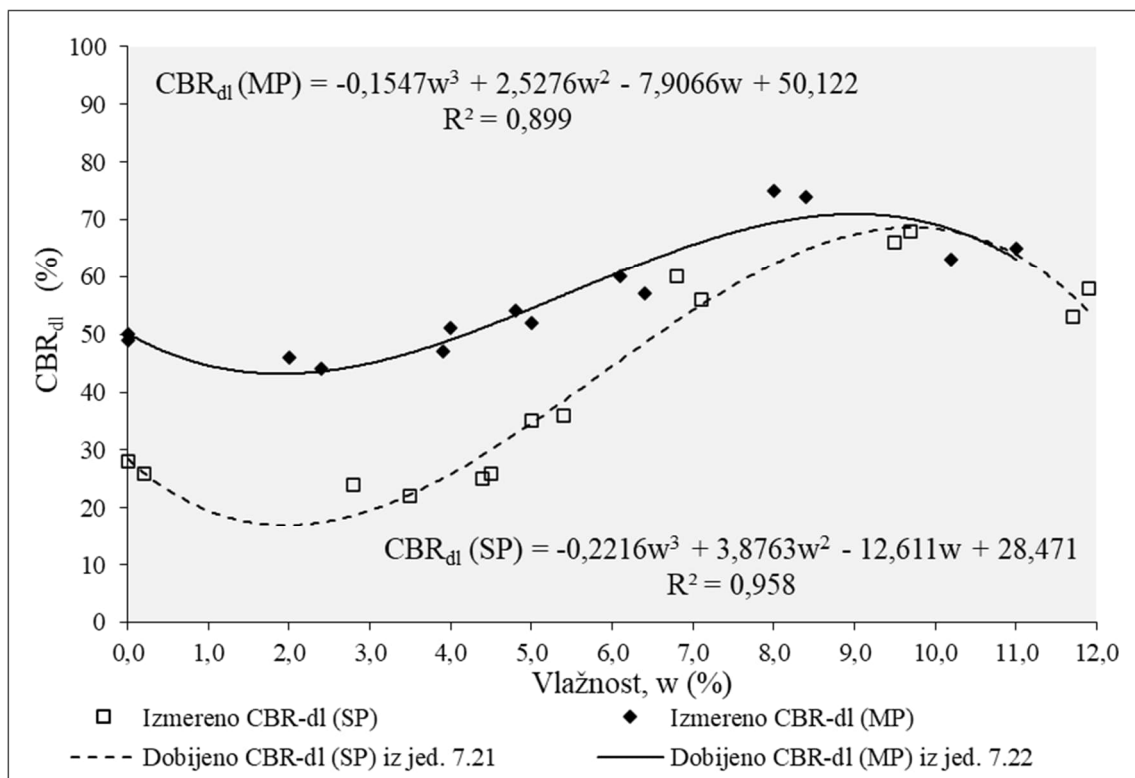
Što se tiče uticaja vlažnosti prilikom pripreme uzoraka za CBR_{dl} ispitivanja šljunkovitog materijala, može se zapaziti da CBR_{dl} dostiže najveću vrednost u slučaju uzoraka zbijenih pri vlažnosti blizu optimalne (w_{opt} - grafički prikazana na Slici 5.12). Početni deo krive ukazuje na blago opadanje CBR_{dl} , a zatim se ponovo povećava sa povećanjem vlažnosti od 2,0% na oko 9,5% (SP) odnosno 8,3% (MP). Povećanje vlažnosti iznad w_{opt} rezultiralo je trendom smanjenja izmerenih vrednosti CBR_{dl} .

Predviđanje uticaja vlažnosti za definisanje CBR_{dl} uspešno je izvedeno primenom polinomskih zavisnosti prikazanih jednačinama (7.21) i (7.22):

$$CBR_{dl} (SP) = -0,2216w^3 + 3,8763w^2 - 12,611w + 28,471 \quad R^2 = 0,958 \quad (7.21)$$

$$CBR_{dl} (MP) = -0,1547w^3 + 2,5276w^2 - 7,9066w + 50,122 \quad R^2 = 0,899 \quad (7.22)$$

gde je (w) vlažnost za oblikovanje uzorka izražena u %.



Slika 7.8. Dinamički kalifornijski indeks nosivosti CBR_{dl} u odnosu na vlažnost u kalupu uzorka (w)

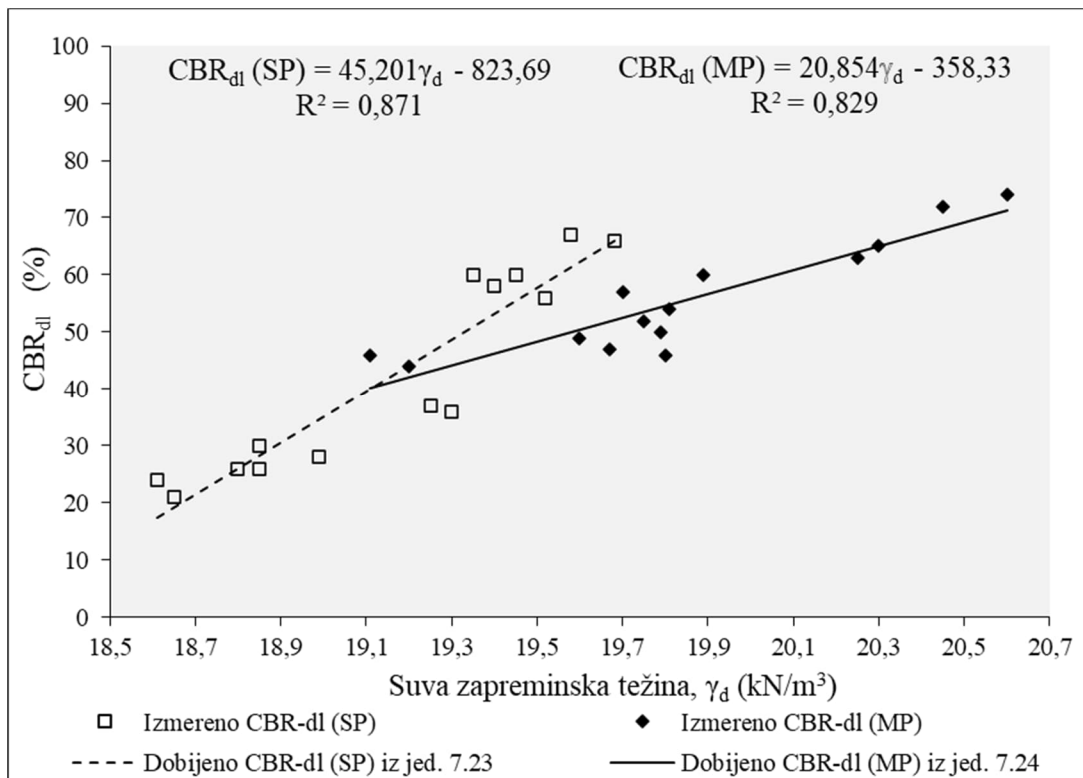
Slika 7.8 ilustruje rezultate regresione analize sa koeficijentom determinacije $R^2 = 0.899$ (MP) i 0.958 (SP), opseg validnosti odnosa se odnosi na sadržaj vlažnosti do 12 %. Ovaj trend krive je u skladu sa karakteristikama standardne Proktorove krive zbijanja, gde je prikazano da vrednosti suve zapremine težine (γ_d) imaju maksimalnu vrednost pri optimalnom sadržaju vode za primenjenu energiju zbijanja. Takođe treba naglasiti da se sa dostizanjem vlažnosti koja je veća od 10% (vlažnost iznad optimalne - w_{opt}), način izvođenja opita što se tiče primenjene energije zbijanja, nema veliki značaj, jer se ove dve krive skoro pa poklapaju.

CBR_{dl} u odnosu na suhu zapreminsku težinu (γ_d)

Korelaciona zavisnost između vrednosti CBR_{dl} i suve zapreminske težine šljunkovitog materijala prikazana je na Slici 7.9. Sa slike se vidi da se CBR_{dl} povećava linearno sa povećanjem suve zapreminske težine ispitivanih uzoraka. Linearne zavisnosti jednačina (7.23) i (7.24) sa koeficijentom determinacije $R^2 = 0.871$ (SP) i 0.828 (MP) i stepenom značajnosti $> 95\%$, opisuju odnos između (CBR_{dl}) i (γ_d). Zapreminska težina je izražena u kN/m^3 .

$$\text{CBR}_{dl}(\text{SP}) = 45.201 \gamma_d + 823.69 \quad \text{za} \quad 18.61 \text{ kN/m}^3 < \gamma_d < 19.68 \text{ kN/m}^3 \quad (7.23)$$

$$\text{CBR}_{dl}(\text{MP}) = 20.854 \gamma_d + 358.33 \quad \text{za} \quad 19.11 \text{ kN/m}^3 < \gamma_d < 20.60 \text{ kN/m}^3 \quad (7.24)$$



Slika 7.9. Korelaciona zavisnost laboratorijskih parametara, dinamičkog kalifornijskog indeksa nosivosti (CBR_{dl}) i suve zapreminske težine (γ_d)

Koeficijent determinacije (R^2) se obično izražava u procentima i daje sliku o tome koliko je jedna promenljiva povezana sa drugom promenljivom (Higgins J, 2005). Odnos promenljivih varira i ogleda se na osnovu vrednosti koeficijenta korelacije. Prema Anderson i Sclove (1978), visok stepen povezanosti jednačina (7.21), (7.22), (7.23) i (7.24) ukazuju na dobru korelacionu zavisnost vrednosti laboratorijskog dinamičkog CBR_{dl} i parametara zbijanja - vlažnosti i suve zapreminske težine.

CBR_{dl} u odnosu na CBR

Laboratorijska CBR ispitivanja, dinamičkom i statičkom – klasičnom metodom, sprovedena su kako bi se utvrdila veza između odnosa nosivosti i zbijenosti nevezanog prirodnog šljunkovitog materijala (Slika 7.10). Paralelno sa izradom uzoraka za ispitivanje dinamičkog laboratorijskog CBR_{dl} vršena je izrada uzoraka za ispitivanje statičkog CBR-a. Za obe metode ispitivanja priprema reprezentativnih uzoraka je vršena pri istim standardnim (SP) i modifikovanim (MP) energijama zbijanja po Proktoru, i sa istim sadržajem vode.

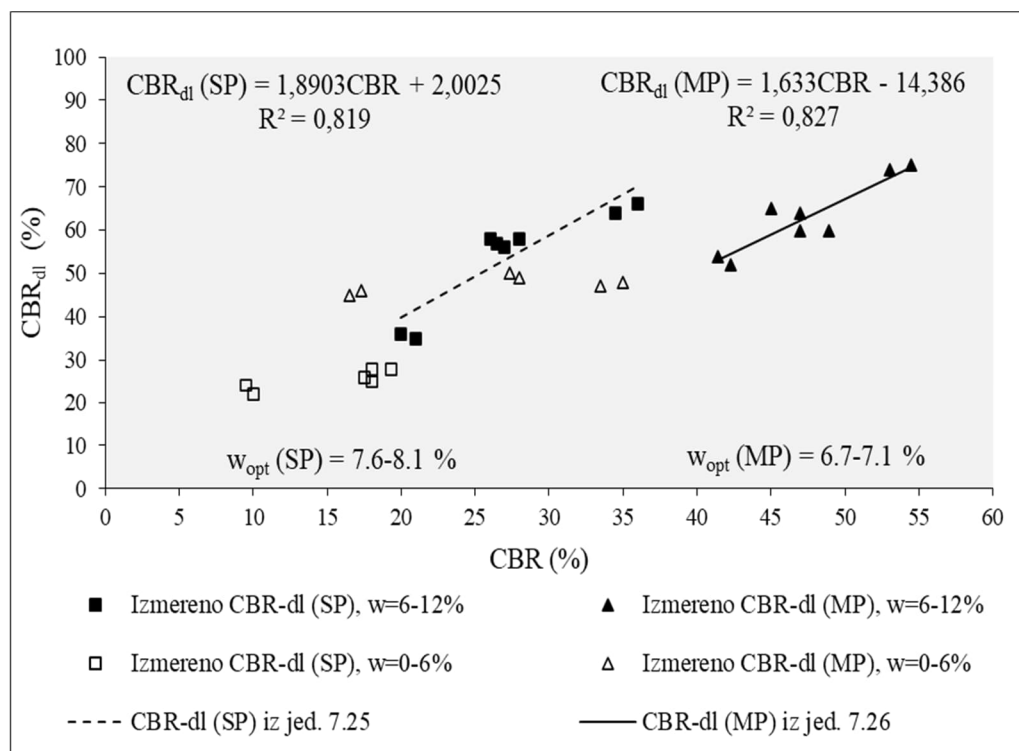
Slika 7.10 prikazuje zavisnost statičkog i dinamičkog CBR-a za opseg vlažnosti do 12 %, uz napomenu da su tačke sa vlažnostima ispod 6 % drugačije označene. Kada se ove tačke isključe, dobija se dobra korelaciona zavisnost između parametara CBR_{dl} i CBR-a sa vlagama uzoraka blizu optimalnih, $w_{opt} \pm 2,5\%$.

Linearne funkcije, jednačine (7.25) i (7.26), opisuju korelacionu zavisnost između CBR_{dl} i CBR:

$$CBR_{dl} (SP) = 1.8903 CBR + 2.0025 \quad \text{za} \quad 20.0 \% < CBR < 36.0 \% \quad (7.25)$$

$$CBR_{dl} (MP) = 1.633 CBR + 14,386 \quad \text{za} \quad 41.4 \% < CBR < 54.0 \% \quad (7.26)$$

gde je CBR kalifornijski indeks nosivosti izražen u %, sa $R^2 = 0.820$ (SP) i 0.828 (MP), stepenom značajnosti $> 95\%$.



Slika 7.10. Korelaciona zavisnost laboratorijskih parametara, dinamičkog (CBR_{dl}) i statičkog (CBR) za opseg vlažnosti od 6 % do 12%

Koeficijent determinacije $R^2=0.82$ ukazuje da se 82% promena u visini vrednosti dinamičkog CBR_{dl} objašnjava vrednošću statičkog CBR. A 18% promene vrednosti CBR_{dl} je uzrokovano drugim faktorima kao što su priprema uzoraka, manje nepravilnosti tokom zbijanja, lokalne razlike u vlažnosti materijala ili zbog mogućih grešaka tokom merenja (Wyroslak M, 2016).

7.2.2.2 Procena parametara zbijanja i nosivosti (E_{v1} - E_{v2} , E_{vd}) korišćenjem parametara CBR_{dl} na posteljičnom sloju

Kao što je već navedeno, pored prikazanih laboratorijskih korelacionih zavisnosti, u disertaciji su uspostavljene i korelacije parametara korišćenjem terenskog dinamičkog kalifonijskog indeksa nosivosti (CBR_{dt}) sa parametrima modula deformacije (E_{v1} - E_{v2}) i dinamičkog modula deformacije (E_{vd}). Takođe je prikazana i korelaciona zavisnost između pomenutih modula deformacija.

U okviru ovog dela cilj regresione analize je bio da se odrede parametri u modelima greške najmanjeg kvadrata, koji se koriste za predviđanje konvencionalnih parametara zbijanja i nosivosti donjih slojeva

saobraćajnica (E_{v1} - E_{v2} i E_{vd}) iz CBR_{dt} vrednosti, sa njihovim odgovarajućim koeficijentima determinacije R^2 i standardnim greškama.

Treba napomenuti da su parametri (E_{v1} - E_{v2} i E_{vd}) dobijeni iz referentnih metoda ispitivanja korišćeni kao zavisna varijabla u dobijenom regresionom modelu, dok je parametar (CBR_{dt}) dobijen ispitivanjem dinamičkog CBR_d uređaja korišćen kao nezavisna varijabla.

Pirsonovi koeficijenti (r) parametara nosivosti dobijenih dodatnim ispitivanjima na posteljičnom sloju (L4-G) prikazani su u Tabeli 7.6.

Tabela 7.6. Ocena Koeficijenta korelacije (r) između „in situ“ parametara nosivosti šljunkovitog materijala (L4-G)

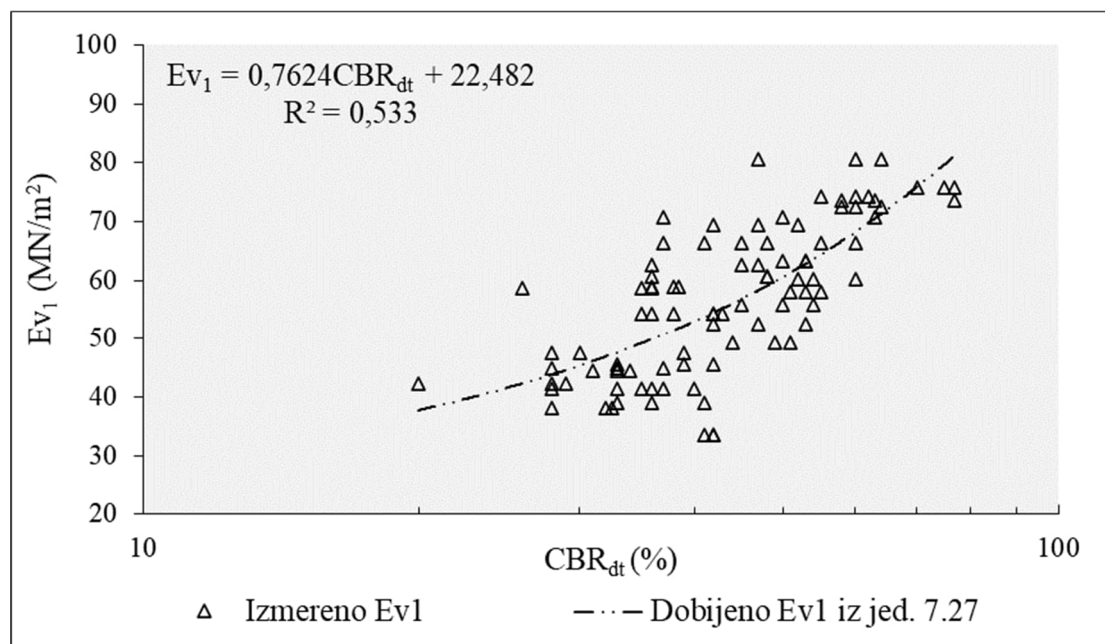
	E_{v1} (MN/m ²)	E_{v2} (%)	E_{vd}	CBR_{dt} (%)
E_{v1} (MN/m ²)	1			
E_{v2} (MN/m ²)	0,8239	1		
E_{vd} (MN/m ²)	0,7740	0,7308	1	
CBR_{dt} (%)	0,7305	0,7537	0,7577	1

E_{v1} u odnosu na CBR_{dt}

Linearna funkcija opisuje odnos između modula deformacije E_{v1} (prvi stupanj opterećenja) i dinamičkog kalifornijskog indeksa nosivosti (CBR_{dt}). Korelaciona zavisnost je prikazana na Slici 7.11 i definisana je jednačinom 7.27:

$$Ev_1 = 0.7624(CBR_{TD}) + 22.482 \quad (7.27)$$

Koeficijent determinacije $R^2=0.533$, nivo značajnosti >95%, i standardna greška = 8,67. Slika 7.11 ilustruje rezultate regresione analize. Opseg validnosti odnosa se odnosi na $CBR_{dt} = 20$ do 70 %.



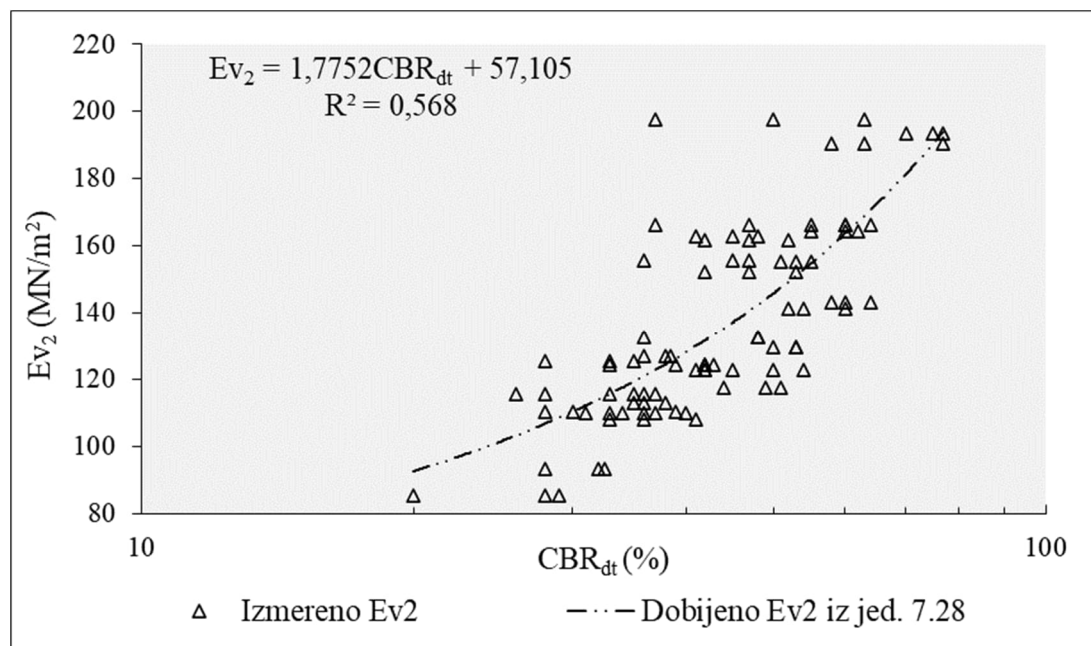
Slika 7.11. Korelaciona zavisnost „in situ“ parametara, modula deformacije E_{v1} i dinamičkog CBR_{dt} na posteljičnom sloju, lokacija L4-G

E_{v2} u odnosu na CBR_{dt}

Rezultati regresione analize koja je sprovedena da bi se utvrdila najbolja korelacija između modula deformacije E_{v2} (drugi stupanj opterećenja) i dinamičkog kalifornijskog indeksa nosivosti (CBR_{dt}) dala je regresioni model predstavljen u jednačini 7.28.

$$E_{v2} = 17752CBR_{dt} + 57.105 \quad \text{za} \quad 20\% < CBR_{dt} < 77\% \quad (7.28)$$

Slika 7.12 ilustruje rezultate regresione analize, sa $R^2=0.568$, uz nivo značajnosti $> 95\%$, i standardnom greškom = 18,82.



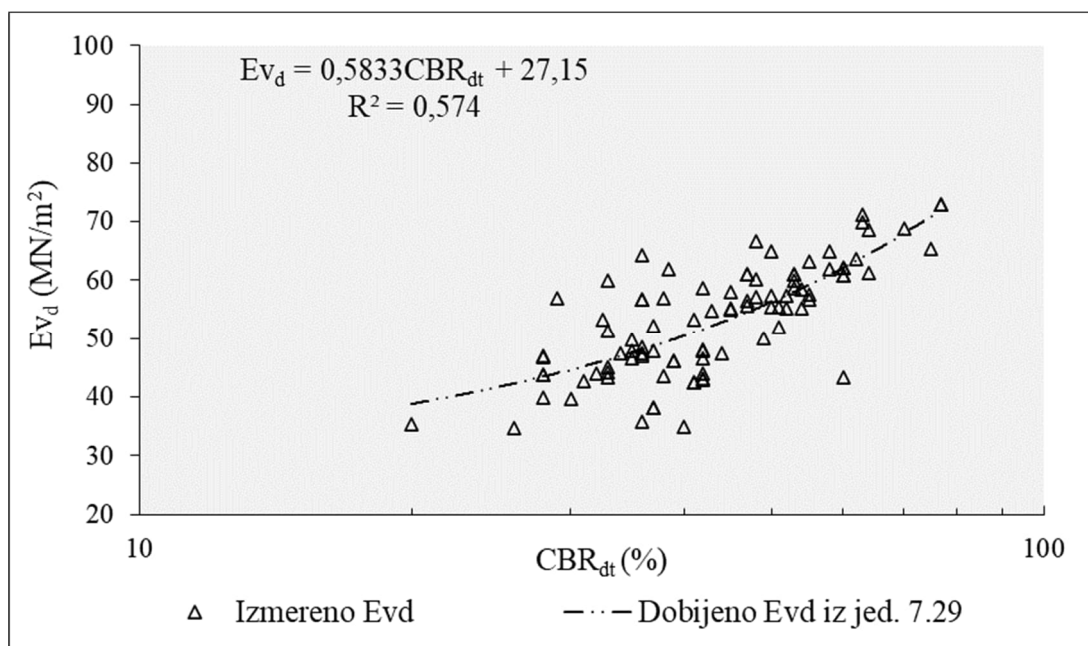
Slika 7.12. Korelaciona zavisnost „in situ“ parametara, modula deformacije E_{v2} i dinamičkog CBR_{dt} na posteljičnom sloju, lokacija L4-G

 E_{vd} u odnosu na CBR_{dt}

Takođe je razvijena korelacija između parametara dinamičkog modula deformacije (E_{vd}) i dinamičkog CBR_{dt} koji su prikazani grafički uz pomoć histograma i krive normalne raspodele, Slika 5.5. Na izgrađenom posteljičnom sloju od šljunkovog materijala (L4-G) za potrebe korelacione zavisnosti izvršeno je tri opita po mernom mestu (31 merno mesto; 93 opita). Na osnovu rezultata regresione analize određen je model prikazan u jednačini 7.29.

$$E_{vd} = 0.5833CBR_{dt} + 27.15 \quad \text{za} \quad 20\% < CBR_{dt} < 77\% \quad (7.29)$$

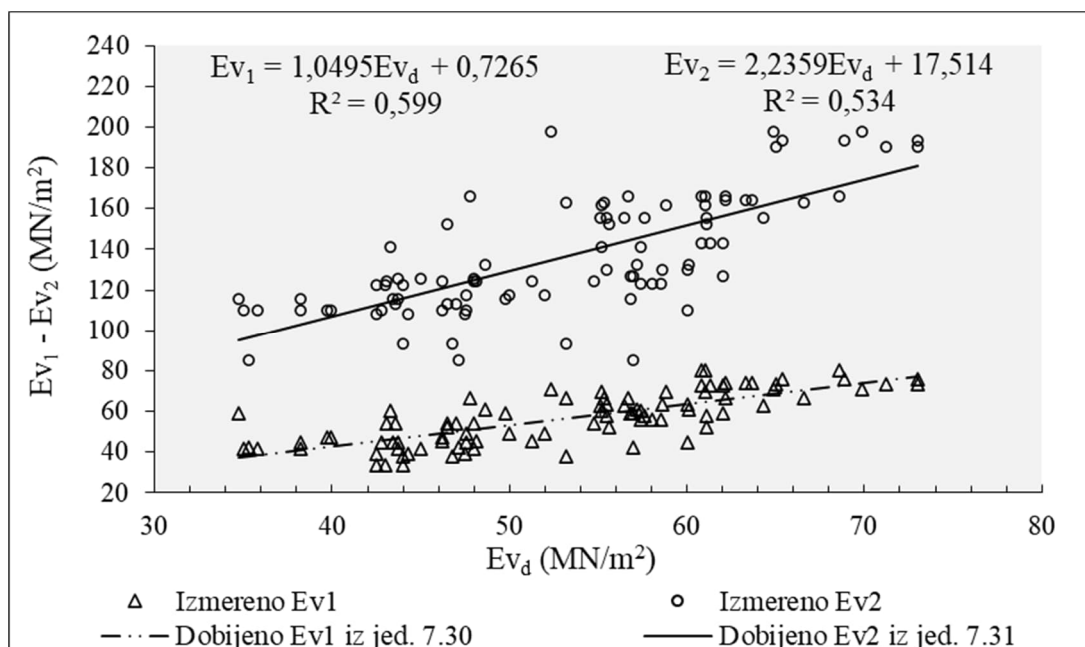
Kako se može videti, uz koeficijent korelacije $R^2=0,574$, nivo značajnosti $>95\%$, i standardnom greškom = 6.11. Rezultati korelacije $E_{vd} - CBR_{dt}$ su prikazani na Slici 7.13.



Slika 7.13. Korelaciona zavisnost „in situ“ parametara, dinamičkog modula deformacije E_{vd} i dinamičkog CBR_{dt} na posteljičnom sloju, lokacija L4-G

E_{v1} i E_{v2} u odnosu na E_{vd}

Uporednim merenjima dinamičkog modula deformacije (E_{vd}) i modula deformacija E_{v1} - E_{v2} na zbijenom sloju posteljice od šljunka utvrđenih geotehničkih karakteristika prema rasporedu ispitivanja (Slika 4.15) dobijeni su rezultati prikazani na Slici 7.14. Izvedene su korelacione zavisnosti na osnovu izmerenih vrednosti dinamičkog modula deformacije E_{vd} u rasponu od 34.7-73.0 MN/m².



Slika 7.14. Korelaciona zavisnost „in situ“ parametara, modula deformacije E_{v1} - E_{v2} i dinamičkog modula deformacije E_{vd} na posteljičnom sloju, lokacija L4-G

Vrednosti modula deformacije E_{vd} i E_{v1} su dobijani bez većih odstupanja u granicama ~35-75 MN/m². Sa Slike 7.14 može se zapaziti da su vrednosti modula deformacije E_{v2} u širokom opsegu

$\sim 90\text{--}200 \text{ MN/m}^2$, što ukazuje na raznolikost lokalnih mesta nosivih karakteristika i vlažnosti materijala.

Linearne zavisnosti opisuju odnos između dinamičkog modula deformacije E_{vd} i modula deformacije E_{v1} - E_{v2} . Korelacione zavisnosti su definisane jednačinama 7.30 i 7.31:

$$E_{v1} = 1.0495E_{vd} + 0.7265 \quad \text{za} \quad 35 \text{ MN/m}^2 < E_{vd} < 73 \text{ MN/m}^2 \quad (7.30)$$

$$E_{v2} = 2.2359E_{vd} + 17.514 \quad \text{za} \quad 35 \text{ MN/m}^2 < E_{vd} < 73 \text{ MN/m}^2 \quad (7.31)$$

U Tabeli 7.7. dat je prikaz podataka regresivne analize parametara modula deformacija nezavisne promenjive E_{vd} i zavisnih promenljivih E_{v1} i E_{v2} .

Tabela 7.7. Regresiona statistička analiza, procena koeficijenata korelacije (r) između modula deformacije E_{vd} i E_{v1} - E_{v2}

Nivo značajnosti > 95 %	Regresiona statistika – nezavisna promenjiva E_{vd}	
Zavisna promenjiva	E_{v1}	E_{v2}
Koeficijent kor. (r)	0.7740	0.7308
Koeficijent deter. (R^2)	0.5991	0.5340
Prilagođeni (R^2)	0.5947	0.5289
Standardna greška (SE)	8.03	19.55
Broj parova (n)	93	93
Značaj (F)	9,2381E-20 što je < 0.05	9,1634E-17 što je < 0.05

Iz tabele vidimo da je dobijena vrednost značaja (F) koeficijenta korelacije manja od 0.05, pa je Pearsonov koeficijent linearne korelacije statistički značajan, tj. postoji statistička značajna povezanost između parametra E_{vd} i parametara E_{v1} - E_{v2} .

7.3 Verifikacija dobijenih korelacionih zavisnosti

Kada su u pitanju donji slojevi saobraćajnica, podrazumeva se da svaka korelaciona zavisnost između parametara zbijanja i nosivosti, pre svega uzme u obzir fizičko-mehaničke karakteristike tla kao građevinskog materijala, način pripreme i ugradnje kao i debljinu i nivo sloja podloge kolovozne konstrukcije.

Ranije je naglašeno da na fizičko-mehaničke karakteristike materijala utiče veći broj faktora, kao što su: način uzorkovanja, priprema uzoraka, fizičko stanje (vlažnost, zbijenost, granulacija), postupak ispitivanja i sl. Ako se u obzir uzme i činjenica da se, u literaturi – u nekim radovima, ne daju potpuni podaci o korelacionim zavisnostima pre svega stepenu zbijenosti i drugim značajnim pokazateljima, onda se može reći da je poređenje dobijenih korelacionih zavisnosti, znatno otežano. Pregledom literaturnih podataka, može se videti da se za definisanje parametara zbijanja i nosivosti donjih slojeva saobraćajnica koriste različiti postupci pripreme uzoraka, različite metode ispitivanja, primenjuju se različiti kriterijumi, a često se pri tumačenju dobijenih rezultata uvode i određene pretpostavke.

U ovoj disertaciji je, provera korelacionih zavisnosti dobijenih između vrednosti parametara zbijanja i nosivosti obavljena na osnovu poređenja sa korelacijama koje su drugi istraživači prikazali u literaturi (Poglavlje 6.).

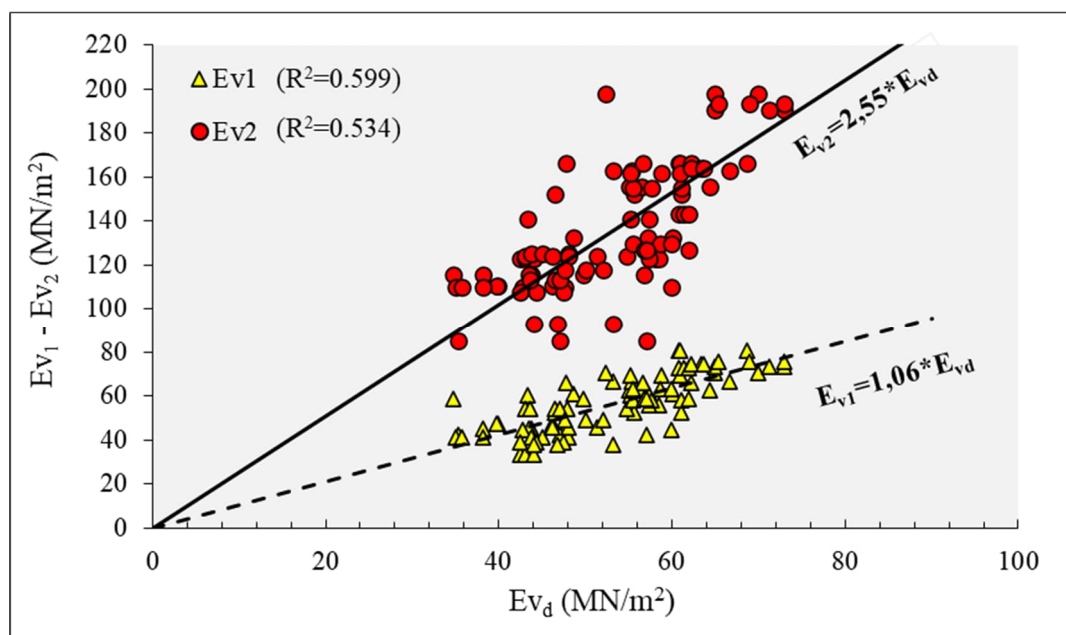
S obzirom da su u radu prikazane vrednosti parametara zbijanja i nosivosti donjih slojeva saobraćajnica, dobijene iz laboratorijskih i terenskih opita, izvršeno je poređenje sa korelacijama koje su dobijene:

- između konvencijalnih parametara (E_{v1} - E_{v2} , E_{vd} i M_s)
- između dinamičkog CBR_d i konvencijalnih parametara

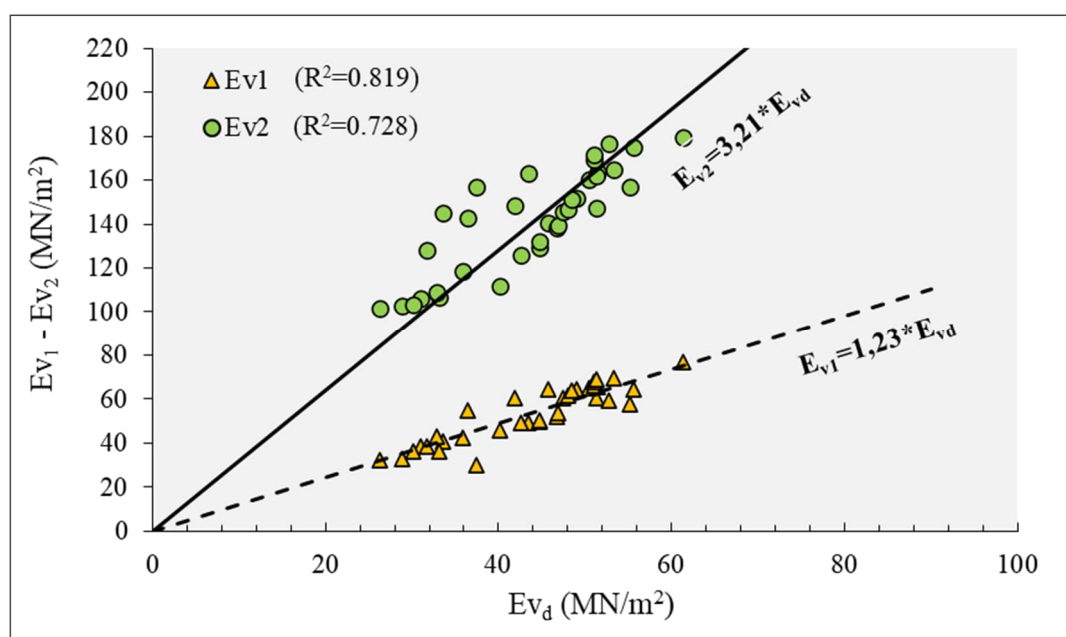
7.3.1 Korelacione zavisnosti između konvencionalnih parametara (E_{v1} - E_{v2} , E_{vd} i M_s)

E_{v1} - E_{v2} u odnosu na E_{vd}

Nakon prikupljanja i procene rezultata ispitivanja, definisane su precizne i jednostavne korelacione zavisnosti donjih slojeva saobraćajnica izgrađenih od šljunkovitog materijala (Slike 7.15 i 7.16).



Slika 7.15. Korelaciona zavisnost između E_{v1} - E_{v2} i E_{vd} (L4-G)

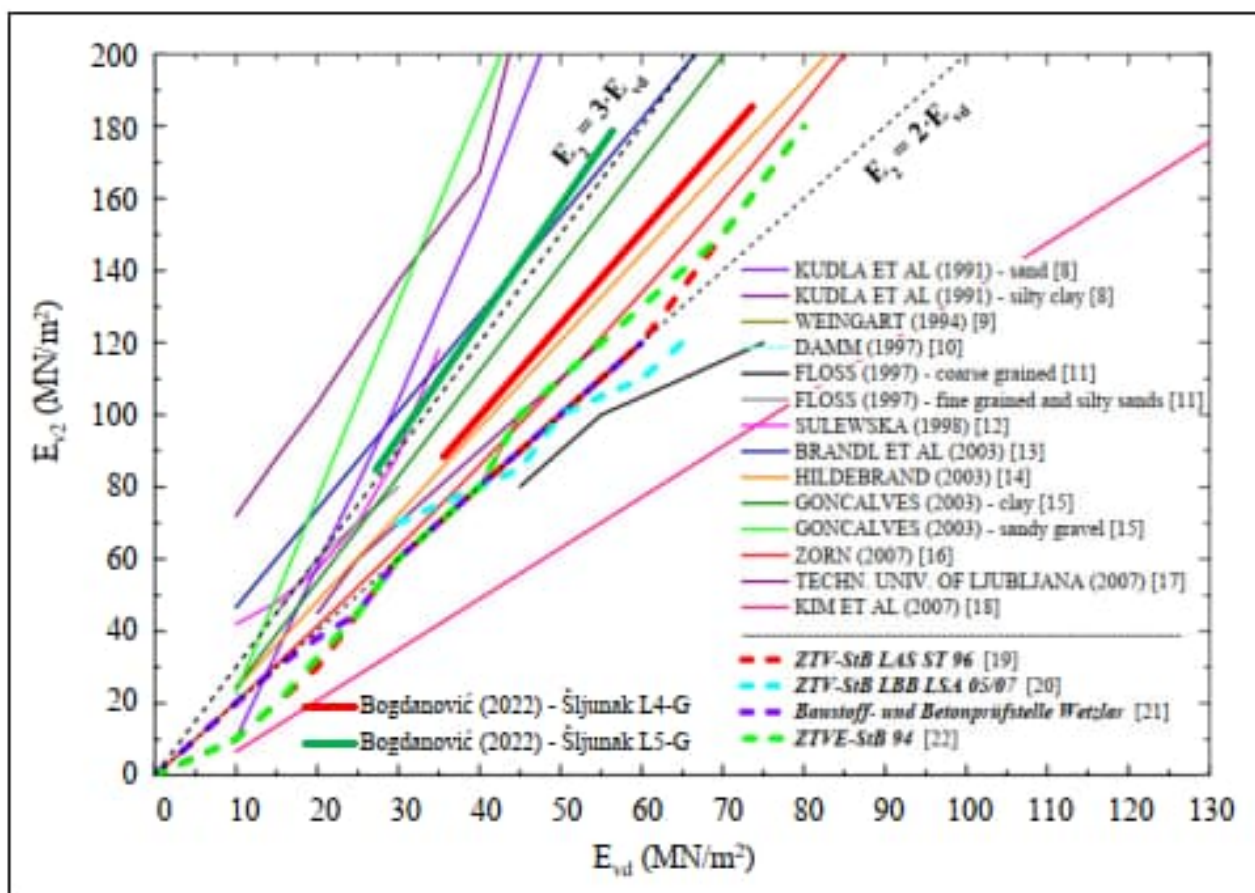


Slika 7.16. Korelaciona zavisnost između E_{v1} - E_{v2} i E_{vd} (L5-G)

Ove zavisnosti se mogu koristiti za pretvaranje izmerenih vrednosti E_{vd} dinamičkih modula u statičke vrednosti E_{v1} i E_{v2} modula. Dobijene su vrednosti koeficijenta determinacije $R^2=0,599-0,819$ (E_{v1}) i $R^2=0,534-0,728$ (E_{v2}), što se čini prihvatljivim u geotehničkim ispitivanjima. Takođe treba naglasiti da postoji razlika između vrednosti modula deformacije E_{v2} , sa lokacije L4-G čiji su rezultati modula deformacije E_{v2} nešto niži nego na lokaciji L5-G.

U Poglavlju 6 (Slika 6.2), navedeno je oko dvadesetak literaturnih podataka koji se odnose na korelacione zavisnosti između parametara E_{v2} i E_{vd} za sitnozrne i krupnozrne materijale (Tompai, 2008). Ovi podaci potiču sa donjih slojeva saobraćajnica širom sveta, tako da se odnose na materijale različitog sastava. Na osnovu literaturnih podataka i podataka prikazanih u ovoj disertaciji, može se zaključiti da je uspostavljena korelaciona zavisnost $E_{v2}=2 \cdot E_{vd}$ bliža donjoj graničnoj vrednosti. Moguća odstupanja mogu biti za sve vrste materijala. U vezi sa tim u ovoj disertaciji za dva krupnozna materijala (šljunak) prosečan odnos između parametara nosivosti (E_{v2}/E_{vd}) je dobijen 2.55 i 3.23.

Na Slici 7.17 dat je uporedni prikaz korelacionih zavisnosti između parametara E_{v2} i E_{vd} iz navedene literature, uključujući i korelacije dobijene istraživanjima za potrebe ove disertacije.



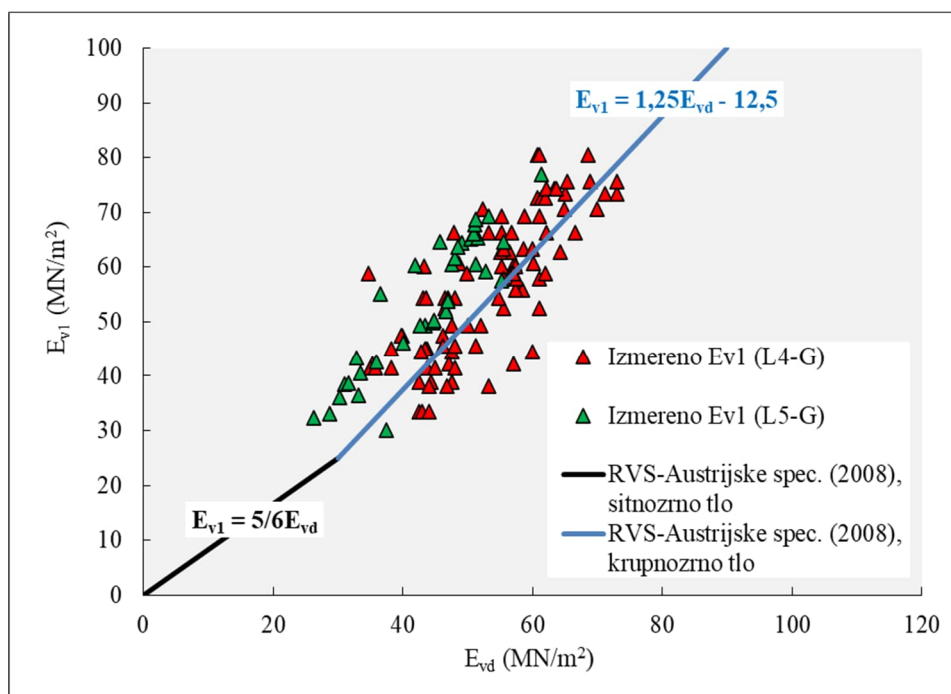
Slika 7.17. Uporedni prikaz korelacionih zavisnosti između parametara E_{v2} i E_{vd} predloženih u disertaciji i literaturnih podataka

Grafičkim prikazom (Slika 7.17) dolazimo do zaključka da se korelacione zavisnosti parametara nosivosti E_{v2} i E_{vd} dobijene za potrebe ove doktorske disertacije koje su bliže gornjoj graničnoj vrednosti u velikoj meri poklapaju sa literaturnim podacima dobijenim za krupnozrne materijale (Hildebrand G, 2003; Brandl H, Adam D, Kopf F, Niederbrucker R, 2003; Gonçalves J, 2003; Petkovsek A, 2007; Zorn Stendal, 2007).

Međutim, treba napomenuti da su moguća i odstupanja između uspostavljenih korelacija i podataka koji se dobijaju u praksi. Razlozi za to su višestruki, a uglavnom se vezuju za nivo donjeg sloja saobraćajnice, vrstu materijala, stepen zbijenosti, vlažnost i dr. Najčešće se odstupanje povećava kako se povećava vrednost E_{v2} . Iz toga se može izvesti zaključak da nijedan zbijeni materijal visoke čvrstoće ne treba ispitivati i korelisati sa dinamičkim uređajem što je već definisano normativno određenim granicama primene LWD uređaja.

U Austriji, dinamički modul (E_{vd}) nije u korelaciji sa modulom deformacije E_{v2} kao u Nemačkoj, već sa modulom deformacije E_{v1} . Ako pokušate da povežete parametre E_{vd} sa E_{v1} umesto sa E_{v2} , možete videti da su rezultati bliži jedan drugom i skoro da formiraju pravu liniju (Slike 7.18 i 7.19). Ovo već pokazuje da korelacija sa E_{v1} daje nešto bolje rezultate. Međutim, odstupanja između rezultata ispitivanja i korelacije su i dalje oko 10-15%.

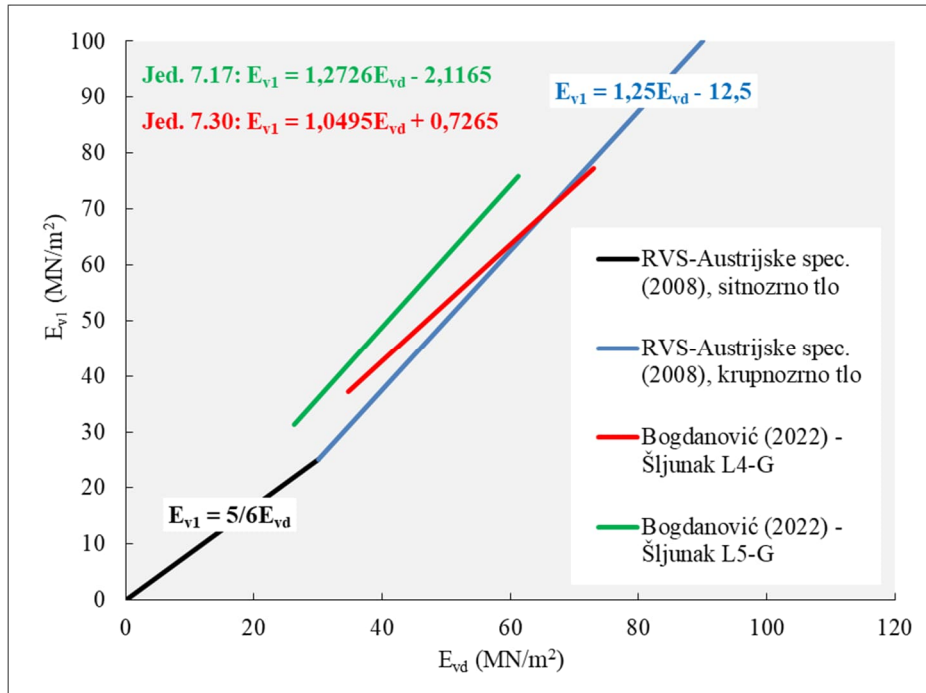
U slučaju šljunkovitih materijala korišćenih za potrebe ove doktorske disertacije, oblik zrna, koeficijent uniformnosti kao i sadržaj zrna većih od 2 mm igraju posebne uloge koje utiču na parametre nosivosti.



Slika 7.18. Zbirni prikaz parametara nosivosti E_{v1} i E_{vd} dobijenih na donjim slojevima saobraćajnica (L4-G i L5-G) i literaturnih podataka (RVS, Austrijske specifikacije)

Korelacione zavisnosti izražene jednačinama 7.17 i 7.30 između vrednosti parametara nosivosti E_{vd} - E_{v1} za krupnozrni materijal, dobijene terenskim ispitivanjima na donjim slojevima saobraćajnica u Srbiji, uz manja odstupanja dobro se slažu sa onom koji je na osnovu terenskih ispitivanja preporučio Adam (2008) za Austrijsku regulativu koja ima široku primenu u praksi (Slika 7.19).

Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da korelacija sa E_{v1} daje nešto bolje vrednosti od one sa E_{v2} . Međutim, pošto obe korelacije ponekad pokazuju i značajna odstupanja i da su normativne osnove u Srbiji povezane sa E_{v2} vrednošću, korelacije između vrednosti E_{vd} i E_{v1} inženjeri slabije primenjuju u Srbiji.

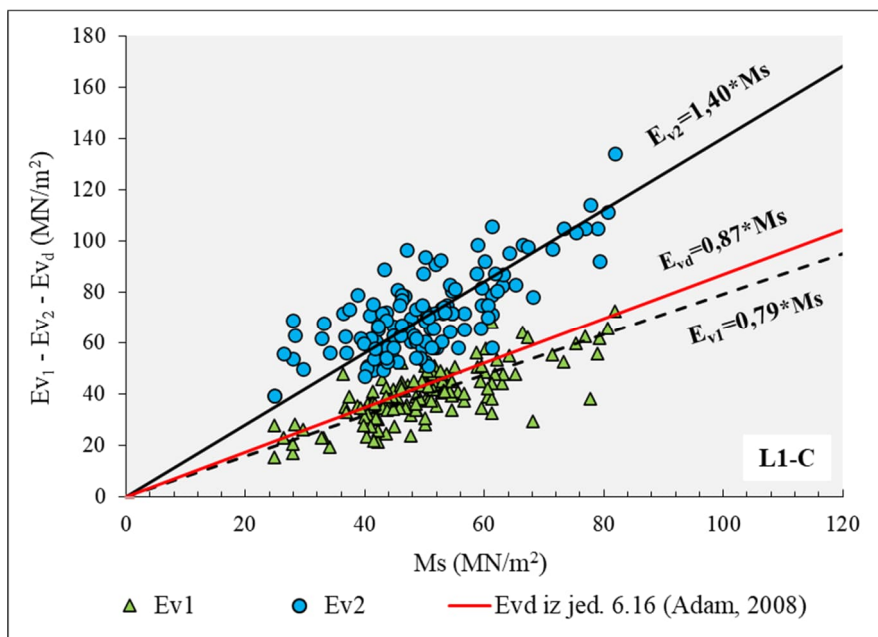


Slika 7.19. Uporedni prikaz korelacionih zavisnosti između parametara E_{v1} i E_{vd} predloženih u disertaciji i literaturnih podataka (RVS, Austrijske specifikacije)

E_{v1} - E_{v2} , E_{vd} u odnosu na M_s

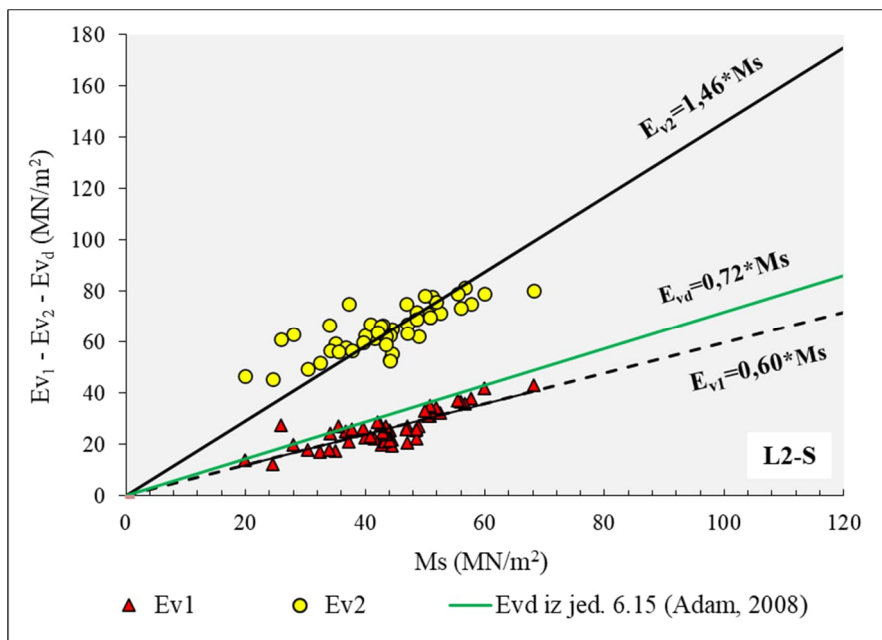
U domaćoj geotehničkoj praksi, kada se kriterijumi nosivosti iskazuju zahtevanim vrednostima statičkog modula (M_s), a merenja vrše pločom sa padajućim tegom, potrebno je naći dovoljno pouzdane korelacije E_{vd} - M_s za tipične vrste materijala.

Za potrebe doktorske disertacije korelacije između ovih modula dobijene su upoređivanjem velikog broja rezultata izvršenih opita kao i preuzimanjem inostranih propisa (RVS) pre svega dominantnih (nemačkih i austrijskih) koji ne daju vezu između E_{vd} i M_s ali uz pomoć modula deformacije E_{v1} - E_{v2} uvode i kriterijume nosivosti E_{vd} pa se može uspostaviti korelacija inostranih graničnih vrednosti E_{vd} i domaćih M_s kao što su već činili u svojim radovima Anagnosti i Rašula (2005) i Samardaković i dr. (2009).



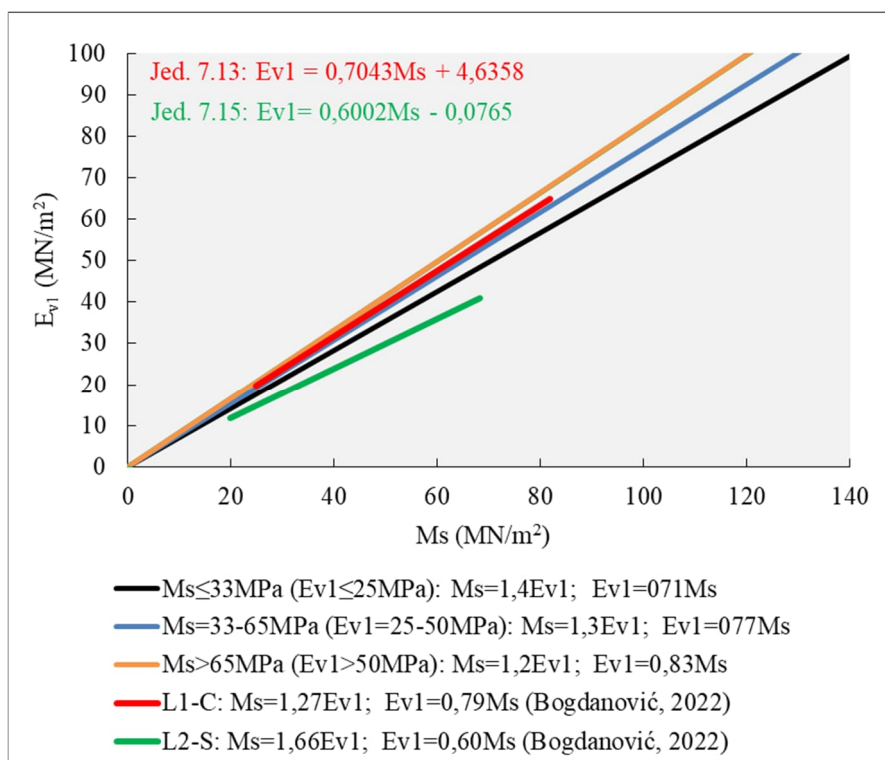
Slika 7.20. Zbirni prikaz korelacionih zavisnosti između E_{v1} - E_{v2} , E_{vd} i M_s

Na Slikama 7.20 i 7.21 dat je zbirni grafički prikaz poređenja korelacionih zavisnosti parametara nosivosti modula stišljivosti (M_s) i modula deformacije (E_{v1} - E_{v2}) do kojih se došlo uporednim ispitivanjima nosivosti materijala oznaka L1-C i L2-S. Na slikama su takođe prikazane korelacije između E_{vd} - M_s na osnovu korelacija E_{vd} - E_{v1} prikazanim u literaturnom pregledu, jednačine 6.15 i 6.16 (Adam, 2008).



Slika 7.21. Zbirni prikaz korelacionih zavisnosti između E_{v1} - E_{v2} , E_{vd} i M_s

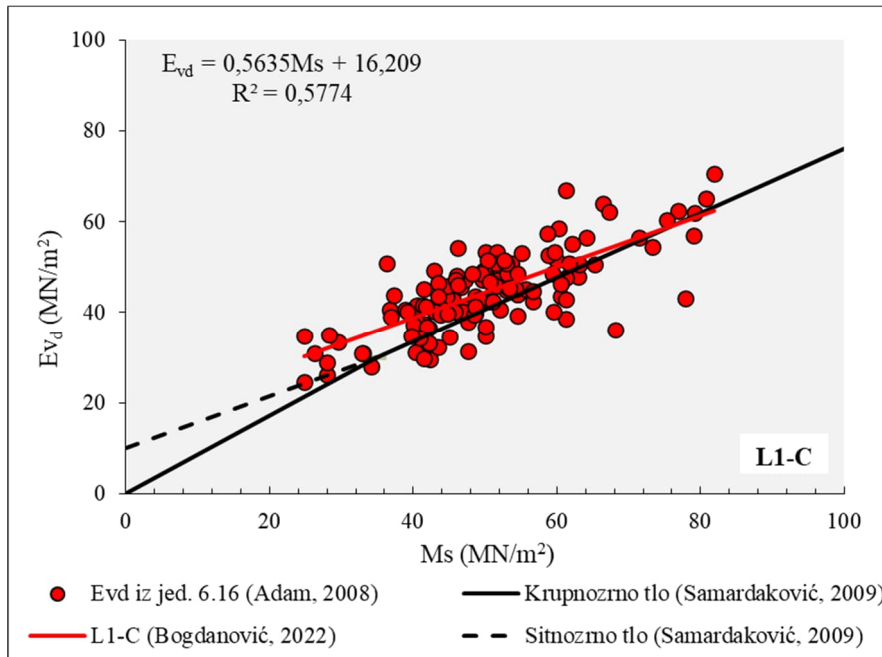
Poređenje između E_{v1} - M_s korelacija dobijenih u ovoj disertaciji i onih koje je predložio Samardaković (2009), prikazano je linijama trenda na Slici 7.22.



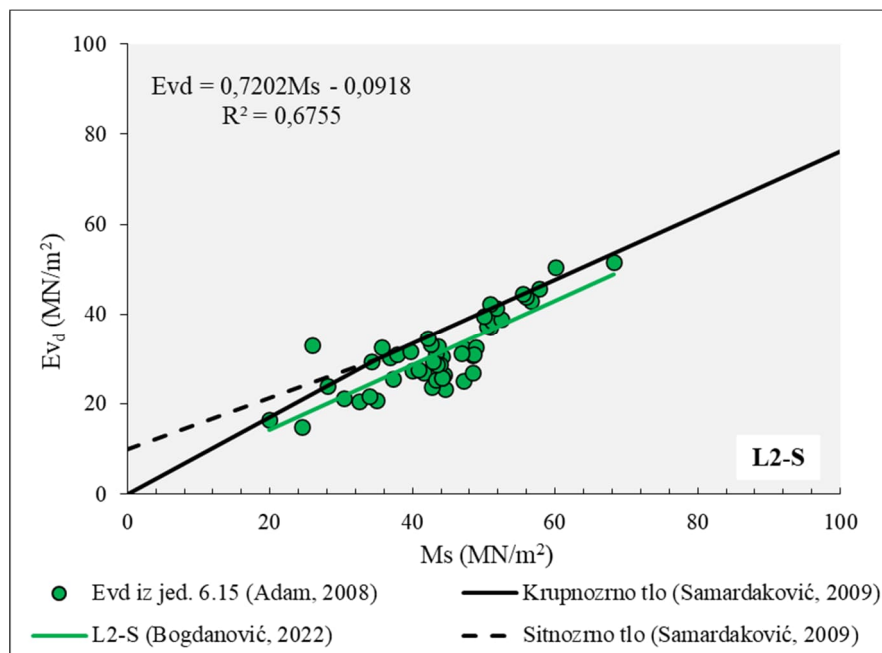
Slika 7.22. Uporedni prikaz korelacionih zavisnosti između parametara E_{v1} i M_s predloženih u disertaciji i literaturnih podataka (Samardaković, 2009)

Poređenja su rađena sa korelacionim zavisnostima definisanim na osnovu veze E_{v1} - M_s do kojih se došlo analizom toka tipičnih dijagrama (p,s) prikazanih na Slici 3.14. Može se zaključiti da korelacija prikazana u ovoj disertaciji predstavljena jednačinom 7.13 između navedenih modula za materijal oznake L1-C (glina, prašinsto peskovita) se poklapa sa korelacijama koje je predložio navedeni autor. Treba napomenuti da se varijacija između korelacije dobijene za peskoviti materijal oznake L2-S, izražene jednačinom 7.15 u odnosu na prikazane postojeće korelacije povećava kako se vrednost modula stišljivosti (M_s) povećava.

Na Slikama 7.23 i 7.24 dati su prikazi poređenja korelacionih zavisnosti između modula E_{vd} - M_s (L1-C i L2-S) sa predloženim literaturnim korelacijama za sitnozrne i krupnozrne materijale (Samardaković, 2009).



Slika 7.23. Uporedni prikaz korelacione zavisnosti između modula E_{vd} i M_s (L1-C) predložene u ovom radu i literaturnih podataka



Slika 7.24. Uporedni prikaz korelacione zavisnosti između modula E_{vd} i M_s (L2-S) predložene u ovom radu i literaturnih podataka

Iz navedenog, predložene su linearne korelacione zavisnosti koje opisuju odnos između dinamičkog modula deformacije E_{vd} i modula stižljivosti M_s za sitnozrni (glinoviti) i krupnozrni (peskoviti) materijal. Korelacione zavisnosti su definisane jednačinama:

$$E_{vd} = 0.5635M_s + 16.209 \quad \text{za} \quad 35 \text{ MN/m}^2 < M_s < 65 \text{ MN/m}^2 \quad (7.32)$$

$$E_{vd} = 0.7202M_s + 0.0918 \quad \text{za} \quad 35 \text{ MN/m}^2 < M_s < 55 \text{ MN/m}^2 \quad (7.33)$$

Korelacione zavisnosti izražene jednačinama 7.32 i 7.33 između vrednosti parametara nosivosti E_{vd} - M_s za sitnozrni i krupnozrni materijal, dobijene terenskim ispitivanjima na donjim slojevima saobraćajnica u Srbiji, prikazane linijama trenda uz manja odstupanja se dobro poklapaju sa onima koje je preporučio Samardaković (2009).

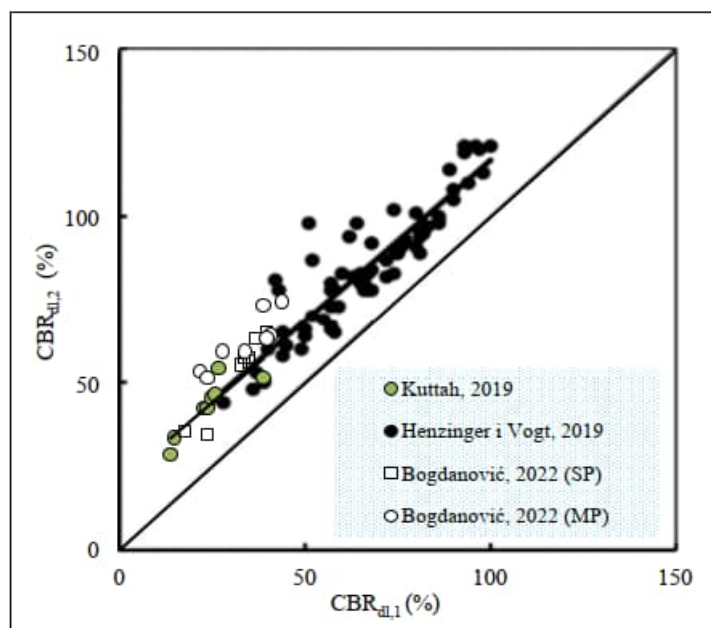
7.3.2 Korelacione zavisnosti između dinamičkog CBR_d i konvencionalnih parametara

Prethodno prikazan postupak dinamičkog ispitivanja parametra CBR_d šljunkovitog materijala (Poglavlje 4.2) prvi put je rađeno u Republici Srbiji. Međutim, u svetskoj literaturi i praksi izvođenje dinamičkog CBR_d opita prisutno je zadnjih godina. S obzirom da se radi o relativno novijem opitu, vremenom je vršeno određeno prilagođavanje laboratorijskih ispitivanja u zavisnosti od vrste materijala kroz povećanje energije, dodatak opreme za *in situ* ispitivanje i sl.

Dobijeni i statistički analizirani rezultati ispitivanja su prikazani u poglavlju „Statistički pokazatelji parametara zbijanja i nosivosti dodatnih ispitivanja“, dok su korelacione zavisnosti sa konvencionalnim parametrima zbijanja i nosivosti prikazani u prethodnom podpoglavlju 7.2.

CBR_{dl} u odnosu na γ_d i CBR

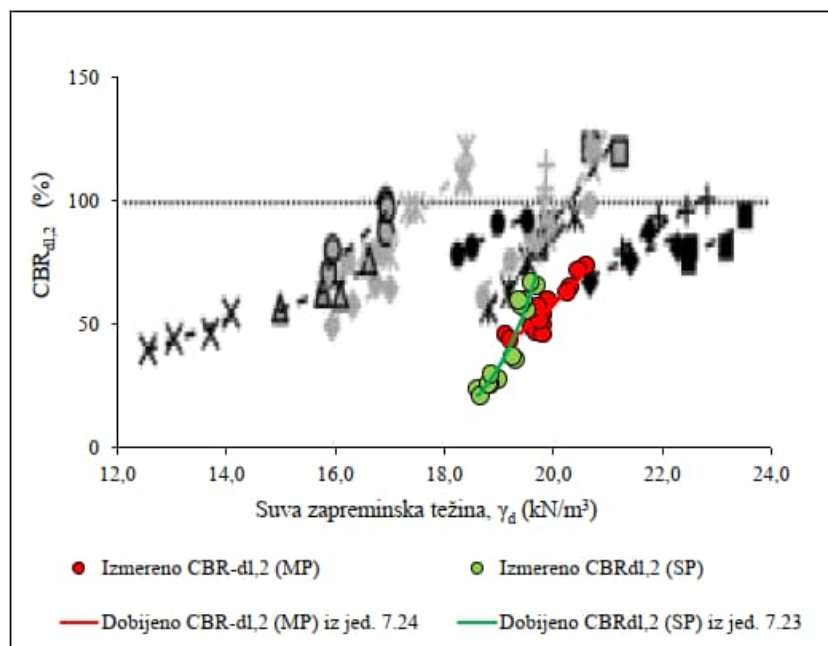
Zbijanje krupnozrnog materijala - šljunka zavisi od velikog broja faktora. Upravo iz ovog razloga, mora se posebno voditi računa o njegovim fizičkim osobinama, kao i načinu zbijanja. Energija zbijanja predstavlja samo jedan od faktora koji utiču na krajnje parametre. Zbirni prikaz između vrednosti CBR_{dl} dobijenih iz privog ($CBR_{dl,1}$) i drugog ($CBR_{dl,2}$) udarca padajućeg teža krupnozrni materijala i rezultata literaturnih podataka koji su obrađeni u doktorskoj disertaciji prikazan je na Slici 7.25.



Slika 7.25. Zbirni prikaz između vrednosti CBR_{dl} dobijenih iz privog ($CBR_{dl,1}$) i drugog ($CBR_{dl,2}$) udarca padajućeg teža za krupnozrne materijale i literaturnih podataka

Grafičkim prikazom (Slika 7.25) dolazimo do zaključka da se korelacione zavisnosti prikazane jednačinama 7.19 i 7.20 između vrednosti CBR_{dl} dobijenih iz prvog ($CBR_{dl,1}$) i drugog ($CBR_{dl,2}$) udarca padajućeg tega za šljunak (L4-G) dobijene za potrebe ove doktorske disertaciji u velikoj meri poklapaju sa literaturnim podacima dobijenim za prirodne krupnozrne materijale, kao i da materijali sa sadržajem više veštačkih komponenti imaju manja odstupanja i više CBR_{dl} vrednosti, što takođe odgovara literaturnim podacima.

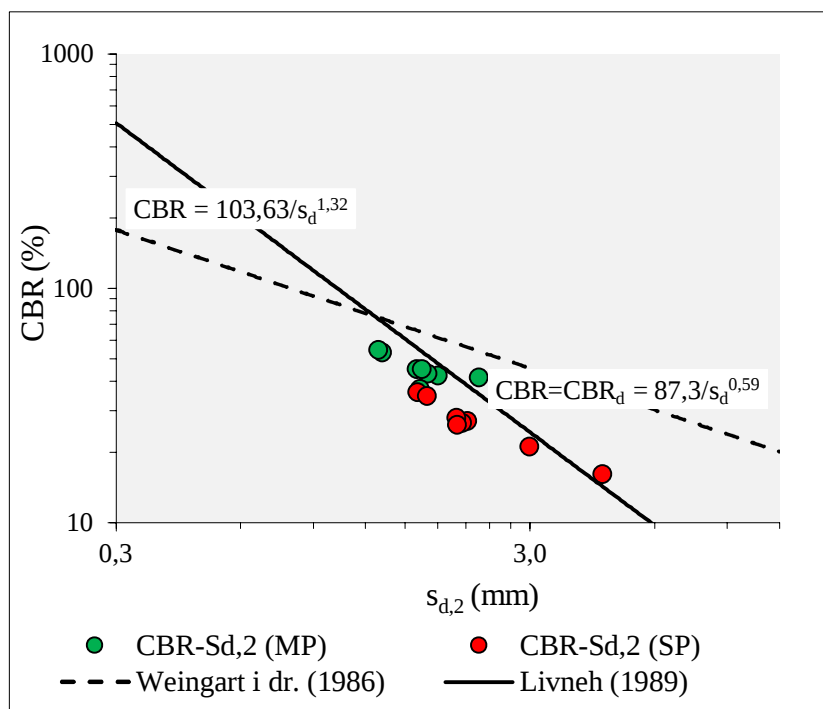
Pri poređenju korelacionih zavisnosti između dinamičkog CBR_{dl} i parametara zbijanja (suva zapreminska težina - γ_d , vlažnost - w) treba posebno obratiti pažnju na vrstu materijala i pripremu uzoraka za ispitivanje. Na Slici 7.26 prikazano je poređenje korelacionih zavisnosti između dinamičkog $CBR_{dl,2}$ i suve zapreminske težine (γ_d) dobijenih za krupnozrni materijal – šljunk (L4-G) i onih dobijenih od strane Henzinger i Vogt (2019) za različite krupnozrne materijale.



Slika 7.26: Zbirni prikaz između vrednosti $CBR_{dl,2}$ i γ_d (L4-G) sa literaturnim postojećim vrednostima za krupnozrne materijale (Henzinger i Vogt, 2019)

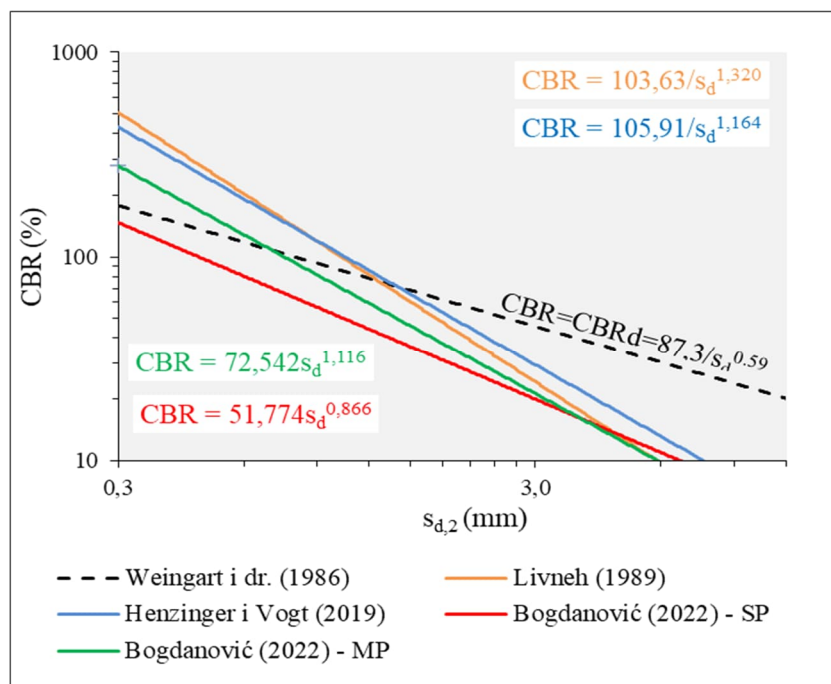
Na osnovu grafičkog prikaza može se zaključiti da se trend korelacionih zavisnosti za slične krupnozrne materijale između parametara dinamičkog $CBR_{dl,2}$ i suve zapreminske težine (γ_d) dobijenih u laboratorijskim uslovima za potrebe ove doktorske disertacije uglavnom poklapa sa literaturnim podacima. Međutim treba naglasiti da postoje i očekivana manja odstupanja između dobijenih vrednosti i literaturnih podataka što je direktno uslovljeno razlikama fizičko-mehaničkim karakteristika krupnozrnog materijala.

Na slici 7.27 su prikazane statičke vrednosti CBR-a u odnosu na dinamički prodor konusa nakon drugog udarca (s_{d2}) padajućeg tega CBR_d uređaja. Dobijene uporedne vrednosti šljunkovitog materijala (L4-G) prikazane su različitim bojama u zavisnosti od energije zbijanja (standardna - SP i modifikovana – MP) i vlažnosti pripremljenih uzoraka. Dvostruki logaritamski dijagram takođe uključuje jednačinu 3.7 kao pravu isprekidanu liniju. Ako bi statička vrednost CBR-a datog materijala u datom stanju zbijanja bila slična CBR_d (kako je izračunato iz s_d vrednosti), što je osnovna pretpostavka za korišćenje jednačine 3.6 i 3.7 onda bi svi eksperimentalni podaci trebalo da budu na ovoj isprekidanoj liniji. Na Slici 7.27 je takođe prikazana jednačina 3.8, koja je empirijska korelacija (preračunata iz DCP ispitivanja), kao neprekidna prava linija.



Slika 7.27. Zbirni prikaz između statičke (klasične) vrednosti CBR-a i dubine penetracije ($s_{d,2}$) dinamičkog CBR-a sa literaturnim podacima

Uporedni prikaz korelacionih zavisnosti vrednosti statičkog CBR-a i dubine penetracije ($s_{d,2}$) dinamičkog CBR-a za šljunkoviti materijal oznake L4-G sa postojećim korelacijama prikazan je na Slici 7.28. Kada se uporede linije trenda dobijenih korelacionih zavisnosti u ovoj doktorskoj disertaciji sa korelacijom koju je dao Livneh (1989), kao i sa korelacijom koju su predložili Henzinger i Vogt (2019) za krupnozrne materijale može se otkriti izvesno poklapanje.



Slika 7.28. Uporedni prikaz korelacionih zavisnosti vrednosti statičkog CBR-a i dubine penetracije ($s_{d,2}$) dinamičkog CBR-a sa postojećim korelacijama

Na Slici 7.28 je prikazano linijama trenda da postoji dobra veza između statičke vrednosti CBR i dubine prodiranja ($s_{d,2}$) - podaci laboratorijskih ispitivanja i literaturnih podataka. Odgovarajuće

korelacije koji pripadaju ovim linijama trenda su prikazane jednačinama 7.34 i 7.35 uz koeficijente determinacije (R^2).

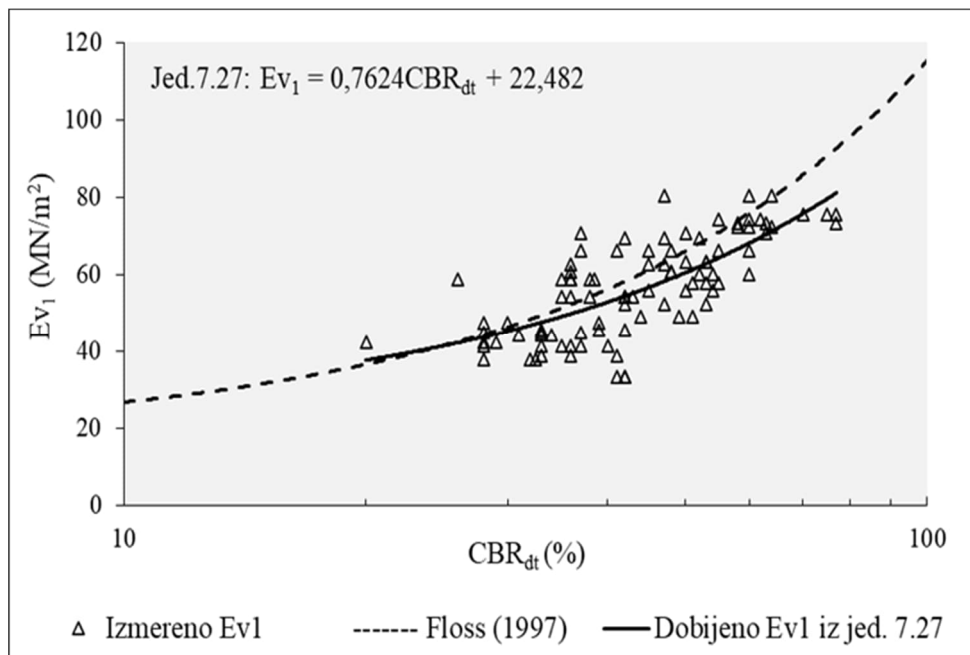
$$\text{CBR (SP)} = 51.774/s_d^{0.866} \quad R^2 = 0,9181 \quad (7.34)$$

$$\text{CBR (MP)} = 72.542/s_d^{1.116} \quad R^2 = 0,7919 \quad (7.35)$$

Takođe treba naglasiti, da bi CBR_d ispitivanje bilo vredna alternativa konvencionalnom CBR ispitivanju, korelacija između vrednosti CBR i dinamičke penetracije mora biti pravilno kalibrisana. Za krupnozrne materijale „in situ“ ukoliko bi došlo do manjih odstupanja trebalo bi povećati broj dinamičkih CBR_d ispitivanja na bilo kom ispitnom mestu i uzimanjem srednje vrednosti ovih vrednosti.

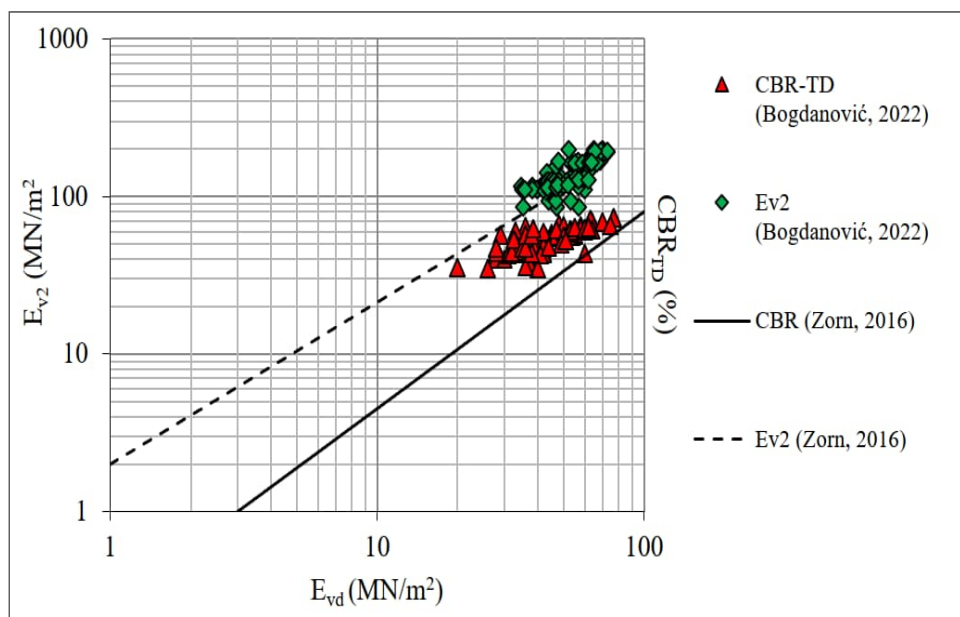
CBR_{dt} u odnosu na E_{v1} - E_{v2} i E_{vd}

Poređenje između CBR_{dt} i E_{v1} korelacija dobijenih u ovoj disertaciji i one koju je predložio Floss (1997), prikazano je na Slici 7.29. Kao što je prikazano na slici, korelacija koju je predložio Floss (1997) je slična onoj predloženoj u ovoj disertaciji, jednačina 7.27. Međutim varijacija između dve korelacije se povećava kako se CBR_{dt} vrednost povećava.



Slika 7.29. Uporedni prikaz korelacione zavisnosti E_{v1} u odnosu na CBR_{dt} sa postojećom korelacijom (Floss, 1997)

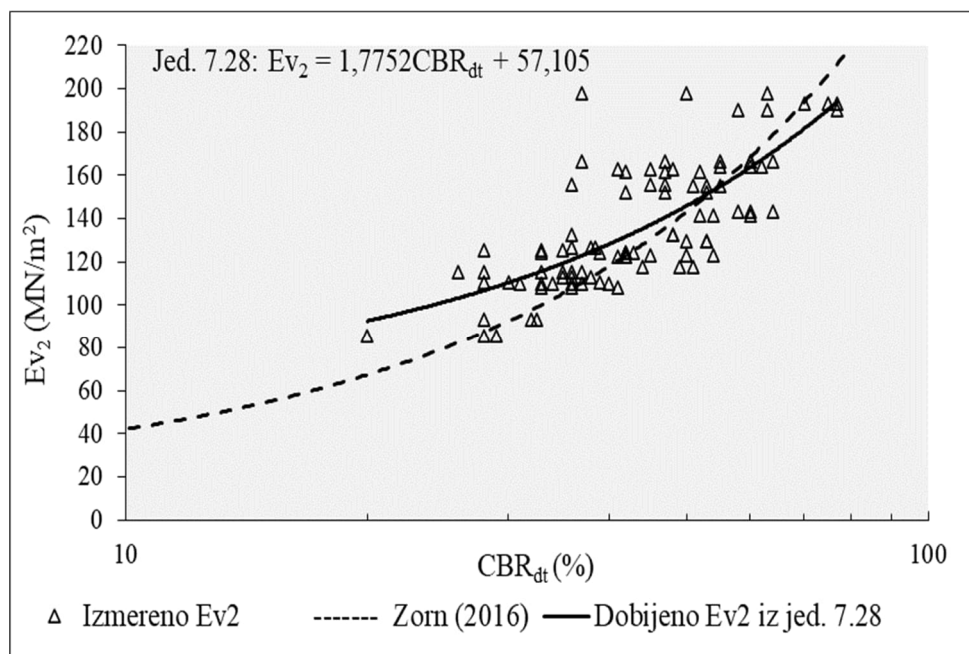
Zbirni prikaz parametara dinamičkog modula deformacije E_{vd} , modula deformacije E_{v2} i dinamičkog CBR_{dt} sa postojećom literaturom koju je predložio Zorn (2016) prikazano je na Slici 7.30.



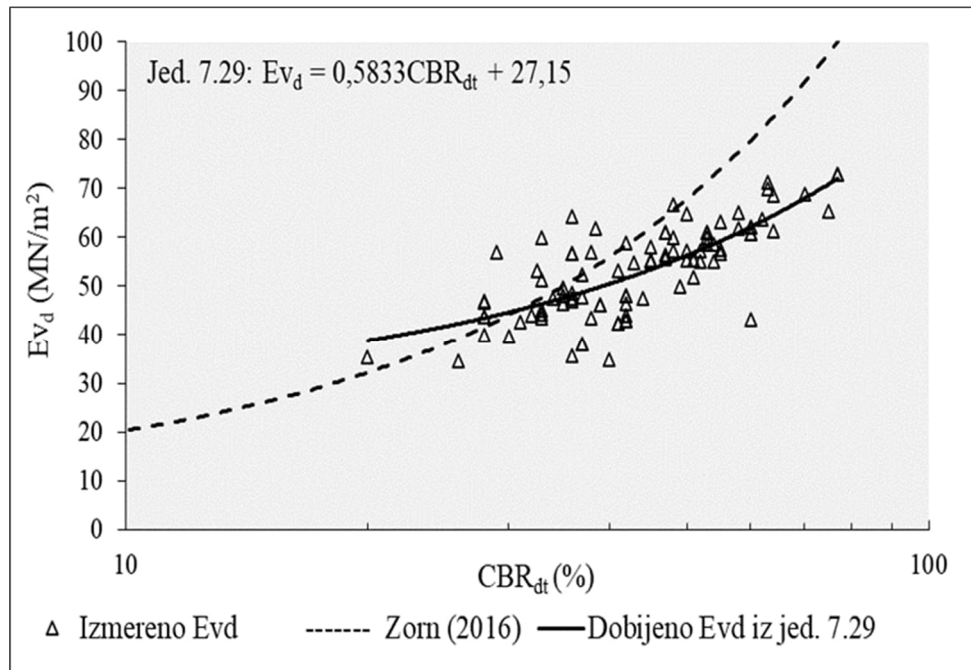
Slika 7.30. Zbirni prikaz parametara dinamičkog modula deformacije E_{vd} , modula deformacije E_{v2} i dinamičkog CBR_{dt} sa literarnim podacima (Zorn, 2016)

Predložena korelacija između E_{vd} - E_{v2} (Zorn, 2016), je veoma bliska korelaciji predloženoj u ovoj disertaciji, jednačina 7.31 pri vrednostima $35 \text{ MN/m}^2 < E_{vd} < 73 \text{ MN/m}^2$.

Takođe je napravljeno poređenje između CBR_{dt} pri vrednostima $20 \% < CBR_{td} < 77 \%$ i vrednosti modula E_{v2} i E_{vd} korelacija dobijenih u ovoj disertaciji, jednačine 7.28 i 7.29 i onih koje je predložio Zorn (2016), kao što je prikazano na Slikama 7.31 i 7.32.



Slika 7.31. Uporedni prikaz korelacione zavisnosti E_{v2} u odnosu na CBR_{dt} sa postojećom korelacijom (Zorn, 2016)



Slika 7.32. Uporedni prikaz korelacione zavisnosti E_{vd} u odnosu na CBR_{dt} sa postojećom korelacijom (Zorn, 2016)

Ovde treba napomenuti da je Zorn (2016) korelaciju predložio za krupnozrna tla dobre zbijenosti, sto ne definiše bližu vrstu krupnozrnog materijala i stepen zbijenosti. Napred navedeno kao i mogućnost različitog sadržaja vlažnosti prilikom ispitivanja mogu biti uzroci manjih odstupanja između navedenih korelacija.

Uz sve prethodno navedeno, zaključuje se da su laboratorijskim i terenskim istraživanjima za potrebe doktorskog disertacije potvrđene prikazane korelacione zavisnosti između parametara zbijanja i nosivosti donjih slojeva sagrađajnica. Korelacione zavisnosti se u velikoj meri poklapaju sa literaturnim podacima uz manja odstupanja što može biti posledica razlika u nivou kolovoznih konstrukcija, vrsti materijala, stepenu zbijenosti, vlažnosti i dr.

Korelacione zavisnosti dobijene uz pomoć parametara dinamičkog kaliforniskog indekasa nosivosti (CBR_d) predstavljaju jednu novinu u geotehničkoj praksi u Srbiji i one bi u praksi tek trebalo da nađu svoj razvojni put. Prikazane korelacije izvedene na osnovu rezultata ispitivanja za krupnozrni materijal (šljunak) možemo smatrati da će u budućnosti biti polazna tačka mnogih istraživanja različitih vrsta materijala, kako laboratorijskih tako i terenskih.

8. ZAKLJUČAK I PREPORUKE ZA DALJA ISTRAŽIVANJA

8.1 Zaključna razmatranja

Primarni cilj ove doktorske disertacije je bio da se formiraju određene korelacione zavisnosti parametara zbijanja i nosivosti za procenu čvrstoće podloge kolovzne konstrukcije, kako bi se ubrzao proces donošenja odluka o projektovanju kolovoza i pojednostavila procena obezbeđenja kvaliteta i kontrole kvaliteta kolovoznog sistema. Istraživanje je preduzeto u cilju formiranja određenih korelacionih zavisnosti između laboratorijskih i terenski dobijenih parametara, koje su neophodne u geotehničkim analizama vezanim za izbor i način građenja donjih slojeva saobraćajnica što je doprinelo predlogu načina upotrebe i definisanju vrednosti dinamičkog CBR uređaja (CBR_d). Sva laboratorijska i terenska ispitivanja vršena su korišćenjem tla kao građevinskog sitnozrnog i krupnozrnog materijala.

Da bi se uspostavile korelacione zavisnosti sprovedeno je prikupljanje i analiza podataka sprovedenih tekućih laboratorijskih i terenskih ispitivanja za potrebe izgradnje donjih slojeva saobraćajnica na 5 različitim lokacijama u državi Srbiji. Analizirano je ukupno 142 uzoraka materijala različitih klasifikacija kao što su glina, pesak i šljunak kao i ukupno 870 *in situ* opita koji su korišćeni za definisanje parametara zbijanja i nosivosti donjih slojeva saobraćajnica na pomenutim lokacijama.

Jedan od ciljeva ove disertacije je da proceni potencijalnu upotrebu dinamičkog CBR_d uređaja za ispitivanje zbijanja i nosivosti donjih slojeva saobraćajnica pre, tokom i nakon izgradnje. Da bi se ovo procenilo, sprovedena je serija dodatnih laboratorijskih ispitivanja od šljunkovitog materijala, kao i terenskih ispitivanja tokom izgradnje na posteljičnom sloju na lokaciji Petlja Batajnica (Autoput E75) u Beogradu. Program laboratorijskih i *in situ* ispitivanja uključivao je određivanje parametara zbijanja i nosivosti korišćenjem odgovarajućih uređaja. Pored nekih standardnih ispitivanja, koji su uključivali standardni i modifikovani Proktorov opit, laboratorijsko ispitivanje statičkog kalifornijskog indeksa nosivosti (CBR), ispitivanja *in situ* modula deformacije (E_{v1} - E_{v2}), modula stišljivosti (M_s), dinamičkog modula deformacije (E_{vd}), stepena zbijenosti (R_c) uključivali su i ispitivanja dinamičkog kalifornijskog indeksa nosivosti (CBR_d) u laboratorijskim i terenskim uslovima.

Statistička analiza je sprovedena da bi se korelisali standardni parametri zbijanja i nosivosti međusobno kao i sa vrednostima dinamičkog CBR_d uređaja. Rezultati statističke analize pokazuju da postoji čvrsta veza (Tabela 7.1) tj. dobra korelacija između gore pomenutih parametara. Relacije dobijene statističkom analizom u zavisnosti od modela bile su linearne i nelinearne.

Rezultati statističke analize su pokazali da postoji dobra korelacija između parametara koji se procenjuje (CBR_d) u laboratorijskim uslovima (CBR_{dl}) i standardnih laboratorijskih parametara (γ_d , w i CBR). Takođe ista analiza je pokazala da postoji dobra korelacija između parametara koji se procenjuje (CBR_d) u terenskim uslovima (CBR_{dt}) i standardnih *in situ* parametara (E_{v1} - E_{v2} i E_{vd}).

Regresioni modeli su imali nivo značajnosti veći 95 % što sugeriše da se laboratorijski dinamički CBR_{dl} može pouzdano koristiti za predviđanje parametara dobijenih iz vrednosti γ_d , w i CBR, odnosno *in situ* CBR_{dt} za predviđanje parametara nosivosti E_{v1} - E_{v2} i E_{vd} . Iz tog razloga se dinamički CBR_d može koristiti za procenu parametara zbijanja i nosivosti krupnozrnog šljunkovitog materijala pre i tokom izgradnje podloge kolovzne konstrukcije.

Verifikacija dobijenih korelacionih zavisnosti, posebno je obavljena između konvencijalnih parametara a posebno između dinamičkog CBR_d i konvencijalnih parametara, poređenjem sa rezultatima koji su prikazani u literaturi.

Zaključeno je:

- Korelacione zavisnosti između parametara nosivosti E_{v2} - E_{vd} predložene u ovoj disertaciji za šljunkoviti materijal su u graničnom pojasu koji je predložio Lehmann, 2011. Takođe krive linearnih jednačina se nalazi iznad granične krive $E_{v2}=2E_{vd}$ što je literaturno predložila većina autora
- Korelacione zavisnosti između parametara nosivosti E_{v1} - E_{vd} za šljunkoviti materijal, dobijene terenskim ispitivanjima na donjim slojevima saobraćajnica u Srbiji, uz manja odstupanja dobro se slažu sa onom koji je preporučio Adam (2008) za Austrijsku regulativu koja ima široku primenu u praksi
- Korelacione zavisnosti između vrednosti parametara nosivosti E_{vd} - M_s za sitnozrni i krupnozrni materijal, dobijene terenskim ispitivanjima na donjim slojevima saobraćajnica u Srbiji, prikazane linijama trenda uz manja odstupanja se dobro poklapaju sa onima koje su navedene u literaturi
- Trend korelacione zavisnosti između parametara dinamičkog $CBR_{d1,2}$ i suve zapreminske težine (γ_d) dobijenog u laboratorijskim uslovima za potrebe ove doktorske disertacije uz očekivana odstupanja poklapa sa literaturnim podacima za slične krupnozrne materijale.
- Linija trenda dobijene korelacione zavisnosti između vrednosti statičkog CBR-a i dubine penetracije ($s_{d,2}$) dinamičkog CBR-a za šljunkoviti materijal se uglavnom poklapa sa linijama trenda korelacija koje su predložili Livnih (1989) i Henzinger i Vogt (2019) za krupnozrne materijale.
- Predloženi odnosi kalifornijskog indeksa nosivosti dinamičkog (CBR_{dl}) i statičkog-kласičnog (CBR) u funkciji vlažnosti (w), bili su kompatibilni tj. trend kriva korelacionih zavisnosti u velikoj meri se poklapa sa odnosom literaturnih podataka
- Korelacione zavisnosti dobijene *in situ* ispitivanjima dinamičkog (CBR_{dt}) i relevantnih modula E_{v1} - E_{v2} i E_{vd} se uz manja odstupanja poklapaju sa krivama korelacionih zavisnosti za krupnozrni materijal koje su predložili Floss (1997) i proizvođač uređaja (Zorn Instruments GmbH & Co. KG, 2016)

Doktorska disertacija je dala niz naučnih doprinosa, pre svega na regionalnom nivou obzirom da neke korelacione zavisnosti nisu dosad ni razmatrane:

- Definisano je fizičko-mehaničko ponašanje prirodnih materijala iz donjih slojeva saobraćajnica na osnovu različitih laboratorijskih i terenskih ispitivanja, kao i ponašanje istih u zavisnosti od uslova ugradnje (načina zbijanja, promene vlažnosti, stepena zbijenosti, primenjenih metoda i sl.)
- Razvijene korelacione zavisnosti između parametara zbijanja i nosivosti mogu se koristiti za procenu čvrstoće podloge u definisanju projektovanja fleksibilnog i krutog kolovoza.

- Uspostavljanje korelacionih zavisnosti pored naučnog ima i praktični značaj jer će omogućiti da se broj kompleksnih i skupih ispitivanja znatno smanji
- Proširena su postojeća saznanja o mogućnostima primene dinamičkog CBR_d -a prilikom izbora krupnozrnih materijala za potrebe građenja kao i tokom izgradnje donjih slojeva saobraćajnica. U vezi sa tim definisan je primenjeni opseg merenja za karakteristične parametre zbijenosti i nosivosti šljunkovitog materijala. To će omogućiti efikasnije i praktičnije vršenje ispitivanja, bez korišćenja teške mehanizacije naročito na slabo pristupačnim mestima.
- Nove korelacione zavisnosti mogle bi da otvore mogućnost poređenja tj. procene nosivosti ispitivanog sloja, ne samo ispitivanjem statičkog opterećenja ploče, što se pokazalo dugotrajnim i radno intenzivnim, već i pomoću dinamičkih uređaja (E_{vd} , CBR_d). U međuvremenu, potrebno je izvršiti još detaljnije statističke analize pošto je potrebno više mernih mesta i podataka da bi se povećala pouzdanost predloga. Široko rasprostranjena upotreba navedenih dinamičkih uređaja može olakšati izvođačima, laboratorijama i inženjerima u građevinskoj industriji puteva da izvrše brzu i stalnu kontrolu kvaliteta donjih slojeva saobraćajnica (slojevi nasipa, posteljica).
- Rezultati ove disertacije mogu se koristiti za razvoj novih procedura za izgradnju donjih slojeva saobraćajnica. U ovim procedurama, kriterijumi prihvatljivosti treba da se zasnivaju na merenjima zbijanja i nosivosti koja se mogu dobiti korišćenjem E_{vd} , i CBR_d uz merenje sadržaja vlage.
- Unapređenje teorijskih i praktičnih saznanja na osnovu uporednih rezultata merenja različitim laboratorijskim i terenskim opitima na konkretnim objektima tokom izgradnje donjih slojeva saobraćajnica iz domaće i strane literature.

8.2 Preporuke za dalja istraživanja

Obzirom da korelacione zavisnosti između parametara zbijanja i nosivosti donjih slojeva saobraćajnica zavise od brojnih faktora, uvek postoji prostor za dalji rad i napredak. U nastavku teksta biće date preporuke za dopunu i nastavak istraživanja koja su obrađena u doktorskoj disertaciji:

- Korelacije zavisnosti definisane u ovoj disertaciji razvijene su za prašinasto-glinovit, peskovit i šljunkovit materijal. Preporučuje se da se ove korelacije još jednom prouče pre i tokom izgradnje donjih slojeva saobraćajnica na različitim lokacijama u Srbiji na osnovu različitih karakteristika materijala.
- Buduće studije bi trebalo da istraže druge materijale i da se provere korelacije zavisnosti njihovih parametara zbijanja i nosivosti u laboratorijskim i *in situ* uslovima.
- Preporučuje se da buduća istraživanja temeljno istraže uticaj sadržaja vlage na dinamičko CBR_d ispitivanje.
- Preporučuje se da se sprovedu dalja terenska ispitivanja kako bi se potvrdili odnosi predloženi u ovoj disertaciji. Ova ispitivanja treba da obuhvate različite vrste materijala sa širokim rasponom parametara zbijanja i nosivosti.

- Pošto različiti *in situ* uređaji obezbeđuju merenje zbijanja i nosivosti na različitim nivoima naprezanja i deformacije, stoga se preporučuje da buduća istraživanja prouče korelacionu zavisnot između dobijenih parametara uzimajući u obzir stopu varijacije modula sa deformacijom i naprezanjem.
- Korelativna istraživanja treba da se sprovode za ograničeni skup vrsta materijala, jer pouzdanost predviđanja primenom korelacija može se očekivati samo za slične materijale i istu standardizovanu opremu za ispitivanje. Kako su izvedene zakonitosti samo empirijske korelacije, obično bez adekvatnih teorijskih podloga, u praksi su moguća odstupanja pa je nužan oprez u njihovoj primeni. Iz tog razloga se ne preporučuje korišćenje ovih korelacija u seriji, to jest nadovezivanja jedne korelacije na drugu i tako dalje.

LITERATURA

- Adam, D. (1997). Continuous Compaction Control (CCC) with Vibratory Rollers. Proceedings of GeoEnvironment 97, Melbourne, Australia, Balkema, Rotterdam, 245–250.
- Adam, D. (2008). Standardization, design, quality assurance and monitoring of earth works in road engineering in Austria, Viena University of Technology, Wien.
- Adam, D., und Kopf, F. (2002). Messtechnische und Theoretische Untersuchungen als Grundlage für die Weiterentwicklung und Normative Anwendung der dynamischen Lastplatte (Leichtes Fallgewichtsgesetz) – Messen in der Geotechnik (TU Wien), Braunschweig.
- Adam, D. and Kopf, F. (2004). Operational devices for compaction optimization and quality control (Continuous Compaction Control & Light Falling Weight Device). Proceedings of the International Seminar on Geotechnics in Pavement and Railway Design and Construction Gomes Correia and Loizos (eds), Millpress, Rotterdam.
- Agarwal, K.B. and Ghanekar, K.D. (1970). Prediction of CBR from Plasticity Characteristics of Soil. Proceeding of 2nd Southeast Asian Conference on Soil Engineering, Singapore. June 11-15, Bangkok: Asian Institute of Technology, pp. 571-576.
- Agterberg, F.P. (1974). Geomathematics. Mathematical Background and Geo-Science Applications. Elsevier, 596 pp, Amsterdam, London, New York.
- Anagnosti, P., Rašula, M. (2005). Primena propisa nemaikih železnica za upotrebu dinamičkog mernog uređaja u oceni zbijenosti zemljanih materijala, Zbornik radova i naučno-stručnog savetovanja "Geotehnički aspekti građevinarstva", SGITSCG, Beograd, 469-472.
- Anderson, T.W. and Sclavos, S.L. (1978). An introduction to the statistical analysis of data. Boston, MA: Houghton Mifflin Company.
- Baecher, G.B. and Christian J.T. (2003). Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering, John Wiley & Sons, Ltd ISBN: 0-471-49833-5.
- Black, W.P.M. (1962). A method of estimating california bearing ratio of cohesive soils from plasticity data. Geotechnique, Vol.12, No.4, pp 271-282.
- Bobe, R. und Hubáček, H. (1983). Tragfähigkeitsprüfung (Kapitel 4.5). Bodenmechanik, VEB, Berlin.
- Bogdanović, M., Sevanović, M., Bogdanović, S. i Basarić, I. (2017). Geotehnička kontrolna ispitivanja nasipa na lokaciji objekta robne kuće Ikea u Beogradu. Sedmo naučno-stručno međunarodno savetovanje: Geotehnički aspekti građevinarstva, Šabac, str. 229-236; ISBN 978-86-88897-10-5; COBIS.SR-ID 249512716; UDK:624.131.3
- Brandl H., Adam D., Kopf F., Niederbrucker R. (2003). Der dynamische Last-plattenversuch mit dem Leichten Fallgewichtsgesetz. Schriftenreihe Straßen-forschung der Österreichischen Forschungsgemeinschaft Straße und Verkehr (FSV) 533.

- Briaud, J. L. and Seo J. (2003). Intelligent Compaction. Overview and Research Needs. Texas A&M University.
- Brown, S.F. (1996). Soil Mechanics in Pavement Engineering. *Geotechnique*, 46(3), 383-426. doi: 10.1680/geot.1996.46.3.383
- Das, B.M. (2002). Principles of Geotechnical Engineering. 5th Edition, Brooks/Cole, Pacific Grove, California, 2002, pp. 268 - 311.
- De Graft-Johnson J.W.S. and Bhatia, H.S. (1969). The engineering characteristics of the lateritic gravels of Ghana. Proceedings of 7th international conference on soil mechanics and foundation engineering, Vol. 2, Mexico, pp. 13–43.
- Dementjev, L.F. (1980). Statističke metode obrade i analize geoloških podataka kod razrade ležišta. Prevod s ruskog, 190 str., INA-Naftaplin, Zagreb.
- Draper, N. R., Smith, H. (1998). Applied Regression Analysis, 3rd Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Einstein, H.H. & Baecher, G.B. (1982). Probabilistic and Statistical Methods in Engineering Geology I. Problem Statement and Introduction to Solution. *Rock Mechanics*, Suppl. 12, 47-61. Springer-Verlag, Wien, New York.
- Einstein, H.H. & Baecher, G.B. (1983). Probabilistic and Statistical Methods in Engineering Geology. Specific Methods and Examples. Part 1: Exploration. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 16, 39-72. Springer-Verlag.
- Elliott, A.C., Woodward, W.A. (2007). Statistical Analysis Quick Reference Guidebook. SAGE Publications, 1st Edition, ISBN-10: 1412925606.
- Floss, R. (1973). Bodenmechanische Gesichtspunkte bei der Auswahl und Dimensionierung von Straßenbefestigungen, Straße und Autobahn, Nr. 1, S. 17-26.
- Floss, R. (1997). ZTVE – StB 94, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau. Fassung 1997. Kommentar mit Kompendium Erd- und Felsbau, Bonn: Kirschbaum Verlag.
- Forsblad, L. (1980). Compaction meter on vibrating rollers for improved compaction control. Proceedings of the International Conference on Compaction, Vol. II, Paris, p. 541-546.
- Gonçalves, J. (2003). Possibilidade de Controlar o Processo Construtivo de Aterros com Recurso a DIP. Uma Experiência na Polónia, Portugal *Transport Research Bulletin*, no. 132, 12-25.
- Guedes de Melo, F. (1985). Compactação de aterros de barragens de terra. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.
- Handy, R. and Spangler, M. (2007). Geotechnical Engineering: Soil and Foundation Principles and Practice. 5th Edition, ISBN-13: 978-0071481205.
- Henzinger, C. and Vogt, S. (2019). Evaluation of the Dynamic CBR Test on Coarse-Grained Materials. *ASTM Geotechnical Testing Journal*, DOI: 10.1520/GTJ20180269.

- Higgins, J. (2005). The correlation coefficient, Chapter 2, In: Excerpted from the radical statistician.
- Hildebrand, G. (2003). Comparison of Various Types of Bearing Capacity Equipment, Nordic Road & Transport Research (2003), no. 3.
- Holtz, R. D., and Kovacs, W. D. (1981). An introduction to geotechnical engineering. Prentice-Hall, Inc., Englewoods Cliffs, New Jersey.
- Horvat K. & Škoro, B. (1982). Izbor geomehaničkih parametara pomoću metoda matematičke statistike. XV Sav. i skupština JDMTF, Ohrid, 1981, 113-119. Skopje.
- Huang, Y.H. (2004). Pavement Analysis and Design. 2nd Edition, University Kentucky, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ 07458.
- Katte, V., Ilalie, M.B., Moupe, S.M. and Ludovic, A.S. (2018). Correlation of California Bearing Ratio (CBR) Value with Soil Properties of Road Subgrade Soil. Geotechnical and Geological Engineering, DOI: 10.1007/s10706-018-0604-x.
- Kudla, W., Floss, R. und Trautmann, CH. (1991). Dynamischer Plattendruckversuch – Schnellprüfverfahren für die Qualitätssicherung von ungebundenen Schichten. Straße und Autobahn, Nr. 2, S. 66-71.
- Kuttah, D. (2019). Strong correlation between the laboratory dynamic CBR and the compaction characteristics of sandy soil. International Journal of Geo-Engineering, pp.10:7.
- Lehner, M. Binder, G., Peksaglam, C., (2012). Grundlagen der Bodenverdichtung. Wacker Neuson SE, München, 122 S.
- Lehmann, S. (2011). Untersuchungen zur Korrelation zwischen statischen und dynamischen Plattendruckversuchen. Thesis – Technische Universität, Darmstadt.
- Livneh, M. (1989). Validation of correlations between a number of penetration tests and in situ California bearing ratio tests. Transportation Research Record 1219: 56–67.
- Merkle, M.J. (2010). Verovatnoća i statistika - za inženjere i studente tehnike. Beograd: Akademska misao.
- Mohamed, A.E.M. (1986). Microstructure and swelling characteristics of an untreated and lime-treated compacted black cotton soil. Ph. D thesis. University of Strathclyde, Glasgow,
- National Cooperative Highway Research Program – NCHRP (2001). Appendix CC-1, Correlation of CBR Values with Soil Index Guide for Mechanistic and Empirical – Design for New and Rehabilitated Pavement Structures, Final Document. In: Properties. West University Avenue Champaign, Illinois.
- New Zealand Forest Owners Association, (2012). NZ Forest Road Engineering Manuel. ISBN 978-0-473-50661-2 PDF.
- Patel R.S., Desai M.D. (2010). CBR predicted by index properties for alluvial soils of South Gujarat. In: Proceedings of the Indian geotechnical conference, Mumbai, pp 79–82.
- Pejdić, Č. (2020). Skripta iz statistike, Obrazovni centar „Smart Basic“, Lomina 5, Beograd.

- Petersen, D.L. (2005). Continuous Compaction Control. MnRoad Demonstration Minnesota Department of Transportation, Report No.: MN/RC-2005-07.
- Petkovsek, A. (2007). Brief information on Slovenian experience and practice with Light weight fall Plate Bearing Tests. Summary report prepared after personal communication, Technical University of Ljubljana.
- Proctor, R. R. (1933). Fundamentals principles of soil compaction. Engineering News Record, Vol 3, pp. 245-248, pp. 286-289, pp. 348-351, pp. 372-376.
- Rahman, G.F. (2011). Assessment of soil compaction – A Project study. Galaxy (Dhaka): The Annual Technical Journal of MIST, ISSN: 2073-6444.
- Rodrigues, R.A., Del Castillo, H., Sowers, G.F. (1988). Soil mechanics in highway engineering. Trans Tech Publication, Clausthal-Zellerfeld.
- Roy, T.K. Chattopadhyay, B.C. & Roy, S.K. (2009). Prediction of CBR from Compaction Characteristics of Cohesive Soil. Highway Research Journal, July-Dec., 77-88.
- Samardaković, S., Šulović, G., Samardaković, M. (2009). Međusobne korelacije modula deformacije Evd-Ev1-Ms merenih optima kružnom pločom. Zbornik radova III naučno-stručnog savetovanja „Geotehnički aspekti građevinarstva“, Savez građevinskih inženjera Srbije i dr., Zlatibor, str. 97-102.
- Satyanarayana Reddy CNV, Pavani K. (2006). Mechanically stabilised soils-regression equation for CBR evaluation. In: Proceedings of the Indian geotechnical conference, Chen-nai, India, pp 731–734.
- Schervish, M. J. (1996). P Values: What They Are and What They Are Not. The American Statistician, American Statistical Association, 50 (3) 203-206.
- Schmidt, H.-H., and Volm, J. (2000). Der Dynamische CBR-Versuch – eine neue Qualitätskontrolle für den Erdbau. Geotechnik 23, no. 4: 271-275 (in German).
- Schroeder, W. L. (1975.). Soils in Construction. John Wilwy & Sons, Inc. New York
- Seed, H. B., and Chan, C. K. (1959). Structure and Strength Characteristis of Compacted Clays. Journal of the Soil Mechanincs and Foundations Division, ASCE, 85(5), 87–128.
- Seed, H. B., Mitchell, J. K., and Chan, C. (1960). The strength of compacted cohesive soils. Proc., Research Conf. on Shear Strength of Cohesive Soils, Vol. 2, ASCE, University of Colorado, Boulder, Co., 877-964.
- Seed, H. B. (1964). Lecture Notes, CE 271, Seepage and Earth Dam Design University of California at Berkeley, (by W.D. Kovacs, April 13).
- Selig, E.T., and Ladd, R.S. (1973). Evaluation of Relative Density and its Role in Geotechnical Projects Involving Cohesionless Soils. ASTM STP 523, American Society for Testing and Materials pp. 487-504, West Conshohoken, Pennsylvania.

- Singh, B., & Varshey, R. S. (1995). *Engineering for Embankments Dams*. Brookfield, VT, USA : A.A. Balkema, Rotterdam, ISBN 9789054102793.
- Stanković, M., (2021). Poboljšanje stenskih masa - deo 1.6. Zbijanje tla (Soil compaction) i 1.7. konsolidacija (sleganje) tla.
- Tadić, T. (2017). Aritmetička sredina i standardna devijacija. Poglavlje 69, 2017: 10-28. Podatci i uzorak. Poglavlje 67, 2016: 16-26.
- Tompai, Z., (2008). Conversion between static, dynamic load bearing capacity moduli, introduction of dynamic target values, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 52(2), pp. 97–102, <https://doi.org/10.3311/pp.ci.2008-2.06>.
- Turnbull, W. J. and Foster, C. R. (1956). Stabilization of Materials by Compaction. *J. Soil Mech. Found. Div.*, Vol. 82, No. SM2, pp. 1–23.
- Varghese G., Nageshwar Ch. Rao & Shiva R. (2009). PFWD, DCP and CBR correlations for evaluation of lateritic subgrades. *International journal of Pavement engineering*, 10:3, 189-199, Published by Taylor & Francis.
- Vaz, E., and Darke, B.C. 1970. Evaluation for CBR and pavement design testing based on field compaction conditions. *Proceedings of the Fifth Australian Road Research Board (ARRB) Conference held at Canberra, Victoria, Australia*.
- Venkatramaiah, C. (2006). *Geotechnical Engineering*. Revised 3rd Edition, New Age International Publishers, New Delhi.
- Vinod P, Reena C. (2008). Prediction of CBR value of lateritic soils using liquid limit and gradation characteristics data. *Highw Res J IRC* 1(1):89–98.
- Wehner, B., Siedek, P., Schulze, K.H. (1977). *Handbuch des Straßenbaus*, Band 2 und 3. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.
- Weingart, W., Hanebutt, J., and Rummert, W. (1990). Dynamic Laboratory and Field Testing Device for Determination of the CBR Value of Mineral Concrete. *Die Strasse*, Vol. 26, No. 2, pp. 48–51 (in German).
- Weingart, W. (1998). Einfluss der Natursand- und Brechsandanteils auf die Standfestigkeit von Tragschichtgemischen ohne Bindemittel. *Schriftenreihe des Lehrstuhls Straßenbau der Technischen Universität Dresden*, Heft 8, Kolloquium Prüfung und Bewertung von Konstruktionsschichten, S. 321-332
- White, D., Thompson, M. and Vennapusa, P. (2007). Field validation of intelligent compaction monitoring technology for unbound materials. *Partnership*, Iowa State University, Ames, vol. 515, p 12.
- Wyroslak, M. (2016). Establishing Relationships between Parameters of the Controlled Compaction Soil by Using Various In-Situ Tests. *OP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 245 (2017) 022041 doi:10.1088/1757-899X/245/2/022041

Zabielska-Adamska, K. and Sulewska, M. J. (2013). Dynamic CBR as a Method of Embankment Assessment. Proceedings of the 18th Inter-national Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, pp. 641–644.

Zabielska-Adamska, K., and Sulewska, M. J. (2015). Dynamic CBR-test to Assess the Soil Compaction. Journal of Testing and Evaluation 43, no. 5: 1028–1036.

ZORN INSTRUMENTS, (2016). Supplementary User Manual for the Dynamic Field CBR extension. Alemanha: Stendal, 9 p.

ZORN INSTRUMENTS, (2016). User Manual for the Light Weight Deflectometer (LWD) ZFG 3.0. Alemanha: Stendal, 27 p.

Zorn Stendal, (2007). Light Drop-Weight Tester ZFG-02., Operating Manual, Germany.

Zumrawi, M.M.E. (2000). Performance and design of expansive soils as road subgrade, Ph.D. thesis, Chang'an Univ., China.

Yildirim B, Gunaydin. O. (2011). Estimation of California bearing ratio by using soft computing systems. Expert Syst Appl 38(5): 6381–6391

Yoder, E.J. and Witczak, M.W. (1975). Principle of Pavement Design. 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York, Hoboken, 711 p. <http://dx.doi.org/10.1002/9780470172919>.

Spisak standarda, propisa i tehničkih specifikacija

AASHTO Internacional, (1991). M 145 Standard Specification for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes.

ASTM International, (2011). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes - Unified Soil Classification System (ASTM: D2487-11). ASTM International. www.astm.org.

ASTM International, (2015). Standard Test Method for Measuring Deflections using a Portable Impulse Plate Load Test Device (ASTM: E2835-11). ASTM International. www.astm.org.

DIN, Deutsches Institut für Normung (2011). E.V. Earthworks and Foundations—Soil Classification for Civil Engineering Purposes; DIN 18196. Deutsches Institut für Normung E.V.: Berlin, Germany.

DIN, Deutsches Institut für Normung (2012). DIN 18134:2012-07: Baugrund - Versuche und Versuchsgeräte - Plattendruckversuch. In: DIN, Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.) (2000): Handbuch der Bodenuntersuchung. Beuth Verlag, Berlin und Wiley-VCH Verlag, Weinheim.

FGSV. 2008. Bestimmung der Festigkeit – Dynamischer CBR-Versuch. TP Gestein-StB Teil B 5.6. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, Germany (in German).

SN 640 317 b, (1997). Dimensionierung, Untergrund und Unterbau. Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS), Zürich.

SRCS Tehnički uslovi za građenje puteva u Republici Srbiji, (2012). Posebni tehnički uslovi – 2.4 Kolovozne konstrukcije, Beograd.

SRCS Tehnički uslovi za građenje puteva u Republici Srbiji, (2012). Posebni tehnički uslovi – 2.2 Zemljani radovi, Beograd.

SRDM Priručnik za projektovanje puteva u Republici Srbiji, (2012). 8. Kosnstruktivni elementi puta - 8.2 Kolovozne konstrukcije, Beograd.

SRPS EN 13286-2, (2012/AC:2013). Nevezane i hidrauličkim vezivom vezane mešavine — Deo 2: Metode ispitivanja za laboratorijsku referentnu zapreminsku masu i sadržaj vode — Zbijanje po Proktoru. ISS, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd.

SRPS EN 13286-47, (2022). Nevezane i hidrauličkim vezivom vezane mešavine — Deo 47: Metode ispitivanja za određivanje kalifornijskog indeksa nosivosti, neposrednog indeksa nosivosti i linearnog bubrenja. ISS, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd.

SRPS EN ISO 14688-1, (2018). Geotehničko istraživanje i ispitivanje – Identifikacija i klasifikacija tla – Deo 1: Identifikacija i opis. ISS, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd.

SRPS EN ISO 14688-2, (2018). Geotehničko istraživanje i ispitivanje – Identifikacija i klasifikacija tla – Deo 2: Principi klasifikacije. ISS, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd.

SRPS EN ISO 17892-1, (2015). Geotehničko istraživanje i ispitivanje — Laboratorijsko ispitivanje tla — Deo 1: Određivanje vlažnosti. ISS, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd.

SRPS EN ISO 17892-2, (2015). Geotehničko istraživanje i ispitivanje — Laboratorijsko ispitivanje tla — Deo 2: Određivanje zapreminske mase. ISS, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd.

SRPS EN ISO 17892-4, (2017). Geotehničko istraživanje i ispitivanje – Laboratorijsko ispitivanje tla – Deo 4: Određivanje granulometrijskog sastava. ISS, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd.

SRPS EN ISO 17892-12, (2018). Geotehničko istraživanje i ispitivanje – Laboratorijsko ispitivanje tla – Deo 12: Određivanje tečenja i plastičnosti tla. ISS, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd.

SRPS EN 1097-5, (2009). Ispitivanje mehaničkih i fizičkih svojstava agregata - Deo 5: Određivanje sadržaja vode sušenjem u ventilisanoj sušnici. ISS, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd.

SRPS EN 1744-1, (2014). Ispitivanje hemijskih svojstava agregata — Deo 1: Hemijska analiza. ISS, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd.

SRPS EN 933-1, (2013). Ispitivanje geometrijskih svojstava agregata — Deo 1: Određivanje granulometrijskog sastava — Metoda prosejavanja. ISS, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd.

SRPS U.E1.010, (1981). Projektovanje i građenje puteva – Zemljani radovi na izgradnji puteva – Tehnički uslovi za izvršenje. ISS, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd.

SRPS U.B1.001, (1990). Geomehnička ispitivanja – Opšta klasifikacija tla. ISS, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd.

SRPS U.B1.002 - povučen, (1992). Geomehnička ispitivanja - Klasifikacija tla i mešavine tla i agregata za puteve. ISS, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd.

SRPS U.B1.012 - povučen, (1979). Geomehnička ispitivanja - Određivanje vlažnosti uzoraka. ISS, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd.

SRPS U.B1.013 - povučen, (1992). Geomehanička ispitivanja - Određivanje zapreminske mase materijala tla sa porama metodom sa cilindrom poznate zapremine. ISS, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd.

SRPS U.B1.015, (1992). Geomehanička ispitivanja – Određivanje zapreminske mase materijala tla sa porama metodom kalibrisanog peska. ISS, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd.

SRPS U.B1.018 - povučen, (2005). Geomehanička ispitivanja - Određivanje granulometrijskog sastava. ISS, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd.

SRPS U.B1.020 - povučen, (1980). Geomehanička ispitivanja - Određivanje konzistencije tla - Aterbergove granice. ISS, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd.

SRPS U.B1.038 - povučen, (1997). Geomehanička ispitivanja – Određivanje odnosa vlažnosti i suve zapreminske mase. ISS, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd.

SRPS U.B1.042 - povučen, (1997). Geomehanička ispitivanja – Laboratorijsko određivanje kalifornijskog indeksa nosivosti. ISS, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd.

SRPS U.B1.046, (1968). Geomehanička ispitivanja – Određivanje modula stišljivosti metodom kružne ploče. ISS, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd.

SRPS U.B1.047, (1997). Geomehanička ispitivanja – Određivanje modula deformacije pomoću opterećenja kružnom pločom. ISS, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd.

TP BF-StB Teil B 8.3. (2012). Dynamischer Plattendruckversuch mit Leichtem Fallgewichtsgesetz, Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau. Forschungsgesellschaft für Straßen - und Verkehrswesen, Köln.

TP BF-StB Teil B 7.1. (2012). Prüfverfahren zur Bestimmung des CBR-Wertes (California bearing ratio), Technische Prüfvorschriften Für Boden und Fels im Straßenbau, Forschungsgesellschaft für Straßen - und Verkehrswesen, Köln.

ZTV E-StB 09, Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau, Ausgabe 2009; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Köln

ZTVE-StB 09, (2009). German Earthworks and Foundation Engineering Task Force. Supplementary Technical Terms and Conditions of Contract and Guidelines for Earthworks in Road Construction.

ZTV A-StB 97, (1997). Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Aufgrabungen in Verkehrsflächen – 1997, München.

BIOGRAFIJA

Milan Bogdanović je rođen 16. juna 1980. godine u Beogradu, opština Zemun (Republika Srbija). Osnovnu školu završio je (1987-1995) u Ivanjici, Gimnaziju (1995-1999) u Beogradu.

Petogodišnje studije je završio školske 2004/2005. godine - Geološki odsek - smer za geotehniku Rudarsko-geološkog fakulteta, Univerziteta u Beogradu. 2012. godine odbranom magistarske teze je stekao zvanje magistra tehničkih nauka u oblasti geologije - mehanika tla i mehanika stena. Doktorske akademske studije upisao je školske 2016/2017 godine, na Rudarsko-geološkom fakultetu, Univerziteta u Beogradu, studijski program Geotehnika.

Od februara 2008. do maja 2015. godine bio je zaposlen u Geomag d.o.o., Beograd. Kao terenski inženjer – bavio je se terenskim geotehničkim i hidrogeološkim ispitivanjima za različite vrste objekata. Od maja 2015. godine zaposlen je u TPA za obezbeđenje kvaliteta i inovacije d.o.o., Beograd. U TPA je angažovan kao inženjer na kontroli kvaliteta geotehničkih terenskih i laboratorijskih ispitivanja za potrebe izgradnje puteva kao i pratećih geotehničkih objekata.

Stručni ispit, propisan Zakonom o rudarstvu i geološkim istraživanjima za diplomiranog inženjera geologije-geotehnike, položio je 2010. god. Član je Srpskog društva za mehaniku stena, Saveza inženjera i tehničara Srbije i Inženjerske komore Srbije. Posедуje projektantsku (391) i izvođačku (491) licencu. Učesnik je brojnih naučnih i stručnih skupova i seminara iz oblasti geotehničkog inženjerstva. Do sada je kao autor ili koautor objavio više naučnih i stručnih radova.

Pored naučnoistraživačkog rada, bavi se i stručnim radom u rešavanju različitih problema iz oblasti geotehničkog inženjerstva. Oženjen je Snežanom sa kojom ima ćerku Petru i sina Aleksu.

Изјава о ауторству

Потписани-а _____ Милан Р. Богдановић _____

број индекса _____ Г815/16 _____

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом:

Корелационе зависности параметара збијања и носивости доњих слојева саобраћајница

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, _____

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора: Милан Р. Богдановић

Број индекса: Г815/16

Студијски програм: Геотехника

Наслов рада: **Корелационе зависности параметара збијања и носивости доњих слојева саобраћајница**

Ментор: Проф. Др Драгослав Ракић, редовни професор
Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет, Београд

Потписани/а _____

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, _____

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Корелационе зависности параметара збијања и носивости доњих слојева саобраћајница

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство

2. Ауторство - некомерцијално

☒ 3. Ауторство – некомерцијално – без прераде

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима

5. Ауторство – без прераде

6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, _____

1. **Ауторство** - Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. **Ауторство - некомерцијално – без прераде.** Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. **Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. **Ауторство – без прераде.** Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. **Ауторство - делити под истим условима.** Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.