

UNIVERZITET U BEOGRADU
RUDARSKO GEOLOŠKI FAKULTET

Jovana M. Janković Pantić

**GEOTEHNIČKI EFEKTI RAZARANJA
KOMUNALNOG OTPADA RAZLIČITIM
POSTUPCIMA ZBIJANJA**

doktorska disertacija

Beograd, 2022.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MINING AND GEOLOGY

Jovana M. Janković Pantić

**GEOTECHNICAL EFFECTS OF MUNICIPAL
SOLID WASTE DESTRUCTION WITH
DIFFERENT COMPACTION METHODS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2022.

Jovana M. Janković Pantić

GEOTEHNIČKI EFEKTI RAZARANJA KOMUNALNOG OTPADA RAZLIČITIM POSTUPCIMA ZBIJANJA

Mentor:

Prof. dr Dragoslav Rakić, vanredni profesor

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

Članovi komisije:

Prof. dr Gordana Hadži- Niković, redovni profesor

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

Prof. dr Laslo Čaki, vanredni profesor

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

Dr Dušan Berisavljević, docent

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

Dr Nenad Šušić, naučni savetnik

Uža naučna oblast: Građevinska geotehnika
Institut za ispitivanje materijala- IMS

Datum odbrane:

ZAHVALNICA

Najveću zahvalnost dugujem svom mentoru, Prof. Dr Dragoslavu Rakiću za ukazano poverenje, nesebičnu pomoć i sve savete koji su ukazivali na pravilnosti i nepravilnosti u mom istraživačkom i stručnom radu. Posebno bih se zahvalila za mentorstvo koje ide mnogo dalje od ove doktorske disertacije, a ogleda se u svakodnevnoj saradnji i prijateljskoj atmosferi u protekloj deceniji.

Veliku zahvalnost izražavam članovima komisije: Prof. Dr Laslu Čakiju za nesebičnu podršku u periodu još dok je disertacija bila u idejnoj fazi. Na vremenu koje je posvetio tokom laboratorijskih istraživanja, kao i neizmernoj pomoći tokom izrade malja. Uz sve ovo, posebno se zahvaljujem na svim idejama i sugestijama na svakodnevnom nivou, kako za potrebe ovog rada, tako i za moje celokupno stručno usavršavanje; Prof. Dr Gordani Hadži- Niković na razumevanju, stručnim sugestijama, prelepoj energiji u svakom razgovoru i motivaciji koja je značajno doprinela da ovaj rad ugleda svetlo dana. Dr Dušanu Berisavljeviću na izdvojenom vremenu, prijateljskoj atmosferi i konstruktivnim savetima koji su učinili rad boljim. Dr Nenadu Šušiću na sugestijama i savetima tokom čitanja rada.

Ovim putem bih se zahvalila Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja koje je finansirajući projekat "Geotehnički aspekti istraživanja i razvoja savremenih tehnologija građenja i sanacija deponija komunalnog otpada" umnogome doprinelo doktorskoj disertaciji.

Zahvalnost dugujem firmama „Geoprojekt“ iz Podgorice i „Geobest“ iz Beograda na nesebičnoj podršci tokom izvođenja terenskih istraživanja.

Dragoj drugarici i kolegici Tini Đurić na безусловnoj podršci tokom laboratorijskih istraživanja i strpljenju za moja beskrajna premišljanja u kojima je bila odličan sagovornik. Dragim kolegicama Snežani Bogdanović i Ireni Basarić Ikodinović na korisnim smernicama, lepoj atmosferi i saradnji tokom proteklih godina.

Veliku zahvalnost dugujem svojim prijateljima koji su uvek tu za mene, da me ohrabre u idejama i motivišu da uvek idem korak dalje, ali i da „zasuku rukave“ kad je potrebna pomoć oko „fizikalije“ za pripremu laboratorijskih uzoraka.

Na kraju, najveću zahvalnost dugujem svojoj porodici, suprugu Aleksandru, mami, tati, seki i Branki. Bez vaše ljubavi, безусловne podrške i razumevanja izrada ovog rada ne bi bila moguća. Zahvalna sam i na mom neiscrpnom izvoru energije, mojim sestričinama, Sofiji, Leni i Sari. Hvala vam što postojite.

Doktorsku disertaciju posvećujem mojoj seki Jeleni koja je oduvek najveća podrška koju imam.

GEOTEHNIČKI EFEKTI RAZARANJA KOMUNALNOG OTPADA RAZLIČITIM POSTUPCIMA ZBIJANJA

Rezime

Odlaganje otpada na komunalne deponije predstavlja osnovni način zbrinjavanja otpada u Srbiji. Kako bi se prostor za deponovanje materijala racionalno koristio potrebno ga je svakodnevno zbijati sa unapred definisanom količinom vode koja se dodaje. Dobro zbijeni komunalni otpad zauzima manju zapreminu i omogućuje sigurnije skladištenje, pa je korisno prethodno laboratorijski odrediti parametre zbijanja: maksimalnu suhu zapreminsku težinu (γ_{dmax}) i optimalnu vlažnost (w_{opt}). U Srbiji do sada nisu određivani parametri zbijanja, dok je u svetu primenjivana standardna metoda (Proktorov opit) koja se koristi u mehanici tla. Međutim, iako je ova metodologija usvojena, različiti tretmani komunalnog otpada na samoj deponiji ukazuju na potrebu za promenom ovog klasičnog pristupa.

U doktorskoj disertaciji je prikazan nov pristup tokom izvođenja Proktorovog opita i to promenom klasičnog ravnog Proktorovog malja, dodavanjem šiljaka, čija je funkcija pored zbijanja, delimično razaranje i usitnjavanje komunalnog otpada. Na ovaj način se simulira rad kompaktora (ježeva) na terenu.

Laboratorijska ispitivanja su vršena na veštački formiranim uzorcima komunalnog otpada sa dve deponije u Srbiji (Ada Huja i Plandište). Formirano je ukupno 14 uzoraka u sedam različitih sastava. Za svaki unapred definisan sastav rađeno je zbijanje u Proktorovom kalupu klasičnim ravnim i maljem sa šiljcima. Kako bi se odredio efekat razaranja, pre i nakon izvođenja Proktorovih opita određen je granulometrijski sastav.

Interpretacijom i analizom laboratorijskih ispitivanja, izvedeno je nekoliko zaključaka. Uzorci koji su zbijani Proktorovim opitom sa inovativnim maljem sa šiljcima su dali više maksimalne suve zapreminske težine u odnosu na one koji su zbijani ravnim maljem, uz smanjenje optimalne vlažnosti na većini uzoraka. Razaranje komunalnog otpada zbijanjem sa dve vrste malja (definisano granulometrijskim sastavom) određeno je kvantativno koeficijentom razaranja (Δr). Naime, analizom ovog koeficijenta dolazi se do zaključka da malj sa šiljcima daje bolji efekat razaranja u odnosu na ravan malj. Pored toga, uzorci sa većim sadržajem veštačkih komponenti skloniji su razaranju u odnosu na one sa više sadržaja zemljaste frakcije.

S obzirom na količinu otpada koja se odlaže na deponije u Srbiji, inovativni pristup laboratorijskom određivanju parametara zbijanja komunalnog otpada bi dao značajan praktičan doprinos u upravljanju otpadom.

Ključne reči: komunalna deponija, zbijanje, Proktorov opit, malj sa šiljcima, koeficijent razaranja

Naučna oblast: Geološko inženjerstvo

Uža naučna oblast: Inženjerska geologija, geomehanika i geotehničko inženjerstvo

UDK: 624.131.53:628.472.3(043.3)

GEOTECHNICAL EFFECTS OF MUNICIPAL SOLID WASTE DESTRUCTION WITH DIFFERENT COMPACTION METHODS

Abstract

Disposal of waste at municipal landfills is the basic way of disposal of waste in Serbia. To rationally use the space for depositing materials, it is necessary to compact it daily with a pre-defined amount of water that is added. Well-compacted municipal waste occupies a smaller volume and enables safe storage, so it is useful to determine the compaction parameter in advance in the laboratory: maximum dry unit weight (γ_{dmax}) and optimum moisture contents (w_{opt}). Compaction parameters have not been determined in Serbia until now, while in the world the standard method (Proctor compaction test) used in soil mechanics has been applied. However, although this methodology has been adopted, the different treatments of municipal waste at the landfill point to the need to change this classic approach.

In the doctoral dissertation, a new approach was presented during the performance of Proctor's test, by changing the classic Proctor's hammer, by adding spikes, which function, beside the compaction, is partial destruction of municipal waste. In this way, the work of the compactor is simulated in the landfill.

Laboratory tests were performed on artificially formed samples of communal waste from two landfills in Serbia (Ada Huja and Plandište). A total of 14 samples were formed in seven different compositions. For each predefined composition, compaction of samples was done in a Proctor mold with classic hammer and hammer with a spikes. To define the destruction effects, the granulometric composition was determined before and after the Proctor tests.

Through the interpretation and analysis of laboratory tests, several conclusions were drawn. Samples compacted by Proctor's test with the innovative hammer with spikes showed higher maximum dry unit weights than those compacted with a classic hammer, with a decrease in optimum moisture content for the most samples. The destruction of municipal waste by compaction using two types of hammers (defined by the granulometric composition) is determined quantitatively by the coefficient of destruction (Δr). Hence, the analysis of this coefficient leads to the conclusion that a hammer with spikes gives a better destruction effect compared to a classic hammer. In addition, samples with a higher content of artificial components are more prone to destruction than those with a higher content of the earthy fraction.

Considering the amount of waste that is deposited in landfills in Serbia an innovative approach to the laboratory determination of municipal waste compaction parameters would make a significant practical contribution to waste management.

Keywords: municipal waste landfill, compaction, Proctor compaction test, hammer with spikes, coefficient of destruction

Scientific field: Geological engineering

Scientific subfield: Engineering geology, geomechanics and geotechnical engineering

UDK: 624.131.53:628.472.3(043.3)

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1. Definisane problema	2
1.2. Ciljevi i zadaci istraživanja	2
1.3. Metode ispitivanja.....	4
1.4. Organizacija doktorske disertacije	4
2. PREGLED LITERATURE O ZBIJANJU KOMUNALNOG OTPADA.....	6
2.1. Opšte o zbijanju komunalnog otpada	6
2.2. Literaturni podaci vezani za laboratorijska ispitivanja.....	8
2.2.1. Rezultati dobijeni standardnim Proktorovim opitom.....	9
2.2.2. Rezultati dobijeni modifikovanim Proktorovim opitom.....	18
2.2.3. Rezultati dobijeni nestandardnim metodama ispitivanja	25
2.3. Literaturni podaci vezani za terenska ispitivanja otpada.....	29
3. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA ZBIJANJA KOMUNALNOG OTPADA.....	36
3.1. Određivanje fizičkih karakteristika komunalnog otpada.....	36
3.2. Određivanje parametara zbijanja konvencionalnim laboratorijskim metodama	38
3.3. Predlog novog pristupa ispitivanja parametara zbijanja komunalnog otpada	40
4. PROGRAM LABORATORIJSKIH ISPITIVANJA.....	43
4.1. Definisane sastava	43
4.2. Formiranje i priprema uzoraka za laboratorijska ispitivanja.....	47
4.3. Postupak ispitivanja.....	49
5. PRIKAZ REZULTATA ISPITIVANJA.....	50
5.1. Prikaz fizičkih karakteristika uzoraka	50
5.2. Rezultati ispitivanja granulometrijskog sastava	54
5.2.1. Deponija Ada Huja.....	54
5.2.2. Deponija Plandište	58

5.3.	Rezultati ispitivanja dobijeni Proktorovim opitom	64
5.3.1.	Deponija Ada Huja.....	64
5.3.2.	Deponija Plandište	69
6.	ANALIZA REZULTATA LABORATORIJSKIH ISPITIVANJA	76
6.1.	Analiza rezultata - deponija Ada Huja	76
6.2.	Analiza rezultata- deponija Plandište	81
6.3.	Međusobno poređenje dobijenih rezultata	86
6.4.	Uticaj nestandardne opreme na tlo	89
7.	POREĐENJE REZULTATA DOBIJENIH LABORATORIJSKIM ISPITIVANJIMA SA LITERATUROM.....	91
8.	ZAKLJUČAK I PREDLOG DALJIH ISTRAŽIVANJA	94
8.1.	Zaključna razmatranja	94
8.2.	Preporuka za dalja istraživanja.....	96
	LITERATURA.....	97

POPIS SLIKA

Slika 1.1: Primer propisno zatvorene deponije komunalnog otpada (www.waste360.com)	1
Slika 1.2: Primer zbijenog i nezbijenog otpada na komunalnoj deponiji (Wong, 2009).....	3
Slika 2.1:Kompaktor za razastiranje i zbijanje komunalnog otpada (www.hawthornecat.com).....	6
Slika 2.2: Uticaj zbijanja na mobilisani ugao unutrašnjeg trenja komunalnog otpada (Manassero i sar., 1997).....	7
Slika 2.3: Funkcionalana zavisnost između γ_d i w za tlo i otpad (Hanson i sar., 2010).....	8
Slika 2.4: Sastav starog komunalnog otpada (Gabr i Valero, 1995).....	9
Slika 2.5: Sastav komunalnog otpada (Hettiarachchi, 2005).....	10
Slika 2.6: Prikaz rezultata Standardnog Proktorovog opita (Hettiarachchi, 2005).....	10
Slika 2.7: Sastav nezapaljivog otpada (Itoh i sar., 2006).....	11
Slika 2.8: Prikaz rezultata Standardnog Proktorovog opita (Itoh i sar., 2006)	11
Slika 2.9: Sastav komunalnog otpada na deponiji Orchard Hills (Reddy i sar., 2009).....	12
Slika 2.10: Rezultati Standardnog Proktorovog opita na svežem komunalnom otpadu (Reddy i sar., 2009)	12
Slika 2.11: Sastav starog komunalnog otpada (Hyun i sar., 2011)	13
Slika 2.12: Rezultati standardnog Proktorovog opita (Hyun i sar., 2011)	13
Slika 2.13: Sastav komunalnog otpada SAD, EU i TR (Pulat i Aksoy, 2013)	14
Slika 2.14: Standardni Proktorov opit: SAD, EU i TR (Pulat i Aksoy, 2013).....	14
Slika 2.15: Rezultati Standardnog Proktorovog opita (Naveen, 2017).....	15
Slika 2.16: Sastav otpada prema starosti (Endaiti i Patil, 2020).....	16
Slika 2.17: Rezultati Proktorovog opita pri energiji zbijanja $E=552 \text{ kJ/m}^3$ (Endaiti i Patil, 2020) ...	16
Slika 2.18: Prikaz rezultata Proktorovog opita (Itoh i sar., 2006)	18
Slika 2.19: Sastav otpada (Wong, 2009).....	19
Slika 2.20: Rezultati modifikovanog Proktorovog opita (a- Wong, 2009; b- Hanson i sar., 2010) ..	19
Slika 2.21: Prikaz rezultata modifikovanog Proktorovog opita (Pulat i Yukselen-Aksoy, 2013)	20

Slika 2.22: Rezultati modifikovanog Proktorovog opita za uzorke izložene spoljnim uslovima (Pulat i Yukselen-Aksoy, 2013)	21
Slika 2.23: Prikaz rezultata modifikovanog Proktorovog opita za svež i komunalni otpad starosti 3-4 godine (Pulat i Yukselen-Aksoy, 2013)	22
Slika 2.24: Rezultati Proktorovog opita pri energiji zbijanja $E=2682 \text{ kJ/m}^3$ (Endait i Patil, 2020) ...	22
Slika 2.25: Prikaz rezultata modifikovanog Proktorovog opita (Okonta i sar., 2018).....	23
Slika 2.26: Rezultati Proktorovog opita (Wong, 2009)	25
Slika 2.27: Rezultati Proktorovog opita (Hanson i sar., 2010)	26
Slika 2.28: Rezultati Proktorovog opita pri energiji zbijanja $E=1125 \text{ kJ/m}^3$ (Endait i Patil, 2020) ..	26
Slika 2.29: Rezultati Proktorovog opita pri energiji zbijanja $E=5364 \text{ kJ/m}^3$ (Endait i Patil, 2020) ...	27
Slika 2.30: Uticaj broja udaraca (promene energije) na suhu zapreminsku težinu (Okonta i sar., 2018)	27
Slika 2.31: Prikaz odlaganja komunalnog otpada na probno polje, dodavanje vode i zbijanje.....	30
Slika 2.32: Rezultati terenskog istraživanja komunalnog otpada (Hanson i sar., 2010).....	32
Slika 2.33: Provlažavanje otpada: a) probno polje i b) aktivna deponija (Cox i sar., 2015)	33
Slika 2.34: Grafički prikaz parametara zbijanja na probnom polju (Cox i sar., 2013).....	33
Slika 2.35: Grafički prikaz parametara zbijanja na aktivnoj deponiji (Cox i sar., 2015)	34
Slika 3.1: Promena zapreminske težine otpada različite zbijenosti u odnosu na dubinu (Zekkos i sar., 2006).....	37
Slika 3.2: Proktorovi dijagrami za različite energije zbijanja	39
Slika 3.3: Skica inovativne opreme za Proktorov opit (standardni ravni malj i malj sa šiljcima).....	41
Slika 3.4: Oprema korišćena za izvođenje Proktorovog opita (Proktorov kalup, klasičan i malj sa šiljcima).....	42
Slika 4.1: Sastav otpada u Srbiji (podaci iz studije: Utvrđivanje sastava otpada i procene količine u cilju definisanja strategije upravljanja sekundarnim sirovinama u sklopu održivog razvoja Republike Srbije; Departman za inženjerstvo zaštite Životne sredine, Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu, 2009)	43
Slika 4.2: Sastav komunalnog otpada sa deponije Ada Huja, Beograd (Rakić, 2013)	44
Slika 4.3: Uzimanje uzoraka istražnim bušenjem na deponiji u Plandištu	45
Slika 4.4: Postupak a) sušenja i b) razvrstavanja otpada	45

Slika 4.5: Sastav komunalnog otpada sa deponije Plandište	46
Slika 4.6: Zbirni prikaz sastava sa deponije Plandište i Ada Huja	46
Slika 4.7: Izdvojene komponente sa deponije Ada Huja	47
Slika 4.8: Sastav komunalnog otpada koji je korišćen za formiranje uzoraka sa deponije Ada Huja	48
Slika 4.9: Sastav komunalnog otpada koji je korišćen za formiranje uzoraka sa deponije Plandište	48
Slika 4.10: Izgled materijala tokom provlažavanja.....	49
Slika 5.1: Automatizovani piknometar AccuPyc 1330 (www.spwindustrial.com)	51
Slika 5.2: Prikaz komponenti korišćenih za formiranje uzoraka pri određivanju specifične težine ..	51
Slika 5.3: Laboratorijski određene vrednosti specifične težine u zavisnosti od masenog sastava komunalnog otpada (D. Rakić i sar.,2020)	52
Slika 5.4: Dijagram zavisnosti maksimalne suve zapreminske težine i koeficijenta poroznosti	52
Slika 5.5: Ostatak komunalnog otpada na sitima različitih veličina otvora (mm) za uzorak U-3	53
Slika 5.6: Granulometrijske krive i krive zastupljenosti za uzorak U-1a pre i nakon izvođenja standardnog Proktorovog opita klasičnim ravnim maljem	54
Slika 5.7: Granulometrijske krive i krive zastupljenosti za uzorak U-1b pre i nakon izvođenja standardnog Proktorovog opita maljem sa šiljcima	55
Slika 5.8: Granulometrijske krive i krive zastupljenosti za uzorak U-6a pre i nakon izvođenja standardnog Proktorovog opita klasičnim ravnim maljem	56
Slika 5.9: Granulometrijske krive i krive zastupljenosti za uzorak U-6b pre i nakon izvođenja standardnog Proktorovog opita maljem sa šiljcima	56
Slika 5.10: Granulometrijske krive i krive zastupljenosti za uzorak U-7a pre i nakon izvođenja standardnog Proktorovog opita klasičnim ravnim maljem	57
Slika 5.11: Granulometrijske krive i krive zastupljenosti za uzorak U-7b pre i nakon izvođenja standardnog Proktorovog opita maljem sa šiljcima	57
Slika 5.12: Granulometrijske krive i krive zastupljenosti za uzorak U-2a pre i nakon izvođenja standardnog Proktorovog opita klasičnim ravnim maljem	58
Slika 5.13: Granulometrijske krive i krive zastupljenosti za uzorak U-2b pre i nakon izvođenja standardnog Proktorovog opita maljem sa šiljcima	59
Slika 5.14: Granulometrijske krive i krive zastupljenosti za uzorak U-3a pre i nakon izvođenja standardnog Proktorovog opita klasičnim ravnim maljem	60

Slika 5.15: Granulometrijske krive i krive zastupljenosti za uzorak U-3b pre i nakon izvođenja standardnog Proktorovog opita maljem sa šiljcima	60
Slika 5.16: Granulometrijske krive i krive zastupljenosti za uzorak U-4a pre i nakon izvođenja standardnog Proktorovog opita klasičnim ravnim maljem	61
Slika 5.17: Granulometrijske krive i krive zastupljenosti za uzorak U-4b pre i nakon izvođenja standardnog Proktorovog opita maljem sa šiljcima	62
Slika 5.18: Granulometrijske krive i krive zastupljenosti za uzorak U-5a pre i nakon izvođenja standardnog Proktorovog opita klasičnim ravnim maljem	63
Slika 5.19: Granulometrijske krive i krive zastupljenosti za uzorak U-5b pre i nakon izvođenja standardnog Proktorovog opita maljem sa šiljcima	63
Slika 5.20: Rezultati Proktorovog opita sa klasičnim ravnim maljem za uzorak U-1a	64
Slika 5.21: Rezultati Proktorovog opita sa maljem sa šiljcima za uzorak U-1b.....	65
Slika 5.22: Uporedni prikaz rezultata Proktorovog opita za uzorak U-1a i U-1b (klasičan i malj sa šiljcima).....	65
Slika 5.23: Rezultati Proktorovog opita sa klasičnim ravnim maljem za uzorak U-6a	66
Slika 5.24: Rezultati Proktorovog opita sa maljem sa šiljcima za uzorak U-6b.....	66
Slika 5.25: Uporedni prikaz rezultata Proktorovog opita za uzorak U-6a i U-6b (klasičan i malj sa šiljcima).....	67
Slika 5.26: Rezultati Proktorovog opita sa klasičnim ravnim maljem za uzorak U-7a	67
Slika 5.27: Rezultati Proktorovog opita sa maljem sa šiljcima za uzorak U-7b.....	68
Slika 5.28: Uporedni prikaz rezultata Proktorovog opita za uzorak U-7a i U-7b (klasičan i malj sa šiljcima).....	68
Slika 5.29: Rezultati Proktorovog opita sa klasičnim ravnim maljem za uzorak U-2a	69
Slika 5.30: Rezultati Proktorovog opita sa maljem sa šiljcima za uzorak U-2b.....	70
Slika 5.31: Uporedni prikaz rezultata Proktorovog opita za uzorak U-2a i U-2b (klasičan i malj sa šiljcima).....	70
Slika 5.32: Rezultati Proktorovog opita sa klasičnim ravnim maljem za uzorak U-3a	71
Slika 5.33: Rezultati Proktorovog opita sa maljem sa šiljcima za uzorak U-3b.....	71
Slika 5.34: Uporedni prikaz rezultata Proktorovog opita za uzorak U-3a i U-3b (klasičan i malj sa šiljcima).....	72
Slika 5.35: Rezultati Proktorovog opita sa klasičnim ravnim maljem za uzorak U-4a	73

Slika 5.36: Rezultati Proktorovog opita sa maljem sa šiljcima za uzorak U-4b.....	73
Slika 5.37: Uporedni prikaz rezultata Proktorovog opita za uzorak U-4a i U-4b (klasičan i malj sa šiljcima).....	74
Slika 5.38: Rezultati Proktorovog opita sa klasičnim maljem za uzorak U-5a.....	74
Slika 5.39: Rezultati Proktorovog opita sa maljem sa šiljcima za uzorak U-5b.....	75
Slika 5.40: Uporedni prikaz rezultata Proktorovog opita za uzorak U-5a i U-5b (klasičan i malj sa šiljcima).....	75
Slika 6.1: Rezultati Proktorovog opita (klasičan i malj sa šiljcima) na uzorcima komunalnog otpada sa deponije Ada Huja	76
Slika 6.2: Kumulativne krive za uzorak U-1a i U-1b	77
Slika 6.3: Promena koeficijenta razaranja za uzorke U-1a i U-1b.....	78
Slika 6.4: Kumulativne krive za uzorak U-7a i U-7b	79
Slika 6.5: Prikaz promene koeficijenta razaranja za uzorak U-7	79
Slika 6.6: Kumulativne krive za uzorak U-7a i U-7b	80
Slika 6.7: Prikaz promene koeficijenta razaranja za uzorak U-6.....	80
Slika 6.8: Rezultati Proktorovog opita (klasičan i malj sa šiljcima) na uzorcima komunalnog otpada sa deponije Plandište.....	81
Slika 6.9: Kumulativne krive za uzorak U-2a i U-2b	82
Slika 6.10: Prikaz promene koeficijenta razaranja za uzorak U-2.....	83
Slika 6.11: Kumulativne krive za uzorak U-3a i U-3b	83
Slika 6.12: Prikaz promene koeficijenta razaranja za uzorak U-3	84
Slika 6.13: Kumulativne krive za uzorak U-4a i U-4b	84
Slika 6.14: Prikaz promene koeficijenta razaranja za uzorak U-4.....	85
Slika 6.15: Kumulativne krive za uzorak U-5a i U-5b	85
Slika 6.16: Prikaz promene koeficijenta razaranja za uzorak U-5	86
Slika 6.17: Prikaz rezultata standardnog Proktorovog opita (klasičan i malj sa šiljcima).....	88
Slika 6.18: Izgled uzoraka komunalnog otpada nakon što su izvađeni iz Proktorovog kalupa	89
Slika 6.19: Prikaz rezultata ispitivanja za uzorak lesa (klasičan ravan i malj sa šiljcima)	90

Slika 7.1: Parametri zbijanja dobijeni standardnim Proktorovim opitom (energija zbijanja oko 600 kJ/m ³) iz literature.....	91
Slika 7.2: Šematski prikaz parametara zbijanja komunalnog otpada dobijenih standardnim Proktorovim opitom.....	92
Slika 7.3: Zbirni prikaz parametara zbijanja komunalnog otpada	92

POPIS TABELA

Tabela 2.1: Rezultati Proktorovog opita pri energiji zbijanja $E=552 \text{ kJ/m}^3$ (Endaiti i Patil, 2020) ..	16
Tabela 2.2: Parametri zbijanja komunalnog otpada dobijeni standardnim Proktorovim opitom	17
Tabela 2.3: Promene rezultata zbijanja u odnosu na vrstu opita (Pulat i Yukselen-Aksoy, 2013)....	21
Tabela 2.4: Rezultati standardnog i modifikovanog Proktorovog opita (Endaiti i Patil, 2020)	23
Tabela 2.5: Pregled rezultata modifikovanog Proktorovog opita (Okonta i sar., 2018).....	24
Tabela 2.6: Parametri zbijanja komunalnog otpada dobijeni modifikovanim Proktorovim opitom .	24
Tabela 2.7: Parametri zbijanja komunalnog otpada dobijeni nestandardnim energijama zbijanja....	28
Tabela 2.8: Prikaz parametara zbijanja dobijenih na terenu (Hanson i sar., 2010)	31
Tabela 2.9: Prikaz parametara zbijanja dobijenih na probnom polju (Cox i sar., 2015)	34
Tabela 2.10: Prikaz parametara zbijanja dobijenih na aktivnoj deponiji (Cox i sar., 2015).....	34
Tabela 2.11: Finansijska analiza sistemskog povećavanja vlažnosti tokom zbijanja komunalnog otpada (Cox i sar., 2015).....	35
Tabela 3.1: Zapreminske težine svežeg otpada u zavisnosti od zbijenosti (Fassett i sar., 1994).....	36
Tabela 5.1: Prikaz uticaja zbijanja na frakcije različitih dimenzija za uzorke U-1a i U-1b	55
Tabela 5.2: Prikaz uticaja zbijanja na frakcije različitih dimenzija za uzorke U-6a i U-6b	56
Tabela 5.3: Prikaz uticaja zbijanja na frakcije različitih dimenzija za uzorke U-7a i U-7b	58
Tabela 5.4: Prikaz uticaja zbijanja na frakcije različitih dimenzija za uzorke U-2a i U-2b	59
Tabela 5.5: Prikaz uticaja zbijanja na frakcije različitih dimenzija za uzorke U-3a i U-3b	61
Tabela 5.6: Prikaz uticaja zbijanja na frakcije različitih dimenzija za uzorke U-4a i U-4b	62
Tabela 5.7: Prikaz uticaja zbijanja na frakcije različitih dimenzija za uzorke U-5a i U-5b	63

1. UVOD

Uprkos brojnim aktivnostima u svetu koje su preduzete radi smanjenja stvaranja komunalnog otpada, njegove količine na godišnjem nivou i dalje rastu. Komunalni otpad jeste otpad iz domaćinstva (kućni otpad), kao i drugi otpad koji je zbog svoje prirode ili sastava sličan otpadu iz domaćinstva („*Zakon o upravljanju otpadom*“, *SL glasnik RS, br. 95/2018*). U Srbiji je odlaganje komunalnog otpada na deponije osnovni metod zbrinjavanja otpada. Deponija je mesto za konačno sanitarno odlaganje otpada na površini ili ispod površine zemlje („*Zakon o upravljanju otpadom*“, *SL glasnik RS, br. 95/2018*). Iako se prema hijerarhiji otpada odlaganje na deponije smatra najnepovoljnijim rešenjem, ni on kao takav nije u potpunosti ispoštovan. Čest je slučaj da zvanične komunalne deponije ne ispunjavaju osnovne sanitarne uslove. U Srbiji se skuplja oko 85% komunalnog otpada, dok ostatak završi na divljim deponijama (smetilištima) koje su često uz obale reka što je sa ekološkog aspekta neprihvatljivo. Neadekvatan stav društva prema otpadu je jedan od najvećih problema sa aspekta zaštite životne sredine. S obzirom na prethodno navedene činjenice, ali i na zakonsku regulativu koju nameće Evropska Unija neophodno je sa velikom pažnjom prići ovom problemu. Na Slici 1.1 dat je primer propisno zatvorene deponije komunalnog otpada.



Slika 1.1: Primer propisno zatvorene deponije komunalnog otpada (www.waste360.com)

Upravljanje otpadom u Srbiji je poslednjih godina uglavnom sprovedeno kroz nešto savremenije regionalne deponije koje zadovoljavaju potrebe više opština (gradova). Sastavni deo regionalnih deponija čine transfer stanice. Transfer stanice predstavljaju mesto do kojeg se otpad doprema i privremeno skladišti radi razdvajanja ili pretovara pre transporta na tretman ili odlaganje na komunalne deponije. Najčešći vid tretmana otpada u Srbiji je reciklaža. Međutim, ona se primenjuje u malom procentu, svega do 10% u odnosu na ukupnu količinu proizvedenog otpada. Sve ovo ukazuje na tendenciju ka organizovanijem rešavanju trenutne situacije, ali uz činjenicu da su savremeni načini tretiranja otpada (koji se već decenijama koriste u svetu) još uvek u bližoj budućnosti. U toku prilagođavanja društva i države ka ekonomski isplativijem načinu korišćenja i zbrinjavanja komunalnog otpada (sprečavanje nastanka, smanjivanje količina, ponovne upotrebe, veći procenat reciklaže i sl.), očekuje se još dugogodišnje odlaganje na komunalne deponije. Upravo iz ovih razloga, sužen izbor lokacija dovodi do potrebe za maksimalnom iskorišćenošću postojećih, ali i izgradnju novih deponija komunalnog otpada. Pored ovoga, neophodno je rekultivisati postojeća smetilišta, kao i deponije na kojima nisu ispoštovani ekološki kriterijumi. Zbog svega navedenog, deponije komunalnog otpada će i dalje biti tema prisutna u stručnoj i naučnoj zajednici.

1.1. Definisane problema

S obzirom na heterogenost sastava i veličine komponenti, svaki od procesa odlaganja na deponije mora se posebno pripremati i pratiti. U osnovne procese odlaganja uključeno je nekoliko faza: prikupljanje, istovar, razastiranje sa zbijanjem i na kraju prekrivanje. Zbijanje predstavlja jednu od osnovnih faza zbrinjavanja otpada. Paralelno sa njim, menjaju se fizičko- mehaničke karakteristike otpada (čvrstoća na smicanje, deformabilnost, vodopropustljivost, promena faznog sastava itd.). Ukoliko bi se komunalni otpad zbijao sa optimalnim sadržajem vode, to bi rezultiralo povećanjem obradivosti, poboljšanju uslova zbijanja, promenom zapreminske težine i količine otpada koje bi bilo moguće odložiti. Prednost zbijanja uz optimalni sadržaj vode dovelo bi i do smanjenja vremena koje je neophodno da bi se postiglo maksimalno zbijanje. Međutim, bez obzira na ovu činjenicu, zbijanje komunalnog otpada uz optimalne uslove još uvek nije zastupljeno, kako kod nas, tako ni u svetu.

Kako bi se maksimalno iskoristio kapacitet deponije, neophodno je prethodno laboratorijski odrediti maksimalnu suhu zapreminski težinu (γ_{dmax}) i optimalnu vlažnost (w_{opt}). U dosadašnjoj (dosta retkoj) praksi za to je korišćen konvencionalni Proktorov opit (standardni i modifikovan), uz eventualnu promenu energije zbijanja. Međutim, uprkos tome što je teorija mehanike tla u razumnoj meri primenjiva na otpad, ne mogu se ignorisati različiti načini zbijanja na deponijama komunalnog otpada u odnosu na zemljane nasipe. Za zbijanje komunalnog otpada na deponijama koriste se dosta teži kompaktori koji prenose znatno veću energiju. Pored toga, na njima se nalaze šiljci koji prilikom prelaska preko komunalnog otpada vrše usitnjavanje i razaranje strukture. Ovakvi kompaktori se nazivaju „ježevi“.

Uticao težine kompaktora koji se koriste na deponijama „diktiraju“ povećanje energije zbijanja u laboratorijskim uslovima, što su u okviru nekoliko studija analizirali i pojedini autori (*Wong, 2009; Hanson i sar., 2010; Endait i Patil, 2020*). Međutim, efekat ježeva koji vrše destrukciju i razaranje komunalnog otpada nikada nisu uzeti u obzir prilikom analize u laboratorijskim uslovima. To je jedan od osnovnih razloga što su, prilikom istraživanja za ovaj rad, uvedena i određena inovativna rešenja. Ona se odnose na promenu klasičnog ravnog Proktorovog malja, dodavanjem šiljaka, čija je funkcija da pored zbijanja vrši razaranje i usitnjavanje komunalnog otpada. Na ovaj način omogućeno je da se uzme u obzir uticaj šiljaka kompaktora (ježeva) i efekta razaranja na zbijanje komunalnog otpada u laboratorijskim uslovima.

1.2. Ciljevi i zadaci istraživanja

Zbijanje komunalnog otpada predstavlja jedan od ekonomski najracionalnijih načina tretiranja komunalnog otpada na deponijama. Upravo iz tog razloga potrebno ga je pažljivo sprovoditi s obzirom na uticaj velikog broja faktora. Međutim, u Srbiji je čest slučaj da se komunalni otpad na deponijama ne zbija, a i kada se izvodi zbijanje to nije na odgovarajući način.

U okviru disertacije analiziraju se uslovi zbijanja korišćenjem standardne ali i modifikovane Proktorove opreme, kako bi se naučnim i stručnim pristupom došlo do novih saznanja. Na Slici 1.2 dat je primer zbijenog i nezbijenog otpada na komunalnoj deponiji.



Slika 1.2: Primer zbijenog i nezbijenog otpada na komunalnoj deponiji (Wong, 2009)

S obzirom da u Srbiji do sada nisu istraživani parametri zbijanja komunalnog otpada, bilo u laboratorijskim ili terenskim uslovima, jedan od ciljeva doktorske disertacije je laboratorijsko definisanje prethodno pomenutih parametara za komunalni otpad. Uz to se očekuje doprinos prilikom definisanja uslova zbijanja tokom projektovanja, eksploatacije i rekultivacije deponija komunalnog otpada.

Drugi cilj doktorske disertacije je implementacija novog tipa malja sa šiljcima koji imaju ulogu da vrše destrukciju pri izvođenju Proktorovog opita. Modifikovani (inovativni) malj predstavlja novinu, kako za domaću tako i za stranu stručnu javnost i zbog toga je posebna pažnja posvećena tom rešenju.

Trećim ciljem doktorske disertacije smatra se detaljna analiza ponašanja određenih komponenti otpada prilikom zbijanja. To podrazumeva poznavanje sastava i starosti komunalnog otpada.

Uz tako postavljene ciljeve, definisani su sledeći zadaci istraživanja:

- pregled i analiza svetske literature koja se odnosi na definisanje parametara zbijanja komunalnog otpada;
- definisanje sastava komunalnog otpada za uzorke na kojima će se vršiti zbijanje, a koji odgovara deponijama u Srbiji;
- konstruisanje i izrada inovativnog malja sa šiljcima koji će biti prilagođen već postojećem Proktorovom aparatu koji se koristi u mehanici tla;
- izvođenje laboratorijskih ispitivanja koja uključuju Proktorov opit klasičnim ravnim i maljem sa šiljcima. Pored toga, za svaki formirani uzorak određenog granulometrijskog sastava praćenje uticaja razaranja otpada zbijanjem. Uticaj razaranja odrediti uz pomoć granulometrijskog sastava, i to sejanjem materijala pre i nakon izvođenja Proktorovog opita, klasičnim ravnim i maljem sa šiljcima.
- analiza i intepretacija rezultata dobijenih na osnovu izvršenih laboratorijskih istraživanja;
- obrazloženje predloga primene inovativne metode u praksi.

1.3. Metode ispitivanja

Prilikom definisanja parametara zbijanja komunalnog otpada korišćene su konvencionalne metode koje se koriste u mehanici tla, kao i metode koje su prilagođene komunalnom otpadu, a koje se u osnovi zasnivaju na metodama koje se koriste u mehanici tla.

Pre izvođenja laboratorijskih ispitivanja vršeno je prikupljanje, obrada i analiza podataka koji se odnose na zbijanje komunalnog otpada kako na terenu, tako i u laboratorijskim uslovima. Ovo je pre svega bilo neophodno radi ispravnog formiranja veštačkih uzoraka komunalnog otpada u laboratorijskim uslovima koji će simulirati ponašanje komunalnog otpada na deponijama.

Nakon toga, pristupilo se izradi inovativnog modifikovanog malja sa šiljcima kao sastavnog dela Proktorovog aparata koji je izrađen na osnovu analize ponašanja kompaktora na deponijama komunalnog otpada. Kako bi se procenio njegov uticaj na razaranje komunalnog otpada, vršeno je poređenje rezultata dobijenih standardnim Proktorovim opitom sa upotrebom klasičnog malja i Proktorovim opitom kod koga se zbijanje uzoraka vršilo modifikovanim maljem sa šiljcima. Tokom izvođenja laboratorijskih ispitivanja, posebna pažnja je posvećena starosti i sastavu otpada, uz koje je prikazan njihov značaj na rezultate zbijanja.

Sva ispitivanja za potrebe doktorske disertacije su izvedena u laboratoriji za mehaniku tla Rudarsko-geološkog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Na 14 uzoraka određena su osnovna fizička svojstva koja utiču na zbijenost komunalnog otpada. Pored toga, izvršeno je sejanje svih uzoraka kako bi se odredio granulometrijski sastav pre i nakon zbijanja. Na taj način su određeni efekti razaranja. Dobijeno je ukupno 28 granulometrijskih krivi. Pored toga, izvedeno je 14 Proktorovih opita, i to: sedam sa klasičnim ravnim maljem i sedam sa inovativnim maljem sa šiljcima pri istoj energiji zbijanja (600 kJ/m³). Svi uzorci za laboratorijska ispitivanja dobijeni su terenskom metodom istražnog bušenja.

Posle svih laboratorijskih ispitivanja, izvršena je analiza i interpretacija dobijenih rezultata za uzorke komunalnog otpada različitog sastava, nakon čega je data procena uticaja inovativnog pristupa na parametre zbijanja komunalnog otpada, koji su iskorišćeni da se definišu i geotehnički efekti razaranja, korišćenjem različitih metoda zbijanja.

1.4. Organizacija doktorske disertacije

Doktorska disertacija je podeljena u osam poglavlja. Kratak sadržaj svakog poglavlja biće dat u nastavku teksta:

U *Poglavlju 1*, prikazana je praksa upravljanja otpadom u Srbiji. Pored toga, definisana je problematika vezana za zbijanje komunalnog otpada. Nakon ovoga, formirani su ciljevi i zadaci doktorske disertacije, uz primenjenu metodologiju tokom izrade.

U *Poglavlju 2* definišu se faktori koji su najznačajniji prilikom izvođenja zbijanja na komunalnim deponijama. U ovom poglavlju je dat detaljan pregled obrađene literature kroz interpretaciju parametara zbijanja koji su dobijeni laboratorijskim i terenskim ispitivanjima. Kroz analizu literature opisani su svi načini izvođenja Proktorovog opita do sad, uz osvrt na njihove prednosti i mane.

Poglavlje 3 se bavi laboratorijskim ispitivanjima kojim se dobijaju parametri zbijanja komunalnog otpada. Ukratko su objašnjeni značajni fizički pokazatelji komunalnog otpada vezani za zbijanje, uz način njihovog određivanja. Nakon toga se opisuju standardne metode ispitivanja, poput standardnog i modifikovanog Proktorovog opita koje se koriste u mehanici tla. U drugom delu

poglavlja opisuje se inovativni pristup prilikom izvođenja Proktorovog opita, uz implementaciju malja sa šiljcima. Takođe, prikazana je i konstrukcija novog malja.

Poglavlje 4 detaljno opisuje program laboratorijskih ispitivanja. U prvom delu poglavlja definiše se sastav otpada za veštačko formiranje uzoraka. Nakon toga, prikazuje se način formiranja i pripreme uzoraka, uz osvrt na preporuke koje je trebalo ispoštovati. U nastavku poglavlja, detaljno je opisan postupak laboratorijskih ispitivanja.

U *Poglavlju 5* dati su rezultati laboratorijskih ispitivanja, i to: osnovnih fizičkih pokazatelja (vlažnost, zapreminska težina, specifična težina, koeficijent poroznosti), standardnog Proktorovog opita klasičnim maljem, inovativnog Proktorovog opita koji je izvođen maljem sa šiljcima i određivanje granulometrijskog sastava pre i nakon izvođenja svih opita zbijanja. Grafički su prikazani rezultati za svaki uzorak posebno.

Poglavlje 6 sadrži detaljnu analizu rezultata laboratorijskih ispitivanja koji su prikazani u prethodnom poglavlju. Prvenstveno su analizirani podaci za veštački formirane uzorke sa svake deponije posebno, nakon čega je dato i njihovo međusobno poređenje. Uz ovo, definisan je koeficijent razaranja (Δr) koji ukazuje na sklonost komponenti da se na njih vrši destrukcija zbijanjem.

U *Poglavlju 7* izvršena je komparacija dobijenih rezultata sa literaturom.

Poglavlje 8 predstavlja završno poglavlje doktorske disertacije gde su sumirani zaključci i doprinosi. Nakon ovoga date su preporuke za dalja istraživanja i implementaciju malja za izvođenje Proktorovog opita u praksi.

Doktorska disertacija se završava spiskom korišćene literature i kraćom biografijom autora.

2. PREGLED LITERATURE O ZBIJANJU KOMUNALNOG OTPADA

2.1. Opšte o zbijanju komunalnog otpada

Zbijanje komunalnog otpada predstavlja jednu od osnovnih faza korišćenja komunalne deponije i može se definisati kao postupak kojim se povećava gustina tj. zapreminska težina materijala na račun smanjenja zapremine usled istiskivanja vazduha mehaničkom energijom (dinamičko-vibraciono i statičkom). Bez obzira na sličnost komunalne deponije sa drugim geotehničkim građevinama (nasipi, nasute brane i sl.), zbog izrazite heterogenosti i različitog sastava, kontrola kvaliteta odlaganja često nije moguća i ona je u osnovi nepouzdana jer je komunalni otpad materijal čija se svojstva menjaju tokom vremena. Te promene su fizičkog, hemijskog i biološkog karaktera, sa nastankom čvrstih, tečnih i gasovitih produkata što direktno utiče na ponašanje komunalnog otpada tokom zbijanja. Neke od njih se mogu kontrolisati, dok se neke, poput starenja, ne mogu predvideti. Iz tih razloga, prilikom projektovanja deponija, treba pažljivo analizirati značajne geotehničke osobine komunalnog otpada, koje je ponekad teško odrediti.

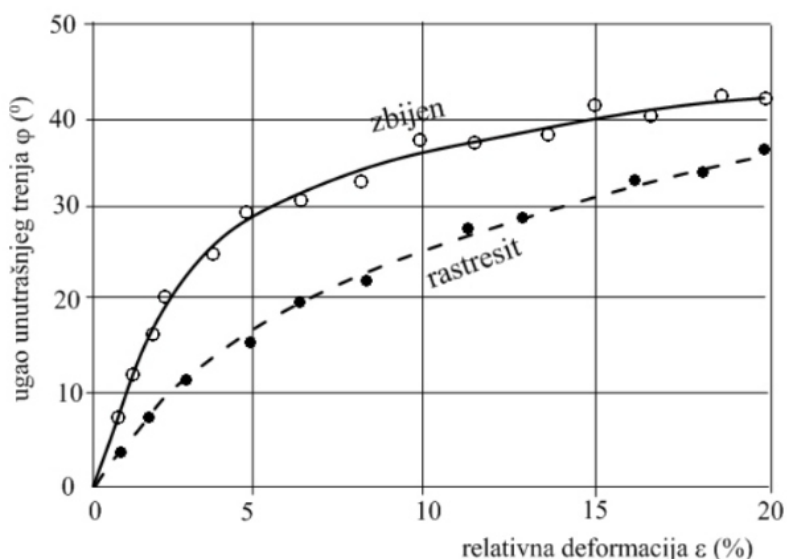
Zbijanje komunalnog otpada na deponijama predstavlja jedan od svakodnevnih procesa. Za zbijanje otpada se koristi nešto drugačija oprema u odnosu na onu koja se primenjuje tokom zbijanja tla. Najčešće su to kompaktori sa ježevima koji služe za zbijanje i usitnjavanje otpada (Slika 2.1). Zbijanje se vrši u slojevima, sa nekoliko prelaza preko komunalnog otpada uz svakodnevno prekrivanje otpada uglavnom zemljastim materijalima kako bi se sprečilo raznošenje materijala.



Slika 2.1: Kompaktor za razastiranje i zbijanje komunalnog otpada (www.hawthornecat.com)

Zbijanjem se smanjuje zapremina odloženog materijala i po pravilu ono se radi mehanički, bilo da se radi o dinamičkom – vibracionom zbijanju ili statičkom zbijanju (Wong, 2009). Generalni stav većine autora je da se povećanjem broja prelaza kompaktora na terenu postiže bolji stepen zbijanja (Oweis i Khera, 1998; Dixon i Jones, 2005; Fakher, 2006). Kako bi se postigao maksimalni kapacitet deponije, komunalnom otpadu bi trebalo tokom zbijanja da se dodaje voda (ujednačeno sa raspršivačima) i na taj način da se menjaju uslovi zbijanja, čime se povećava obradivost, zapreminska težina otpada, uz redukovano (smanjeno) vreme zbijanja. Dodavanje vode se izvodi kontrolisano, sa unapred izračunatim količinama, koje se najčešće dobijaju laboratorijskim opitima i iskustveno. Dobro zbijeni komunalni otpad, zauzima manju zapreminu i omogućuje znatno sigurnije skladištenje (Pulat i Aksoy, 2013).

Čvrstoća smicanja za zbijeni i rastresit komunalni otpad, izražen preko ugla unutrašnjeg trenja u funkciji relativne deformacije prikazan je na Slici 2.2. (Manassero i sar., 1997). Što je otpad zbijeniji, na deponiji se mogu formirati strmije kosine što znači da se na taj način povećava njihova stabilnost (Fakher, 2006; Taufiq, 2010; Hanson i sar., 2010; Turer & Turer, 2011).

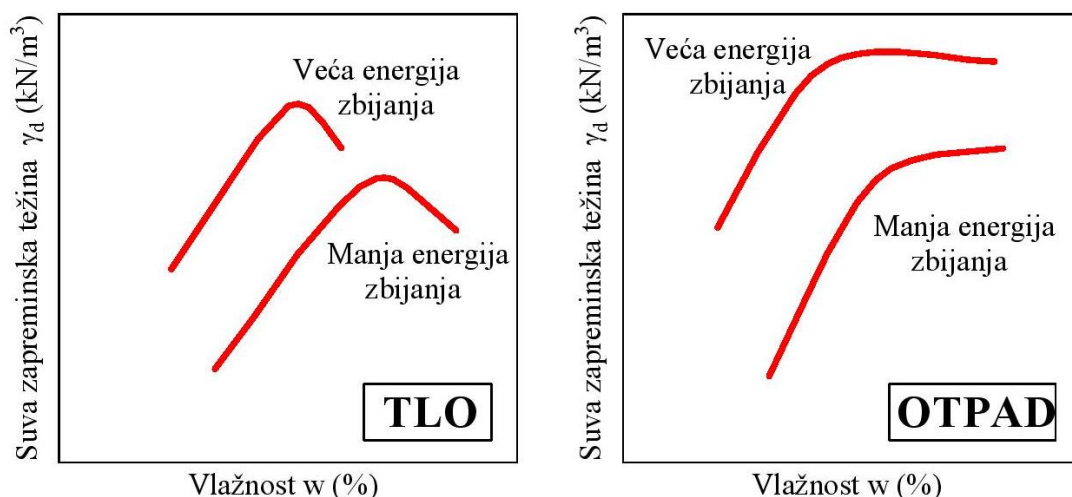


Slika 2.2: Uticaj zbijanja na mobilisani ugao unutrašnjeg trenja komunalnog otpada (Manassero i sar., 1997)

Dobro zbijeni komunalni otpad povećava efikasnost korišćenja postojećih prostora i na taj način smanjuje potrebu za novim (Endaiti i Patil, 2020). Ponašanje komunalnog otpada tokom zbijanja zavisi od nekoliko faktora, i to: sadržaja vode, strukture otpada (anizotropije), stepena degradacije, granulometrijskog sastava, debljine slojeva i sastava otpada (Langer, 2005; Dixon & Jones, 2005).

Kako bi se zbijanje komunalnog otpada sprovelo ekonomično, neophodno je prethodno izvršiti laboratorijska i terenska istraživanja da bi se odredili parametri zbijanja, najčešće maksimalna suva zapreminska težina (γ_{dmax}) i optimalna vlažnost (w_{opt}). Pored ovih, moglo bi se reći osnovnih parametara, tokom terenskih istraživanja se ponekad uvode posebni parametri zbijanja koji se uglavnom koriste za poboljšanje operativnosti deponije, što će u nastavku biti detaljnije objašnjeno (Hanson i sar., 2010; Cox i sar., 2015).

Iako je za dobijanje različitih parametara zbijanja komunalnog otpada usvojena konvencionalna metodologija mehanike tla, jasne razlike se uočavaju već tokom prvih poređenja rezultata. Poseban oblik odnosa između zapreminske težine i vlažnosti, za tlo se opisuje pomoću dva odvojena faktora: sadržaja vode i zbijanja materijala. Međutim, kod otpada se uvodi i treći faktor koji se odnosi na promenu zapremine čvrstih komponenti otpada. Za tlo se može reći da se porastom vlažnosti linearno povećava i suva zapreminska težina, koja se nakon postizanja maksimalne vrednosti linearno i smanjuje. I za komunalni otpad se može reći da je u početku odnos suve zapreminske težine i vlažnosti sličan kao i kod tla, ali nakon dostizanja maksimalne vrednosti suve zapreminske težine, njeno smanjenje sa povećanjem vlažnosti nije toliko izraženo (Slika 2.3). To se može objasniti činjenicom da je razlika između zapreminske težine vode i zapreminske težine komunalnog otpada znatno manja, što se ne može reći za tlo. Kroz analizu krivih zbijanja, uočava se dosta izraženiji zvonast oblik kod tla u odnosu na komunalni otpad.



Slika 2.3: Funkcionalana zavisnost između γ_d i w za tlo i otpad (Hanson i sar., 2010)

Iz svega navedenog, jasno se uočava važnost zbijanja komunalnog otpada na deponiji, kao i prethodno laboratorijsko određivanje parametara. Kako bi se simulirali uslovi na terenu, u laboratoriji se materijal veštački priprema uzimajući u obzir sledeće faktore: sastav (procentualno učešće komponenti), starost otpada, veličinu i oblik čestica, heterogenost i sl. Tako, uglavnom, veštački pripremljen uzorak se zbija u Proktorovom kalupu prema standardu koji je usvojen u mehanici tla. Iako je ovakva praksa prihvaćena u svetu, autori sve češće zastupaju stav kako je neophodno uvesti određene inovacije kroz promenu energije zbijanja, aparature i sl. (Wong, 2009; Hanson i sar., 2010; Okonta i sar., 2018; Endait & Patil, 2020). Taj stav je proistekao pre svega zbog činjenice da se komunalni otpad ponaša drugačije tokom zbijanja u odnosu na tlo.

Parametri zbijanja komunalnog otpada, u publikovanoj literaturi, dobijeni su primenom:

- laboratorijskih ispitivanja konvencionalnim metodama koje se koriste u mehanici tla, ali i metodama prilagođenim komunalnom otpadu.
- terenskih, in-situ opita, uglavnom na probnim poljima, standardnom opremom koja se u praksi koristi za svakodnevno zbijanje komunalnog otpada i dnevnih prekrivki na deponijama.

U nastavku teksta će posebno biti obrađene literaturne jedinice koje su vezane za laboratorijska ispitivanja, a posebno in-situ opiti za određivanje parametara zbijanja komunalnog otpada.

2.2. Literaturni podaci vezani za laboratorijska ispitivanja

Laboratorijska ispitivanja parametara zbijanja komunalnog otpada mogu se pronaći u literaturi poslednjih 40-ak godina. Kroz analizu dostupnih referenci, dolazi se do zaključka da su u početku korišćeni samo konvencionalni principi mehanike tla, pa je s tim u vezi i naučni doprinos uglavnom bio vezan za standardni i modifikovan Proktorov opit. Međutim, zbog izražene heterogenosti i promenljivosti u ponašanju komunalnog otpada, kasnije se mogu uvideti nešto drugačiji pristupi koji se najčešće ogledaju u promeni energije zbijanja uz promenu dimenzija opreme koja se koristi tokom opita.

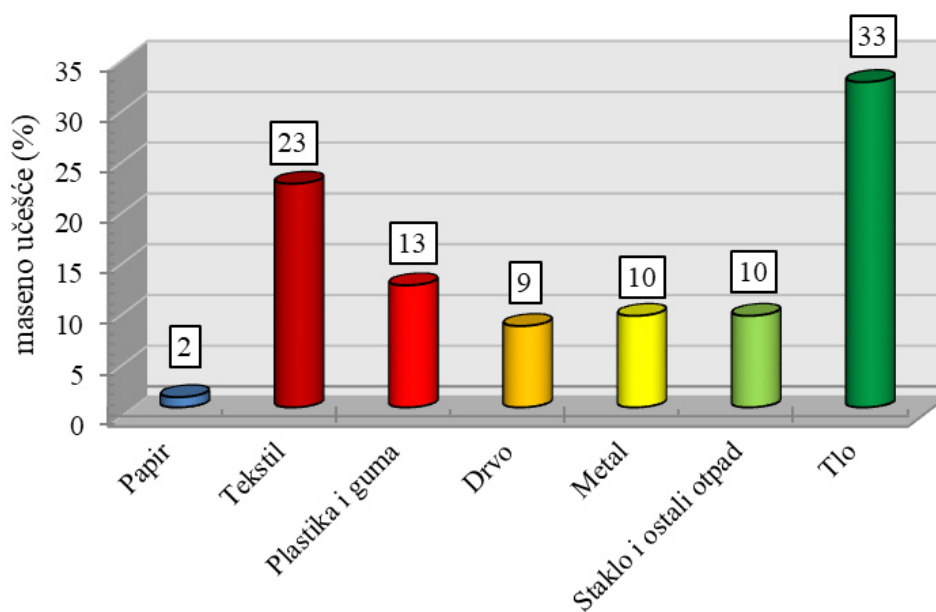
U vezi sa tim, u nastavku teksta, prvo su prikazane vrednosti parametara zbijanja koje su dobijene standardnim Proktorovim opitom (energija zbijanja oko 600 kJ/m^3). Pored dobijenih rezultata daje se i kraći osvrt na sastav i starost otpada za većinu literaturnih podataka, zbog uticaja koji ova svojstva imaju na parametre zbijanja. S obzirom na činjenicu da je standardni Proktorov opit

korišćen za potrebe doktorske disertacije. Rezultati će biti iskorišćeni i za poređenje i verifikaciju dobijenih rezultata. Nakon toga, daje se osvrt na rezultate dobijene modifikovanim Proktorovim opitom (energija zbijanja oko 2700 kJ/m^3), kao i na rezultate u kojima su autori izvršili određene izmene koje se odnose na energiju zbijanja u odnosu na standarde.

2.2.1. Rezultati dobijeni standardnim Proktorovim opitom

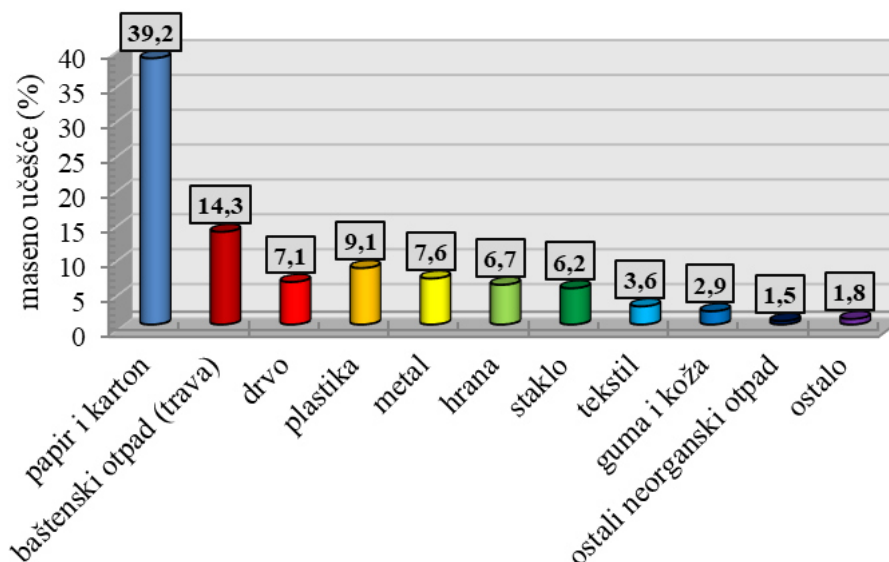
Određivanje parametara zbijanja komunalnog otpada standardnim Proktorovim opitom prvi put se pominje u radu *Harrisa (1979)*. Za svoje istraživanje koristio je svež otpad sa jedne deponije u Engleskoj. Pri standardnoj energiji zbijanja od oko 600 kJ/m^3 dobijena je prosečna maksimalna suva zapreminska težina (γ_{dmax}) od 7.1 kN/m^3 pri optimalnoj vlažnosti (w_{opt}) od 58%. Kao zaključak autor navodi da je vlažnost otpada na deponiji u direktnoj vezi sa vremenskim uslovima. Pored toga zaključak je da dodavanje vode prilikom zbijanja pomaže u obradivosti prilikom odlaganja otpada i dovodi do maksimalne iskorišćenosti kapaciteta deponije.

Gabr i Valero (1995) su za svoje istraživanje koristili uzorak komunalnog otpada koji je uzet istražnim bušenjem. Otpad je bio starosti od 15 do 30 godina. Sastav je prikazan na Slici 2.4. Najveći prečnik komponenti u kalupu iznosio je 9.5 mm. Standardnim Proktorovim opitom dobijena je maksimalna suva zapreminska težina (γ_{dmax}) od 9.3 kN/m^3 pri optimalnoj vlažnosti (w_{opt}) od 31%.



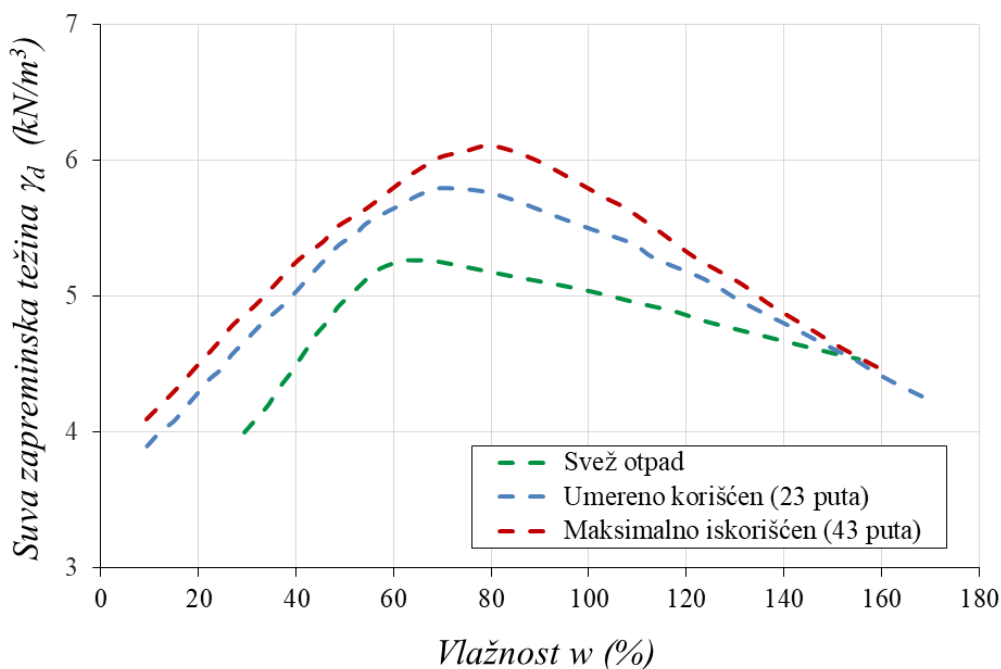
Slika 2.4: Sastav starog komunalnog otpada (*Gabr i Valero, 1995*)

Hettiarachchi (2005) je, takođe, vršio ispitivanja sa unapred definisanim sastavom (Slika 2.5) kojim je utvrdio parametre zbijanja standardnim Proktorovim opitom (Slika 2.6). Koristio je veštački formirane uzorke podeljene u tri grupe. Prvu grupu su činili uzorci svežeg otpada, drugoj grupi pripada umereno prerađen otpad na kojem je vršeno zbijanje (23 puta) i treću grupu čini u potpunosti prerađen otpad na kojem je izvršeno 43 opita zbijanja. Maksimalna veličina komponenti iznosila je 5 mm.



Slika 2.5: Sastav komunalnog otpada (Hettiarachchi, 2005)

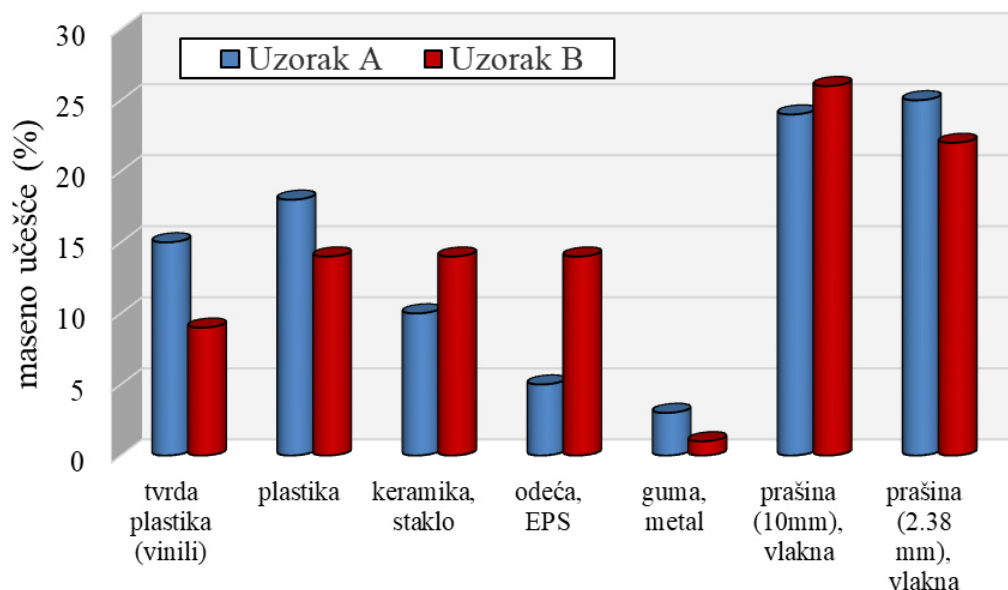
Svež otpad imao je maksimalnu suhu zapreminsku težinu (γ_{dmax}) od 5.25 kN/m^3 i optimalnu vlažnost (w_{opt}) 62%. Druga grupa uzoraka dostigla je maksimalnu suhu zapreminsku težinu (γ_{dmax}) od 5.80 kN/m^3 pri optimalnoj vlažnosti (w_{opt}) od 70%, dok je maksimalno iskorišćen otpad imao maksimalnu suhu zapreminsku težinu (γ_{dmax}) od 6.1 kN/m^3 pri optimalnoj vlažnosti (w_{opt}) od 80%. Autor je ukazao da je ponovna upotreba komunalnog otpada rezultirala povećanjem maksimalne suve zapreminske težine (γ_{dmax}) i optimalne vlažnosti (w_{opt}). Prosečna specifična težina (G_s) iznosila je 1.65.



Slika 2.6: Prikaz rezultata Standardnog Proktorovog opita (Hettiarachchi, 2005)

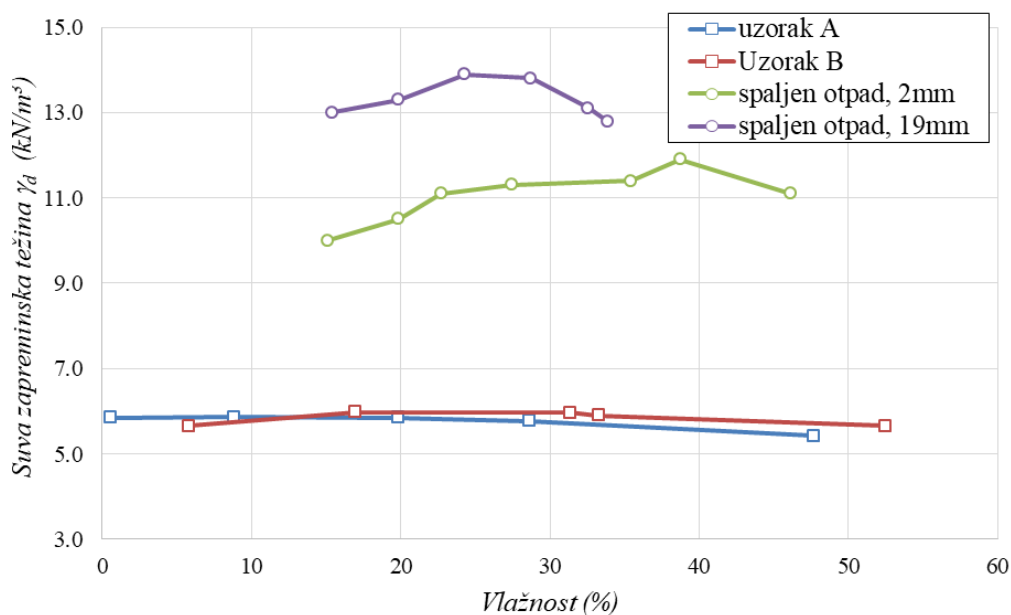
Itoh i sar. (2006) su objavili studiju koja je obuhvatala laboratorijska istraživanja koja su, između ostalih, uključivala i standardni Proktorov opit. Autorima je osnovni cilj bio ispitivanje mogućnosti za rekultivaciju postojećih deponija u višenamenske prostore poput golf terena, igrališta, fabrika i sl. Za pripremu uzoraka korišćen je komunalni otpad sa deponije u Tokiju. Sastav komunalnog otpada varirao je u zavisnosti od faze i trenutne namene deponije, što je uzeto u obzir prilikom formiranja uzoraka. Određeni deo otpada je tretiran paljenjem na deponiji. Prema dostupnom

materijalu sa deponije, formirani su uzorci od spaljenog i nespaljenog otpada. Sastav uzoraka za nespaljen otpad prikazan je na Slici 2.7.



Slika 2.7: Sastav nezapaljivog otpada (Itoh i sar., 2006)

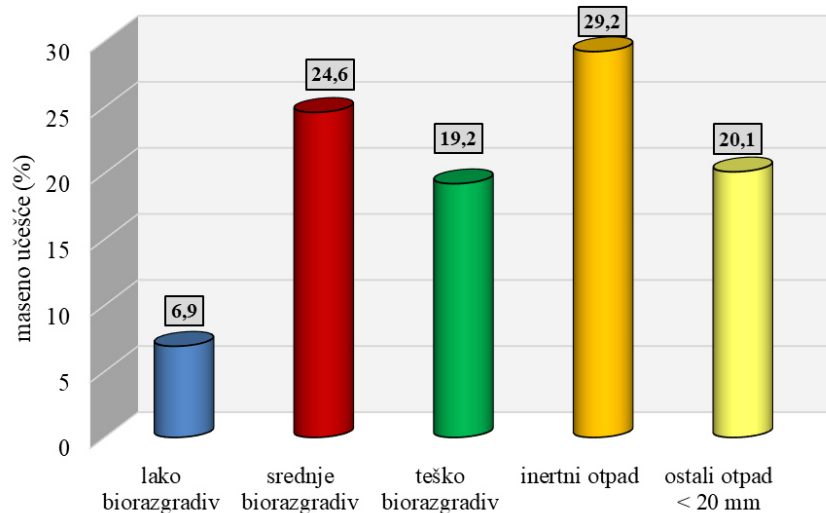
Rezultati ukazuju da otpad koji nije spaljen ima manje vrednosti maksimalne suve zapremine težine (γ_{dmax}) koje se kreću oko 6.0 kN/m^3 i optimalne vlažnosti (w_{opt}) u granicama od 10- 20% (Slika 2.8). Za uzorke spaljenog otpada gde je veličina čestica manja od 2 mm, maksimalna suva zapremine težina (γ_{dmax}) iznosi 13.8 kN/m^3 , pri optimalnoj vlažnosti (w_{opt}) od 25%. Dok za čestice koje su veće od 19 mm, maksimalna suva zapremine težina (γ_{dmax}) je 11.9 kN/m^3 pri optimalnoj vlažnosti (w_{opt}) od 40% (Slika 2.8). Tokom spaljivanja otpada značajno se menja granulometrijski sastav uzoraka i to povećanjem učešća sitnozrnih frakcija. Iz ovog razloga se dobijaju veće vrednosti parametara zbijanja, što ukazuje na to da se fino-zrne čestice lakše zbijaju.



Slika 2.8: Prikaz rezultata Standardnog Proktorovog opita (Itoh i sar., 2006)

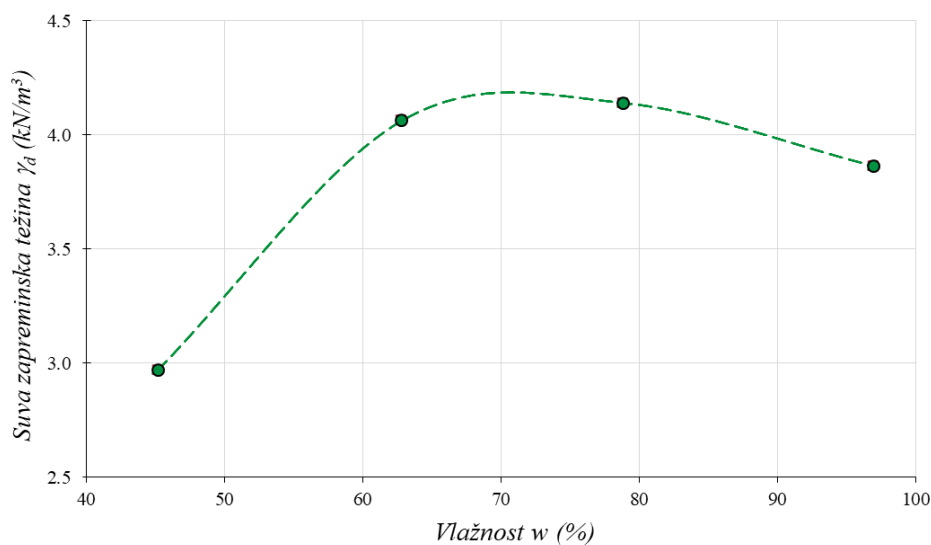
U studiji je izveden zaključak da je moguće urbanizovati lokacije sa deponijama, gradeći preko njih objekte male težine.

Reddy i sar. (2009) vršili su laboratorijska ispitivanja zbijanja komunalnog otpada standardnim Proktorovim opitom na svežem otpadu koji je uzet sa radnog dela deponije Orchard Hills, SAD. Prilikom formiranja uzorka, sve komponente su usitnjene do maksimalne veličine čestica od 40 mm. Sastav svežeg komunalnog otpada je selektovan prema biorazgradivosti i to: lako biorazgradiv (kuhinjski i baštenski otpad), srednje biorazgradiv (papir, karton, sanitarni otpad), teško biorazgradiv (tekstil, drvo, pelene), razne vrste inertnog otpada i ostali otpad manji od 20 mm (Slika 2.9).



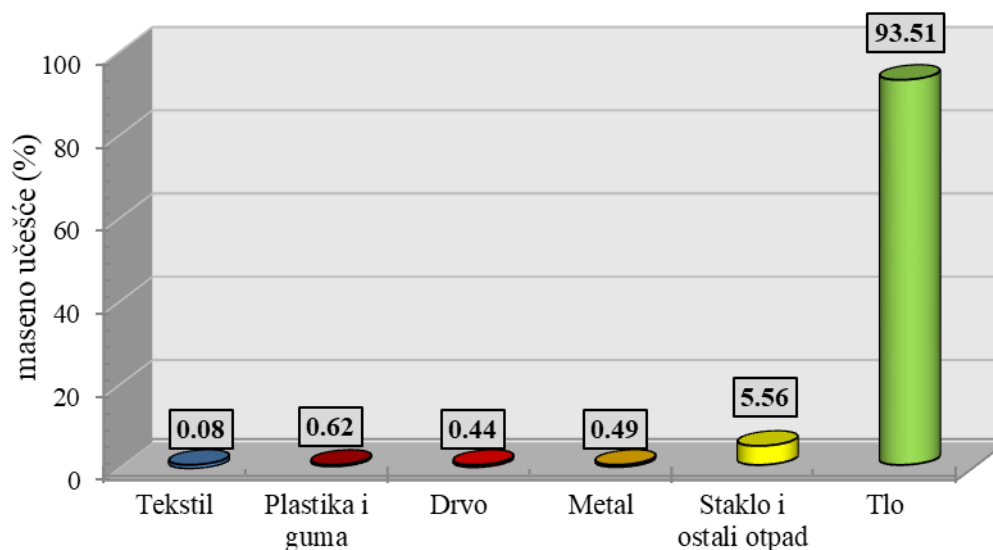
Slika 2.9: Sastav komunalnog otpada na deponiji Orchard Hills (Reddy i sar., 2009)

Standardni Proktorov opit rađen je sa početnim ciljanim vlažnostima od 44%, 60%, 80% i 100%. Dobijena je maksimalna suva zapreminska težina (γ_{dmax}) od 4.2 kN/m^3 pri optimalnoj vlažnosti (w_{opt}) od 70% (Slika 2.10). Autori su poredili svoje istraživanje sa studijom koju su radili Hettiarachchi i sar. (2005), i u radu objasnili odstupanje rezultata, s obzirom da se u oba slučaja radi o svežem otpadu. Kao prvu razliku, naveli su specifičnu težinu koja je kod deponije Orchard Hills dosta niža i iznosi $G_s=0.85$. Druga značajna razlika koju su uočili autori se ogleda u maksimalnoj veličini komponenti koja odstupa oko 30 mm. Navodi se važnost ova dva parametra prilikom tumačenja i upoređivanja rezultata, kao i preporuka da se obrati pažnja na njih u daljim istraživanjima.



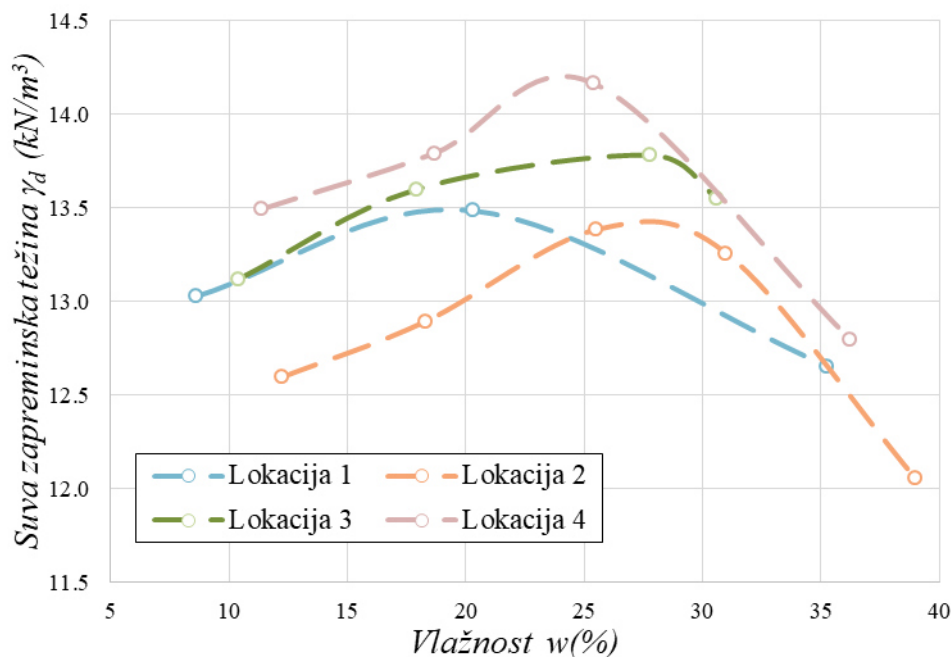
Slika 2.10: Rezultati Standardnog Proktorovog opita na svežem komunalnom otpadu (Reddy i sar., 2009)

Hyun i sar. (2011) su ispitivali geotehničke karakteristike starog komunalnog otpada čiji su uzorci uzeti sa deponije u Whamyungu, Koreja. U vreme uzimanja uzorka, starost deponije iznosila je oko 15 godina, dok je na lokaciji uzetog otpada starost iznosila oko 10 godina. Sastav otpada je prikazan na Slici 2.11.



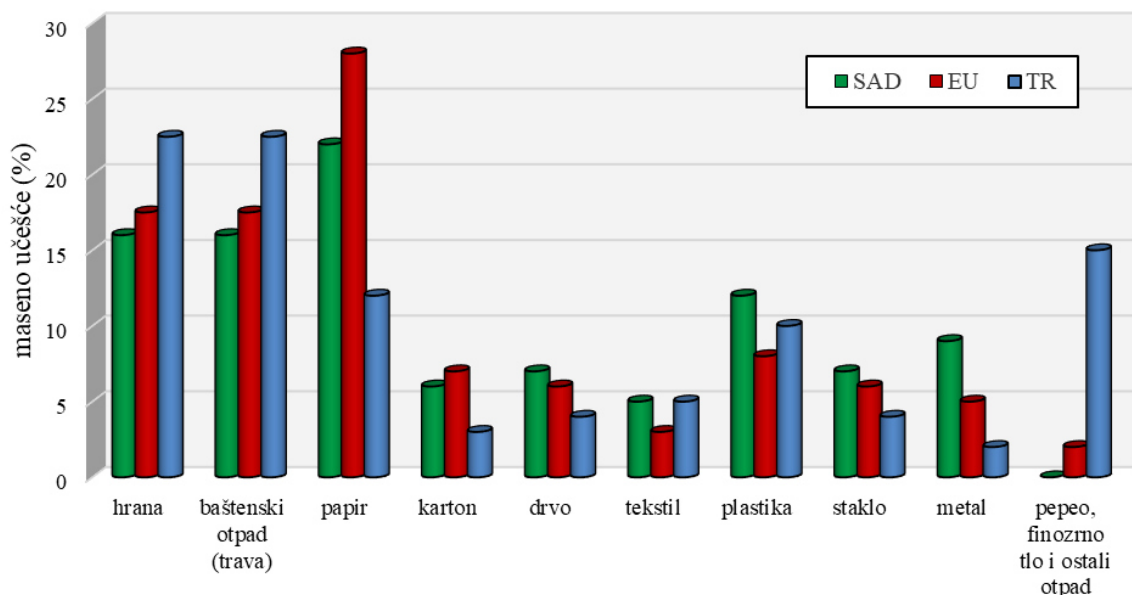
Slika 2.11: Sastav starog komunalnog otpada (Hyun i sar., 2011)

Standardnim Proktorovim opitom dobijene su vrednosti optimalne vlažnosti (w_{opt}) u rasponu od 20-30%, uz maksimalnu suhu zapreminsku težinu (γ_{dmax}) koja se kretala od 13.4 kN/m^3 do 14.2 kN/m^3 (Slika 2.12).



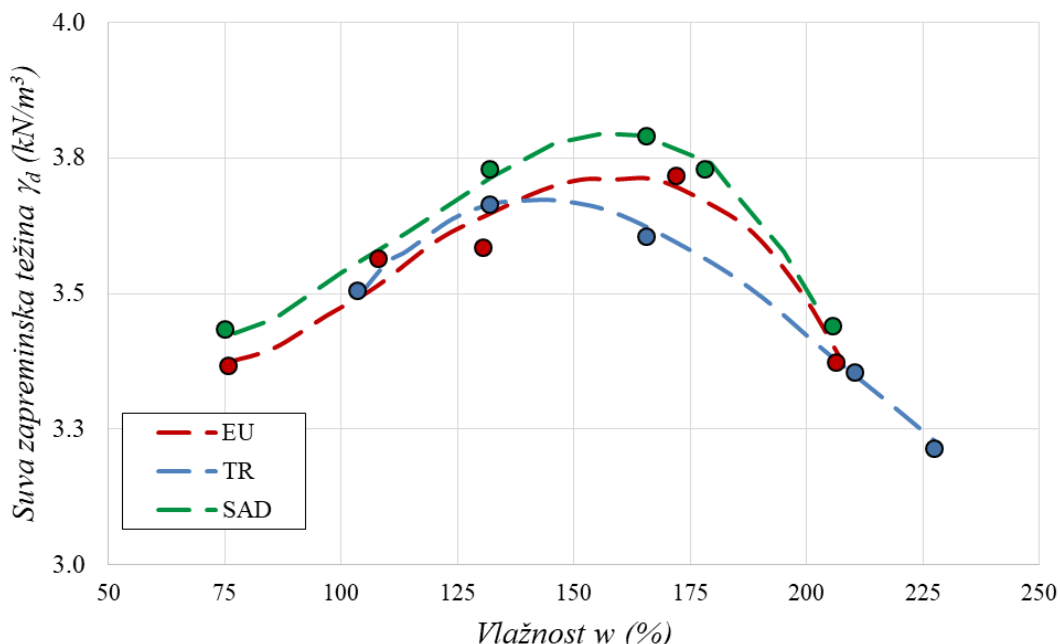
Slika 2.12: Rezultati standardnog Proktorovog opita (Hyun i sar., 2011)

Pulat i Yukselen- Aksoy (2013) objavili su studiju u kojoj je analiziran efekat sastava, degradacije i promene energije tokom zbijanja komunalnog otpada. Između ostalih, urađen je i standardni Proktorov opit na veštački formiranim uzorcima za tri različita sastava (Slika 2.13) koji odgovaraju sastavu komunalnog otpada u datim regionima i to: Sjedinjenim Američkim Državama (SAD), Evropskoj Uniji (EU) i Republici Turskoj (TR).



Slika 2.13: Sastav komunalnog otpada SAD, EU i TR (Pulat i Aksoy, 2013)

Analizom sastava komunalnog otpada može se uočiti da su ekonomski razvoj, stepen industrijalizacije i klimatski uslovi od velikog značaja za određivanje prosečnog sastava u nekoj državi, zbog čega on dosta varira. U TR se može uočiti veći sadržaj organske materije, što karakteriše slabije razvijene države. SAD imaju veći procenat plastike i metala zbog povećane industrijalizacije, dok EU ima veći procenat papira zbog nešto veće stope pismenosti. Komunalni otpad je pre formiranja svih uzoraka prosejan kroz sito, tako da je maksimalna veličina frakcija iznosila 25 mm. Nakon toga svi uzorci su provlaženi, homogenizovani i ostavljeni da odstoje 24h.



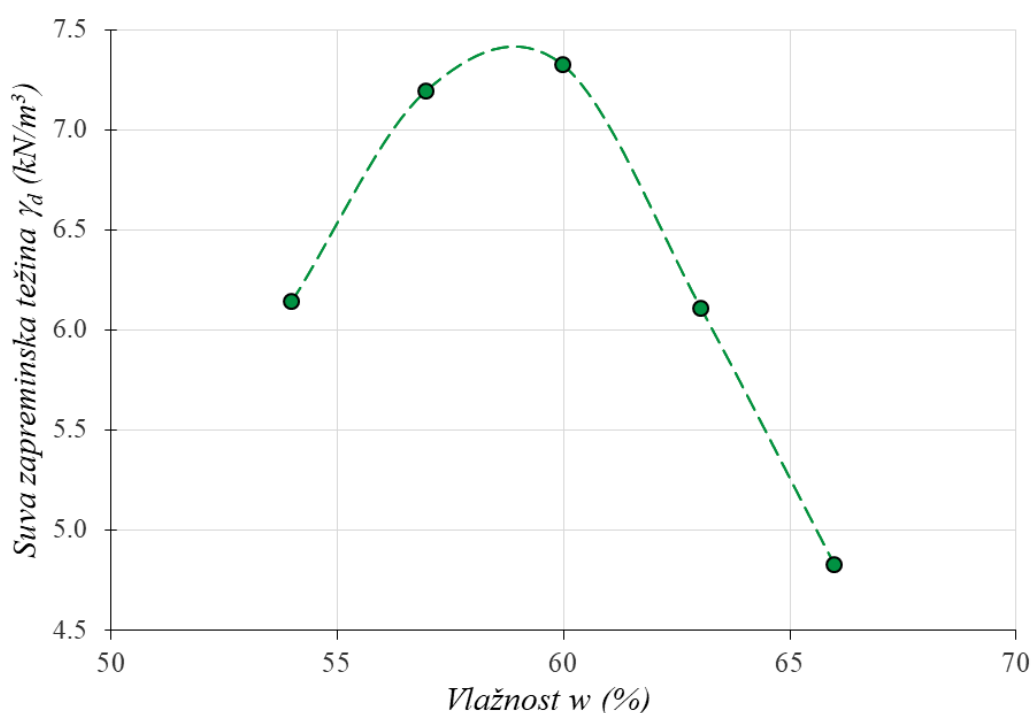
Slika 2.14: Standardni Proktorov opit: SAD, EU i TR (Pulat i Aksoy, 2013)

Najviša vrednost maksimalne suve zapremske težine (γ_{dmax}) od 3.8 kN/m^3 određena je kod komunalnog otpada u SAD. Datom sastavu odgovara optimalna vlažnost (w_{opt}) od 158%. Nešto manja maksimalna suva zapreminska težina (γ_{dmax}) od 3.72 kN/m^3 pri optimalnoj vlažnosti (w_{opt}) od 162% je kod komunalnog otpada koji odgovara sastavu EU. Najmanja vrednost maksimalne suve zapremske težine (γ_{dmax}) od 3.67 kN/m^3 pri optimalnoj vlažnosti (w_{opt}) od 138% registrovana je

kod komunalnog otpada koji odgovara sastavu u TR. Rezultati standardnog Proktorovog opita (Slika 2.14) ukazuju na činjenicu da je korišćen potpuno svež otpad, pa je samim tim i vlažnost dosta visoka.

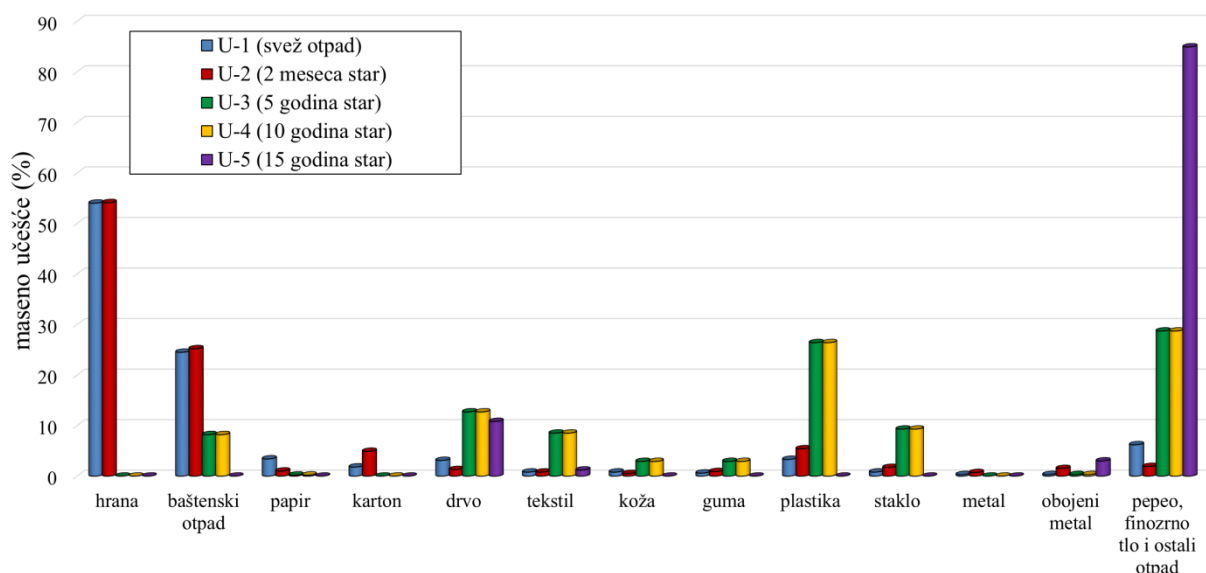
Kao nelogičnost u dobijenim rezultatima izdvojila bih činjenicu da uzorak sa najvećim procentom tla ima najmanju maksimalnu suhu zapreminsku težinu (γ_{dmax}), što je u suprotnosti sa drugim rezultatima.

Naveen (2017) je prikazao rezultate zbijanja svežeg komunalnog otpada uzoraka koji su formirani sa aktivne deponije Mavallipura u Indiji. U studiji je izveden zaključak da se maksimalna zapremina prostora za odlaganje na deponiji može postići ukoliko se vlažnost tokom zbijanja dovede do optimalne. U slučaju ispitivanog uzorka rezultati dobijeni standardnim Proktorovim opitom su: maksimalna suva zapreminska težina (γ_{dmax}) od 7.45 kN/m^3 pri optimalnoj vlažnosti (w_{opt}) od 59 % (Slika 2.15). Za izvođenje opita korišćen je otpad u kom je maksimalna veličina čestica 10 mm.



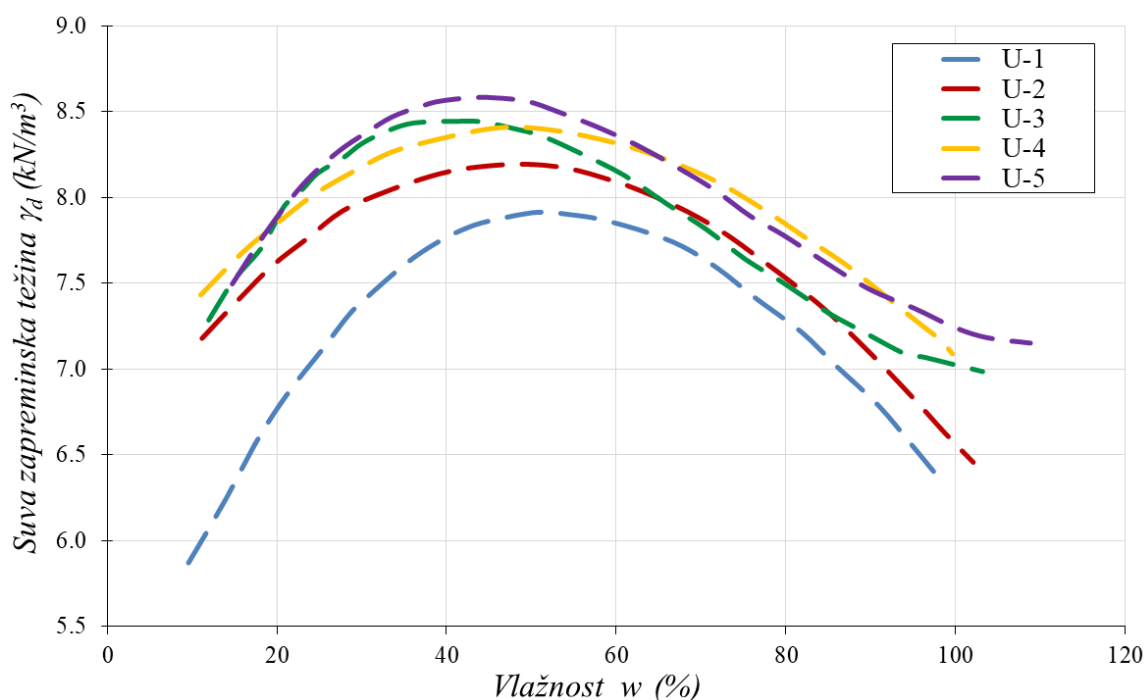
Slika 2.15: Rezultati Standardnog Proktorovog opita (Naveen, 2017)

Endaiti i Patil (2020) su u svom radu prikazali laboratorijska istraživanja za svež i stari komunalni otpad pri širokom rasponu energija zbijanja (552 kJ/m^3 , 1125 kJ/m^3 , 2682 kJ/m^3 i 5364 kJ/m^3). Materijal za laboratorijska ispitivanja uzet je sa aktivne deponije Vilholi Nasik u Indiji. Uzorci su veštački formirani u pet različitih grupa prema starosti komunalnog otpada i to: svež (U-1), dva meseca star (U-2), pet godina star (U-3), 10 godina star (U-4) i 15 godina star (U-5). Sastav uzoraka je definisan na osnovu dostupnog materijala (Slika 2.16). Prosečna specifična težina iznosila je $G_s=1.94$.



Slika 2.16: Sastav otpada prema starosti (Endaiti i Patil, 2020)

Krive koje približno odgovaraju energiji zbijanja pri standardnom Proktorovom opitu prikazane su na Slici 2.17, dok su numerički parametri dati u Tabeli 2.1.



Slika 2.17: Rezultati Proktorovog opita pri energiji zbijanja $E=552 \text{ kJ/m}^3$ (Endaiti i Patil, 2020)

Autori su izneli zaključak da do značajnijeg povećanja maksimalne suve zapreminske težine, kao i do smanjenja optimalne vlažnosti dolazi tek prilikom završetka procesa biodegradacije, što se može konstatovati na uzorcima starijim od pet godina. Ovakve promene parametara zbijanja se mogu pripisati smanjenju veličina čestica tokom razlaganja otpada.

Tabela 2.1: Rezultati Proktorovog opita pri energiji zbijanja $E=552 \text{ kJ/m}^3$ (Endaiti i Patil, 2020)

	U-1	U-2	U-3	U-4	U-5
γ_{dmax} (kN/m^3)	7.95	8.20	8.45	8.40	8.58
w_{opt} (%)	52.5	50.0	41.91	50.0	45.0

U Tabeli 2.2, dat je zbirni prikaz parametara zbijanja, maksimalne suve zapremine težine (γ_{dmax}) i optimalne vlažnosti (w_{opt}) koji su dobijeni na osnovu standardnog Proktorovog opita, a koji su navedeni u prethodnom tekstu. Analizom rezultata uočavaju se velika odstupanja vrednosti (posebno optimalne vlažnosti). Iz tih razloga autori su analizirali uslove zbijanja na veštački formiranim uzorcima sa izrazito različitim sastavom komunalnog otpada.

Pored toga, starost otpada je od izrazite važnosti prilikom tumačenja rezultata. Svež otpad koji sadrži dosta organske materije ima značajno veću vlažnost nego što je slučaj sa starim komunalnim otpadom gde je završen proces degradacije. Opšti trend je rast maksimalne suve zapremine težine i smanjenje optimalne vlažnosti sa povećanjem starosti komunalnog otpada. Međutim, ne sme se izostaviti ni subjektivnost autora prilikom tumačenja dobijenih podataka, kao i u postavljanju polaznih hipoteza. Čest je slučaj da u literaturi nije naglašena maksimalna veličina komponenti u kalupu za zbijanje, kao ni dimenzije kalupa, iako predstavlja jedan od ključnih ulaznih podataka.

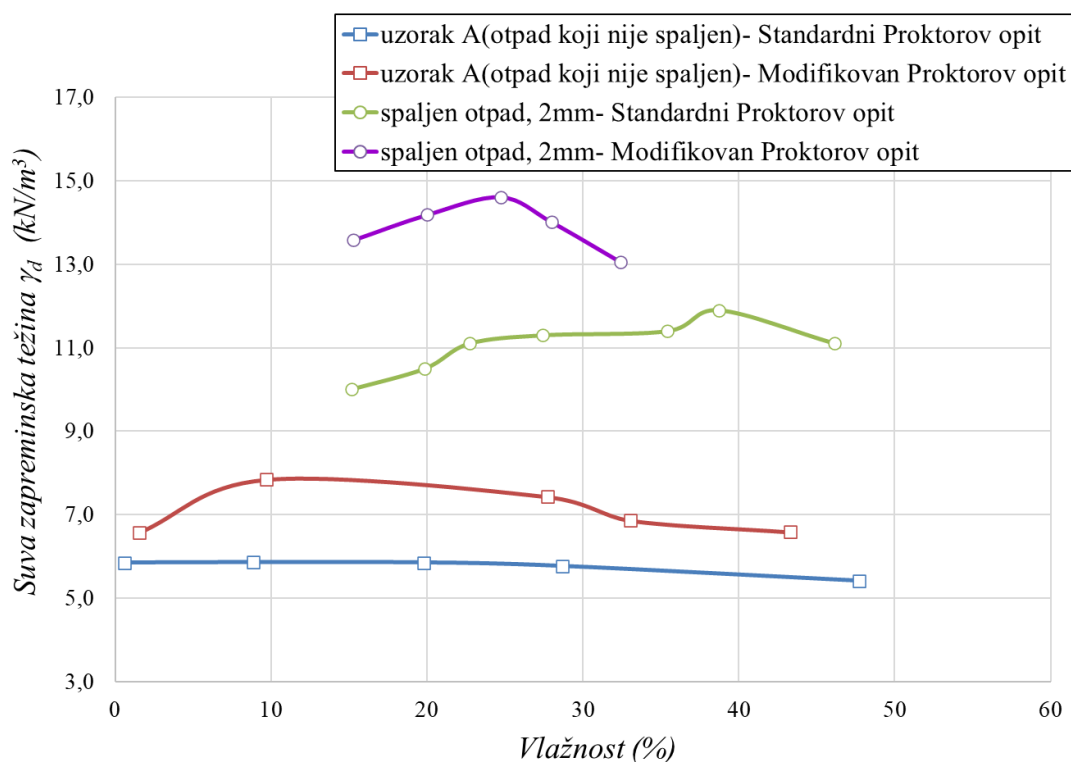
Tabela 2.2: Parametri zbijanja komunalnog otpada dobijeni standardnim Proktorovim opitom

Autori	Parametri zbijanja		Detalji vezani za ispitivanje
	γ_{dmax}	w_{opt}	
	(kN/m ³)	(%)	
Harris (1979)	7.10	58	Svež otpad
Gabr i Valero (1995)	9.30	31	Otpad starosti 15-30 godina
Hettiarachchi (2005)	5.50	62	Svež otpad (S)
	5.69	70	Umereno korišćen svež otpad (UK)
	5.98	80	Maksimalno iskorišćen svež otpad (MK)
Itoh i sar. (2005)	6.0	10-20	Spaljen i nespaljen komunalni otpad
	13.8	25	
	11.9	40	
Reddy i sar. (2009)	4.10	70	Svež otpad
Hyun i sar. (2011)	13.4-14.2	20-30	Otpad starosti 15 godina
H.F. Pulat & Y. YukselenAksoy(2013)	3.80 (SAD)	158 (SAD)	Veštački formirani uzorci koji odgovaraju sastavu komunalnog otpada Sjedinjenih Američkih država (SAD), Evrope (EU) i Republike Turske (TR)
	3.72 (EU)	162 (EU)	
	3.67 (TR)	138 (TR)	
Naveen (2017)	7.45	59	Svež otpad
Mahesh Endait Swati Patil (2020)	8.02	63.5	Svež otpad
	8.40	58.40	Uzorak starosti dva meseca
	8.57	41.91	Uzorak starosti pet godina
	8.54	41.78	Uzorak starosti 10 godina
	8.58	43.42	Uzorak starosti 15 godina
Claudio Luis de Aravjo Neto i sar. (2021)	8.00	34.00	Svež otpad (Sušen na vazduhu 14 dana pre izvođenja opita). Standard: ABNT NBR 7182

2.2.2. Rezultati dobijeni modifikovanim Proktorovim opitom

Za određivanje parametara zbijanja komunalnog otpada često se koristi modifikovan Proktorov opit. U literaturi se mogu naći rezultati ispitivanja na uzorcima komunalnog otpada različite starosti i sastava (Itoh, 2005; Von Stockhausen, 2007; Wong, 2009; Hanson i sar., 2010; H.F. Pulat & Y. Yukselen- Aksoy, 2013; Mahesh Endait Swati Patil, 2020; Okonta i sar., 2018). Za potrebe pojedinih studija, rađeno je više vrsta opita zbijanja (standardni i modifikovan Proktorov opit, opit sa nestandardnom energijom zbijanja i sl.), a rezultati su iskorišćeni za odgovarajuća poređenja i analize vezane za promene određenih svojstava zbijanja. U nastavku teksta će se, pored analize rezultata dobijenih modifikovanim Proktorovim opitom, dati osvrt i na poređenje sa rezultatima standardnog Proktorovog opita, kao i na činioce koji su glavni uzrok odstupanja.

Itoh i sar. (2006) su za izvođenje laboratorijskog ispitivanja koristili isti sastav koji je već prikazan na Slici 2.7. Međutim, može se uočiti razlika u rezultatima pri povećanju energije zbijanja. Otpad koji nije spaljen (uzorak A) ima maksimalnu suhu zapreminsku težinu (γ_{dmax}) od 7.8 kN/m^3 pri optimalnoj vlažnosti od oko 10%. U slučaju spaljenog otpada, maksimalna suva zapreminska težina iznosila je 14.5 kN/m^3 , pri optimalnoj vlažnosti od približno 25%.



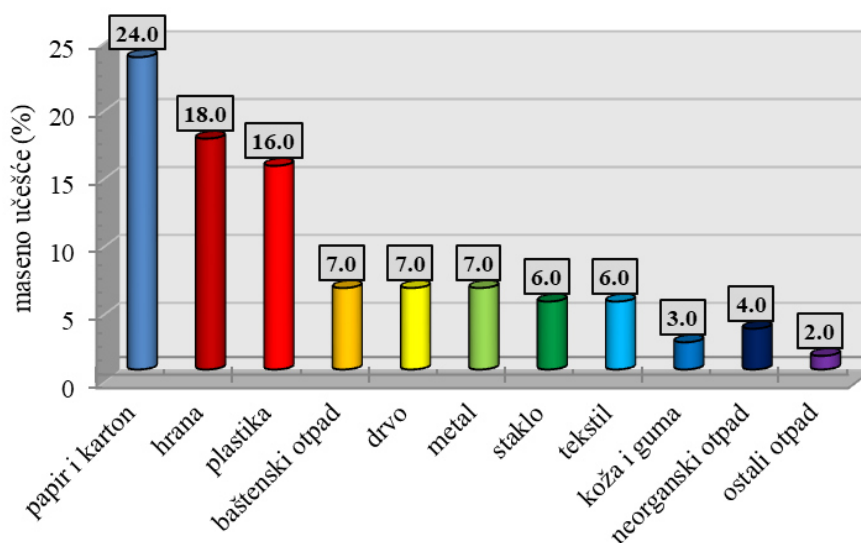
Slika 2.18: Prikaz rezultata Proktorovog opita (Itoh i sar., 2006)

S obzirom da je sastav uzorka za oba laboratorijska opita zbijanja isti, moguće je porediti dobijene rezultate. Kao što se vidi na Slici 2.18, modifikovan Proktorov opit je u oba slučaja dao veću maksimalnu suhu zapreminsku težinu.

Ovakve promene u parametrima pripisuju se povećanoj energiji zbijanja (isti slučaj bi bio kod tla). Pored toga, autori ukazuju da se sitnozrni komunalni otpad (spaljen otpad) bolje zbija od nespaljenog koji je krupniji, što potvrđuje i veća maksimalna suva zapreminska težina.

Wong (2009) je na veštački pripremljenim uzorcima ispitivao različita svojstva (stišljivost, hidrauličku provodljivost i čvrstoću smicanja) u odnosu na karakteristike zbijanja materijala. Sastav

uzoraka (Slika 2.19) je određen prema metodi koja je usvojena od strane Environmental Protection Agency (EPA/ USEPA).

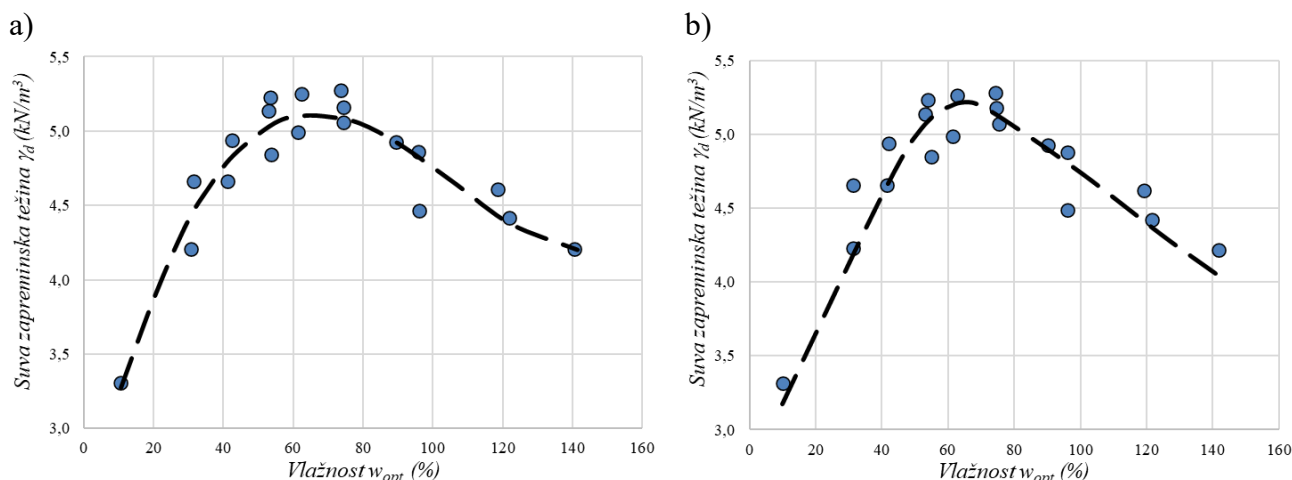


Slika 2.19: Sastav otpada (Wong, 2009)

Uzorci za ispitivanje su veštački formirani i podeljeni u dve grupe prilikom pripreme za izvođenje modifikovanog Proktorovog opita. Maksimalna veličina frakcija za formiranje svih uzorka iznosila je 25 mm. U prvu grupu uzoraka dodavana je voda do ciljanog sadržaja vlažnosti (30%, 50%, 70%, 90%, 110%, 130%), nakon čega je uzorak odležao 24 sata pre samog opita zbijanja.

Druga grupa uzoraka je ostavljena prethodno na provlažavanje, kako bi postigla oko 30% vlažnosti, što je prema *Von Stockhausen-u (2007)* usvojeno kao uobičajena vrednost za vlažnost otpada na deponiji. Za razliku od prve grupe, ovde je neposredno pre izvođenja opita dodata voda kako bi uzorak postigao određene vlažnosti (30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 90% i 110%). Bez obzira na dve grupe uzoraka, autori su definisali po jednu Proktorovu krivu pa se ona s obzirom na to može smatrati osrednjenom vrednošću.

Modifikovanim Proktorovim opitom je dobijena maksimalna suva zapreminska težina (γ_{dmax}) od 5.1 kN/m³ pri optimalnoj vlažnosti (w_{opt}) od 66% (Slika 2.20a).



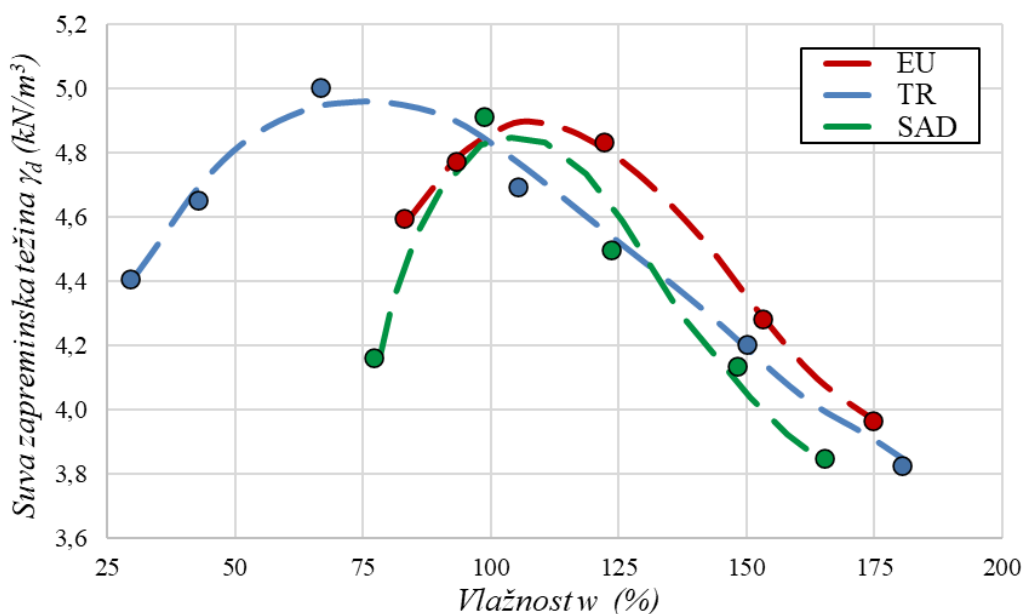
Slika 2.20: Rezultati modifikovanog Proktorovog opita (a- Wong, 2009; b- Hanson i sar., 2010)

Hanson i sar. (2010) objavili su studiju u kojoj su analizirali ponašanje komunalnog otpada tokom zbijanja u laboratorijskim i terenskim uslovima. Prilikom analize laboratorijskih uslova zbijanja

korišćeni su podaci koje je ranije objavio Wong (2009), uz nešto drugačiju interpretaciju Proktorove krive. Iz tog razloga, predloženi su minimalno izmenjeni parametri i to: maksimalna suva zapreminska težina (γ_{dmax}) od 5.2 kN/m³ i optimalna vlažnost (w_{opt}) od 65% (Slika 2.20b).

Pulat i Yukselen-Aksoy (2013) su zbog većih dimenzija kalupa i povećane energije koja se ostvaruje tokom zbijanja za modifikovan Proktorov opit, ispitivanja obavili na većem broju uzoraka koji su različito tretirani u odnosu na standardni Proktorov opit.

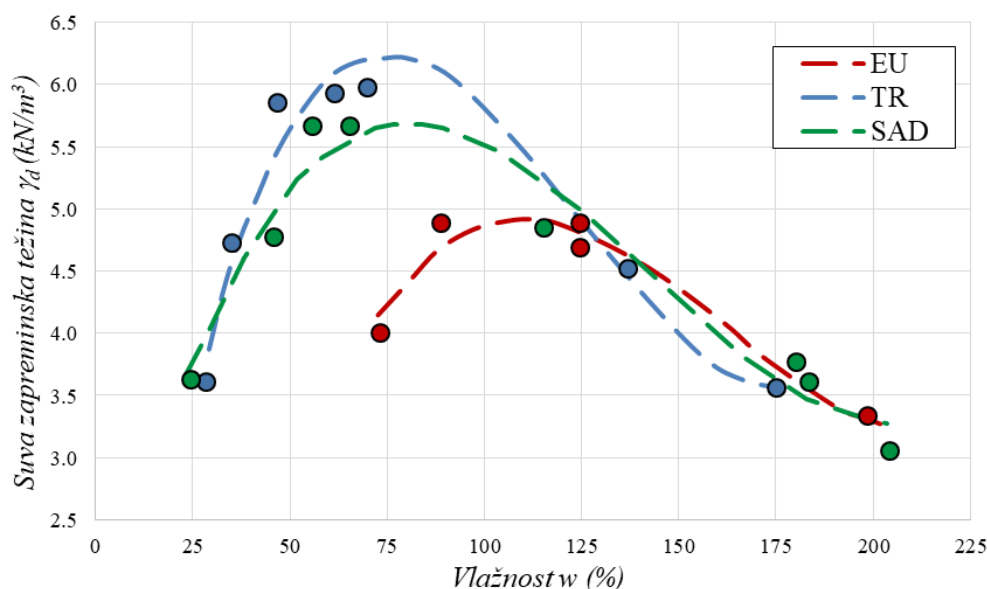
Sastav otpada je za prve dve grupe uzoraka bio isti kao i prilikom izvođenja standardnog Proktorovog opita (Slika 2.13). Rezultati modifikovanog Proktorovog opita prikazani su na Slici 2.21. Suprotno od standardnog Proktorovog opita, najviša vrednost maksimalne suve zapreminske težine (γ_{dmax}) od 4.96 kN/m³ dobijena je za sastav otpada koji odgovara TR, pri optimalnoj vlažnosti (w_{opt}) od 73%. Dobijeni rezultati su logičniji u odnosu na standardni Proktorov opit iz razloga što u tom sastavu ima najviši procenat pepela, finoznog materijala i ostalog otpada. U sastavu EU dobijena je maksimalna suva zapreminska težina (γ_{dmax}) od 4.9 kN/m³ za optimalnu vlažnost (w_{opt}) od 111%. Sastavu SAD odgovara maksimalna suva zapreminska težina (γ_{dmax}) od 4.84 kN/m³ uz optimalnu vlažnost (w_{opt}) od 104%.



Slika 2.21: Prikaz rezultata modifikovanog Proktorovog opita (Pulat i Yukselen-Aksoy, 2013)

Druga grupa uzoraka imala je za cilj utvrđivanje efekta starenja na zbijanje komunalnog otpada. Veštački pripremljeni uzorci izloženi su spoljnim uslovima u periodu od 30 dana. Poređenjem sa prvom grupom uzoraka uviđa se povećanje maksimalne suve zapreminske težine, što je prisutno u sva tri sastava (Slika 2.22).

Najveća razlika se uočava kod sastava otpada TR zbog najvećeg sadržaja organske materije (sadržaj organske materije je određen ranije za sve uzorke). Vrednost maksimalne suve zapreminske težine (γ_{dmax}) od 4.96 kN/m³ je porasla na 6.24 kN/m³. U druga dva sastava je primećena nešto manja razlika.



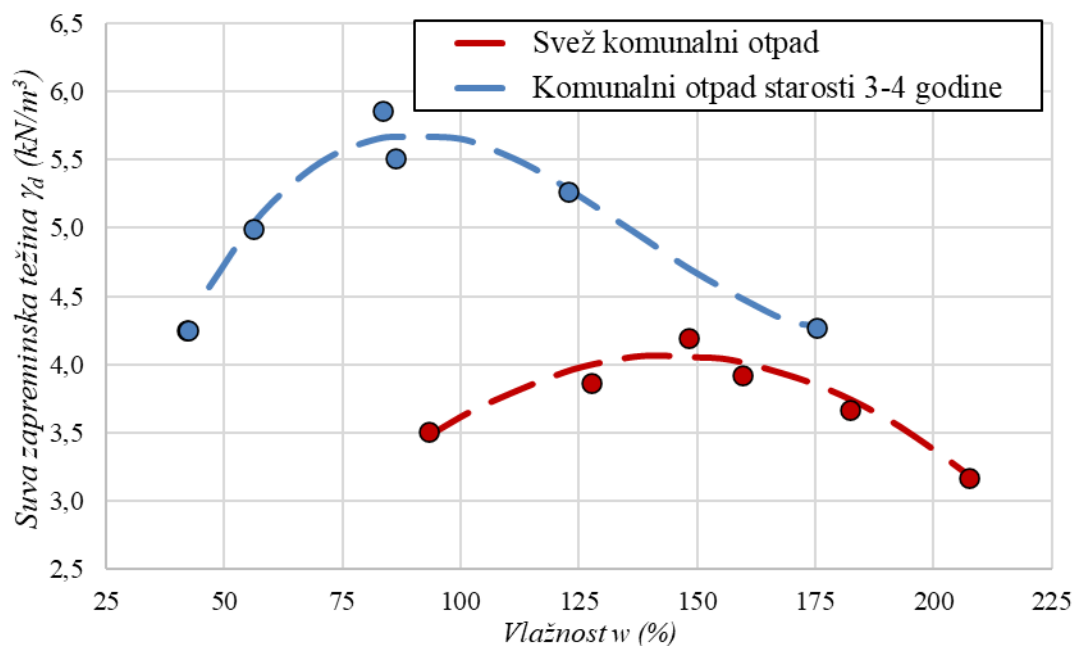
Slika 2.22: Rezultati modifikovanog Proktorovog opita za uzorke izložene spoljnim uslovima (Pulat i Yukselen-Aksoy, 2013)

U Tabeli 2.3. prikazani su rezultati svih opita rađenih za veštački formirane uzorke (TR, EU i SAD). Opšti zaključak je da se sa povećanjem energije i izloženosti spoljnim uslovima povećava maksimalna suva zapreminska težina i smanjuje optimalna vlažnost, što je slučaj i kod tla.

Tabela 2.3: Promene rezultata zbijanja u odnosu na vrstu opita (Pulat i Yukselen-Aksoy, 2013)

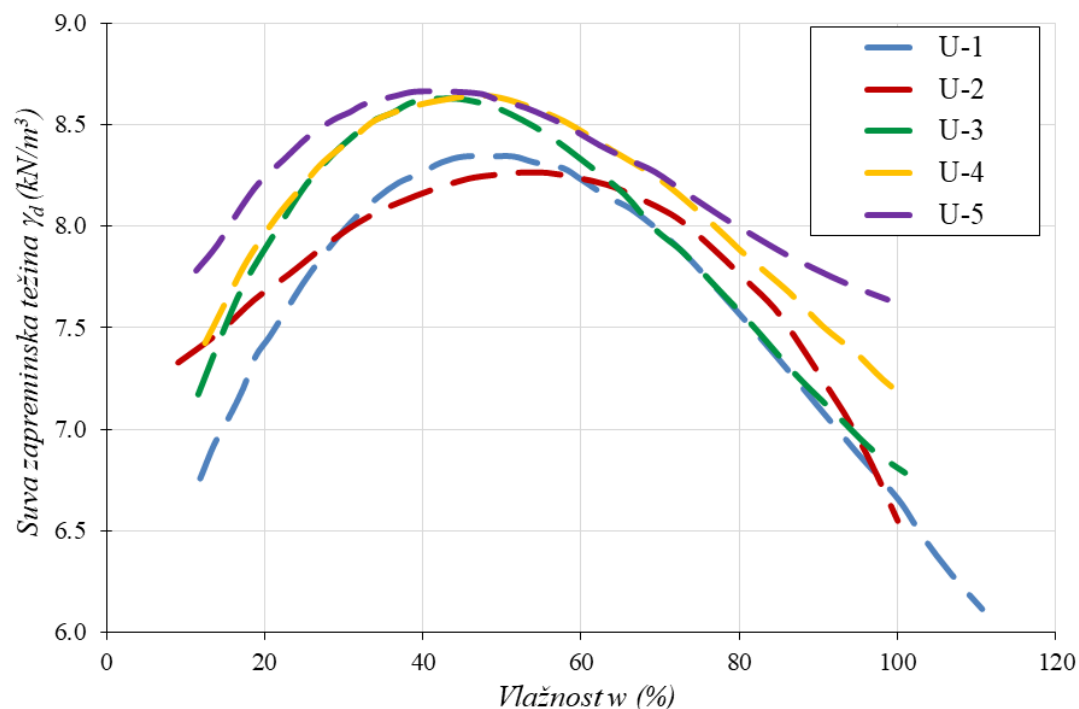
		Standardni Proktorov opit	Modifikovan Proktorov opit	Modifikovan Proktorov opit (uzorak izložen spoljnim uslovima)
γ_{dmax} (kN/m^3)	TR	3.67	4.96 ↑	6.24 ↑↑
	EU	3.72	4.90 ↑	4.97 ↑↑
	SAD	3.80	4.84 ↑	5.68 ↑↑
w_{opt} (%)	TR	138	73 ↓	68 ↓↓
	EU	162	111 ↓	110 ↓↓
	SAD	158	104 ↓	85 ↓↓

Trećoj grupi pripadaju uzorci svežeg i komunalnog otpada starog 3-4 godine koji su uzeti sa deponije u Manisi, Republika Turska. Rezultati ispitivanja prikazani su na Slici 2.23. Svež komunalni otpad ima maksimalnu suhu zapreminsku težinu (γ_{dmax}) oko 4.0 kN/m^3 pri optimalnoj vlažnosti oko (w_{opt}) 150%, dok komunalni otpad starosti 3-4 godine ima maksimalnu suhu zapreminsku težinu (γ_{dmax}) oko 5.5 kN/m^3 pri optimalnoj vlažnosti oko 90%.



Slika 2.23: Prikaz rezultata modifikovanog Proktorovog opita za svež i komunalni otpad starosti 3-4 godine (Pulat i Yukselen-Aksoy, 2013)

Endait i Patil (2020) su formirali uzorke prema istom sastavu kao što je bio slučaj kod standardnog Proktorovog opita (Slika 2.16).



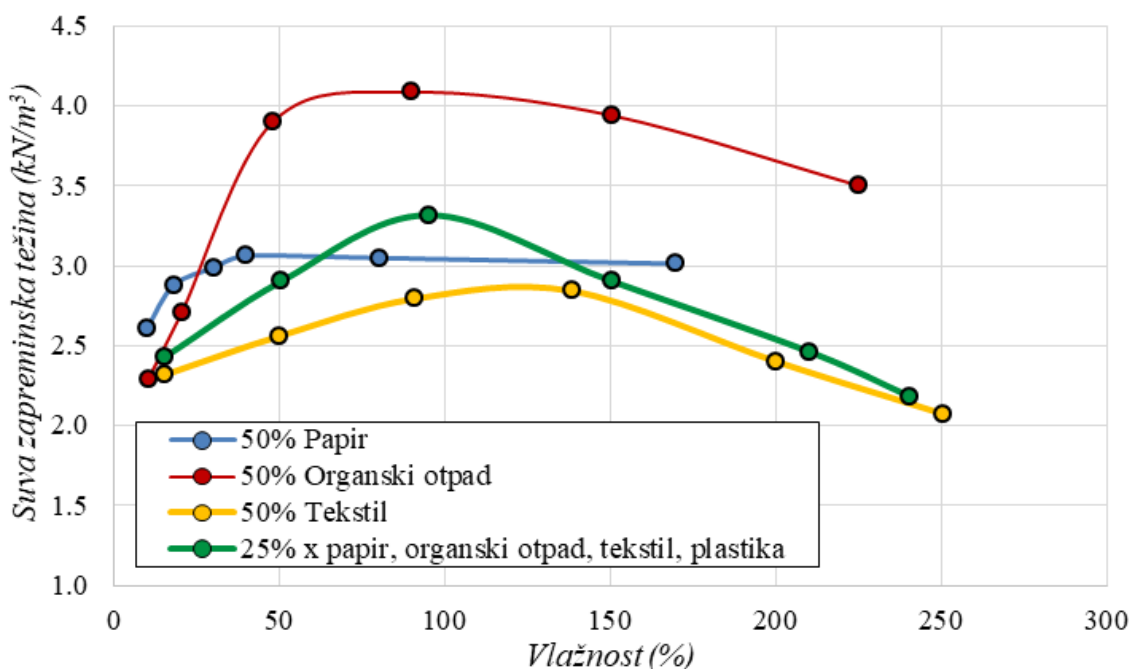
Slika 2.24: Rezultati Proktorovog opita pri energiji zbijanja $E=2682 \text{ kJ/m}^3$ (Endait i Patil, 2020)

Poređenje rezultata standardnog i modifikovanog Proktorovog opita prikazano je u Tabeli 2.4. Kao što je bio slučaj i kod prethodno navedenih autora, povećanjem energije zbijanja, povećava se maksimalna suva zapreminska težina, dok se optimalna vlažnost kod starijih uzoraka (U-3, U-4 i U-5) smanjuje.

Tabela 2.4: Rezultati standardnog i modifikovanog Proktorovog opita (Endaiti i Patil, 2020)

		E=552 kJ/m ³				
		U-1	U-2	U-3	U-4	U-5
γ_{dmax} (kN/m ³)		7.95	8.20	8.45	8.40	8.58
W_{opt} (%)		52.5	50.0	41.91	50.0	45.0
		E=2682 kJ/m ³				
		U-1	U-2	U-3	U-4	U-5
γ_{dmax} (kN/m ³)		8.65	8.78	9.35	9.09	9.51
W_{opt} (%)		53.77	57.14	36.35	38.05	37.45

Okonta i sar. (2018) radili su modifikovan Proktorov opit na komunalnom otpadu koji je uzet iz dve duboke jame sa deponije Robinson Deep u Johanezburgu. Za potrebe laboratorijskih istraživanja rekonstruisali su sastav otpada, gde su za većinu uzoraka uzeli dominantnu komponentu a ostale podelili na jednake delove, osim jednog uzorka, gde su sve komponente bile u jednakom procentu (25%) i to: papir, organski otpad, plastika i tekstil. Krupni čvrsti stenski otpad, staklo i metal nisu uzeti u obzir zbog malog procenta u sastavu, ali i zbog poteškoća koje stvaraju tokom samog zbijanja. Rezultati modifikovanog Proktorovog opita prikazani su na Slici 2.25.



Slika 2.25: Prikaz rezultata modifikovanog Proktorovog opita (Okonta i sar., 2018)

Sve uzorke karakteriše visoka vrednost optimalne vlažnosti (Tabela 2.5). Razlog za to se ogleda u činjenici da je u pitanju svež otpad. Sadržaj organske komponente je u svim sastavima preko 15%.

Kao jedan od ključnih zaključaka ovog istraživanja, autori navode činjenicu da prilikom zbijanja komunalnog otpada sadržaj plastike igra ključnu ulogu. Naime, ukoliko uzorak sadrži manje od 25% plastike, moguće ga je zbijati i koristiti adekvatno parametre zbijanja za analize (ova vrednost je usvojena iz razloga što su sastavi sa manjim procentom plastike uspešno zbijani). Međutim, ako uzorak sadrži više od 25% plastike, nije moguće izvesti opit. Iz ovog razloga, rezultati za uzorak koji sadrži 50% komponente plastike nije grafički prikazan jer rezultati nisu validni.

Tabela 2.5: Pregled rezultata modifikovanog Proktorovog opita (Okonta i sar., 2018)

SASTAV	50% papir	50% organska komponenta	50% plastika	50% tekstil	25% svih komponenti
γ_{dmax} (kN/m ³)	3.07	4.10	2.18	2.83	3.3
w_{opt} (%)	40.0	91.3	16.7	133.3	93.0

S obzirom da se modifikovanim Proktorovim opitom postiže veća energija zbijanja, autori ga smartaju pogodnijim za određivanje parametara zbijanja komunalnog otpada. Mogući razlog za to je što je za uspešno zbijanje komunalnog otpada neophodna teža mehanizacija kako bi se postigla veća energija zbijanja, nego što je to slučaj kod zemljanih nasipa. Kroz navedenu literaturu, maksimalna suva zapreminska težina (γ_{dmax}) varira okvirno od 2 kN/m³ do 10 kN/m³, dok se optimalna vlažnost (w_{opt}) kreće od oko 20% pa sve do 140%. Ovako široki interval parametara zbijanja zavisi od nekoliko faktora kao što su: starost i degradacija otpada, sastav otpada, način pripreme uzorka i sl. Neophodno je pomenuti da svež otpad ima značajno veću vlažnost zbog povećanog sadržaja organske materije.

U Tabeli 2.6. sistematizovani su rezultati dobijeni zbijanjem komunalnog otpada modifikovanim Proktorovim opitom.

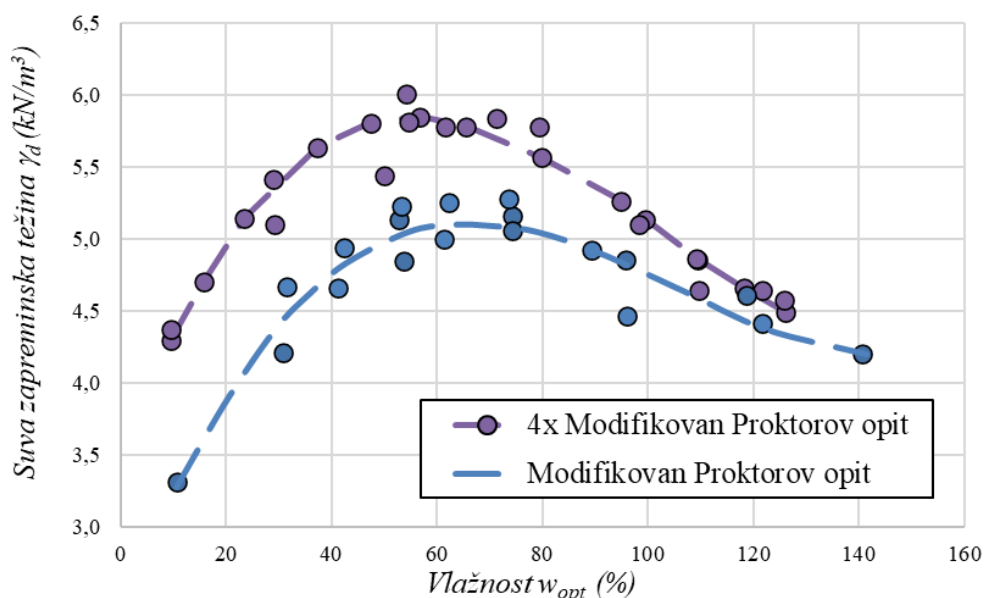
Tabela 2.6: Parametri zbijanja komunalnog otpada dobijeni modifikovanim Proktorovim opitom

Autori	Parametri zbijanja		Napomena
	γ_{dmax}	w_{opt}	
	(kN/m ³)	(%)	
Itoh i sar. (2005)	5.9	20	Spaljen i otpad koji nije spaljen
Von Stockhausen (2007)	5.6	42	Veštački formiran uzorak (USEPA)
Wong (2009)	5.1	66	Veštački formiran uzorak (USEPA)
Hanson i sar. (2010)	5.2	65	Veštački formiran uzorak (USEPA)
H.F. Pulat & Y. Yukselen-Aksoy(2013)	4.84 (SAD)	104 (SAD)	Veštački formirani uzorci koji odgovaraju sastavu komunalnog otpada Sjedinjenih Američkih država (SAD), Evrope (EU) i Republike Turske (TR). (*) Uzorci su bili izloženi spoljašnjim vremenskim uslovima 30 dana
	*5.68(SAD)	*80 (SAD)	
	4.90 (EU)	110 (EU)	
	*4.97 (EU)	*111 (EU)	
	4.96 (TR)	73	
Mahesh Endait Swati Patil (2020)	8.65	53.77	Svež otpad
	8.78	57.14	Uzorak starosti dva meseca
	9.35	36.35	Uzorak starosti pet godina
	9.09	38.05	Uzorak starosti 10 godina
	9.51	37.45	Uzorak starosti 15 godina
Okonta i sar. (2018)	3.07	85	Preko 50% uzorka je papir
	4.1	91.3	Preko 50% uzorka je organski otpad
	2.18	16.7	Preko 50% uzorka je plastika
	2.83	133.3	Preko 50% uzorka je tekstil

2.2.3. Rezultati dobijeni nestandardnim metodama ispitivanja

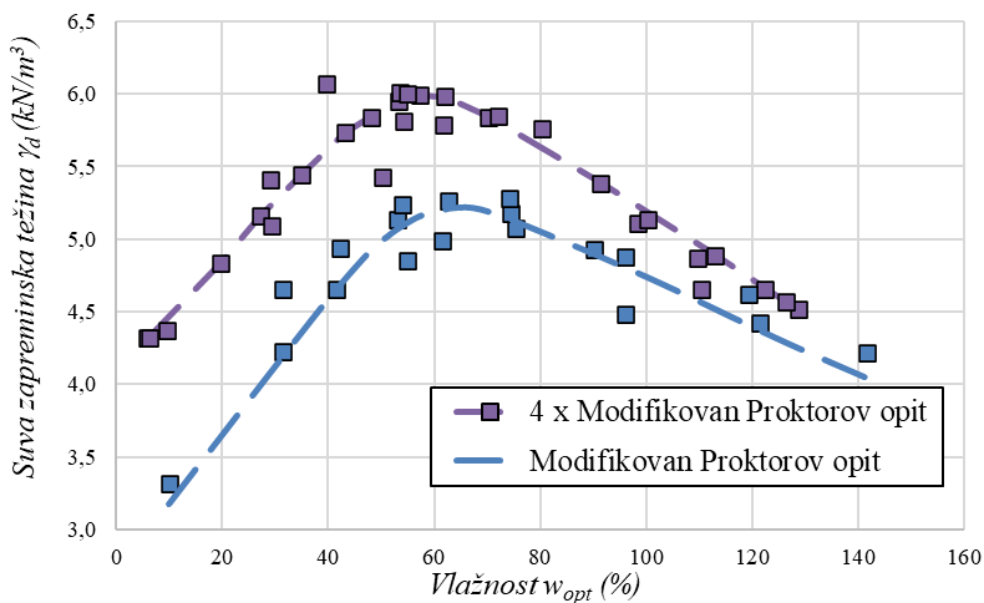
Za laboratorijsko određivanje parametara komunalnog otpada najčešće se koriste konvencionalne metode koje se primenjuju u mehanici tla. To se uglavnom odnosi na standardni i modifikovan Proktorov opit. Međutim, kao što je već rečeno, za zbijanje komunalnog otpada na deponijama koristi se oprema koja proizvodi dosta veću energiju zbijanja. Iz ovog razloga, autori sve češće pokušavaju da prilagode opremu karakteristikama otpada. Međutim, implementacija nove opreme predstavlja prilično zahtevan posao pa se najčešće rešenje traži u već postojećoj opremi koja je dostupna u laboratorijama. Kao jedan od načina „prilagođavanja“ je povećavanje broja udaraca u Proktorovom kalupu, kako bi se postigla veća energija zbijanja.

Wong (2009) je prvi izveo opit tako da povećanjem broja udaraca u kalupu za modifikovan Proktorov opit postigne veću energiju zbijanja. Sa pet puta po 224 udarca po sloju postignuta je energija zbijanja od oko $10\ 800\ \text{kJ/m}^3$. Opit je nazvao „4 puta modifikovan“ Proktorov opit. Za isti sastav kao i kod modifikovanog Proktorovog opita dobio je maksimalnu suhu zapreminsku težinu ($\gamma_{d\max}$) od $5.9\ \text{kN/m}^3$ pri optimalnoj vlažnosti (w_{opt}) od 56% (Slika 2.26). Ovim drugačijim pristupom ostvarena je veća maksimalna suva zapreminska težina i manja optimalna vlažnost nego što je to bio slučaj kod klasičnog modifikovanog Proktorovog opita.



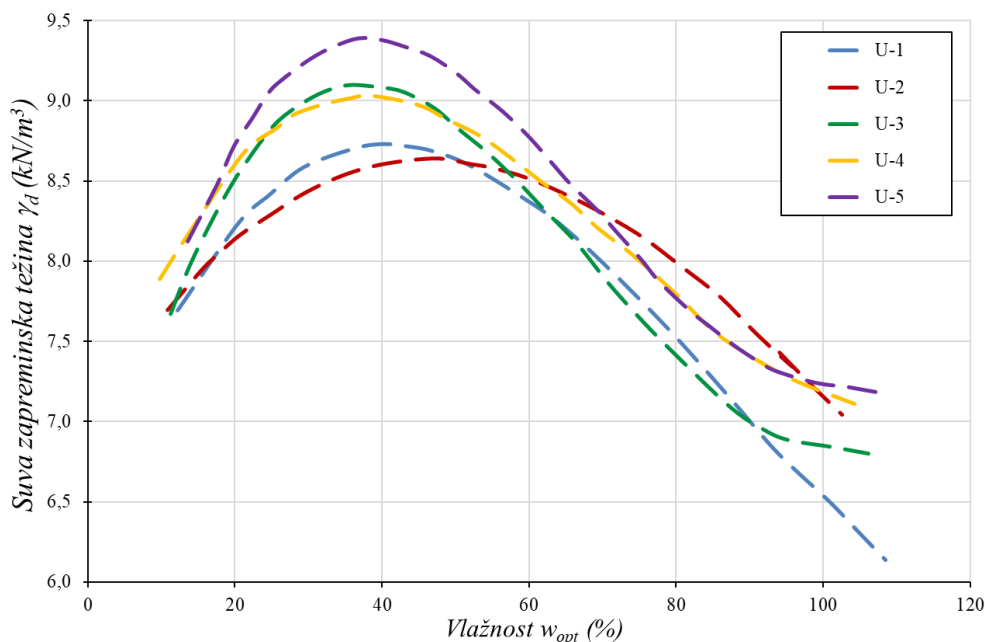
Slika 2.26: Rezultati Proktorovog opita (Wong, 2009)

Hanson i sar. (2010) su vršili interpretaciju i ovih rezultata u svojoj studiji (Slika 2.27). Kao zaključak naveli su minimalnu razliku za maksimalnu suhu zapreminsku težinu ($\gamma_{d\max}$) od $6.0\ \text{kN/m}^3$ uz istu optimalnu vlažnost (w_{opt}) u odnosu na Wonga (2009).

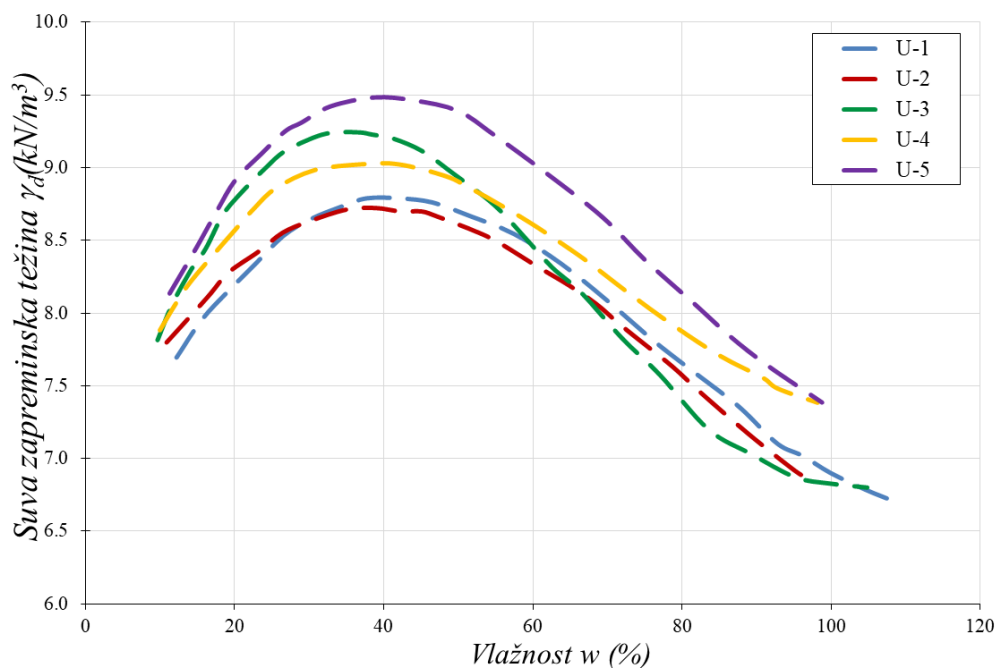


Slika 2.27: Rezultati Proktorovog opita (Hanson i sar., 2010)

Endait i Patil (2020) su pored standardnog i modifikovanog Proktorovog opita uradili i dva nestandardna opita. Duplim povećanjem broja udaraca po sloju u kalupu za standardni i modifikovan Proktorov opit ostvarili su energiju zbijanja od 1125 kJ/m^3 i 5364 kJ/m^3 (Slika 2.28 i Slika 2.29). Rezultati ukazuju na isto ponašanje komunalnog otpada koje su konstatovali autori u ranijim studijama da se povećanjem energije zbijanja povećava maksimalna suva zapreminska težina a smanjuje optimalna vlažnost.

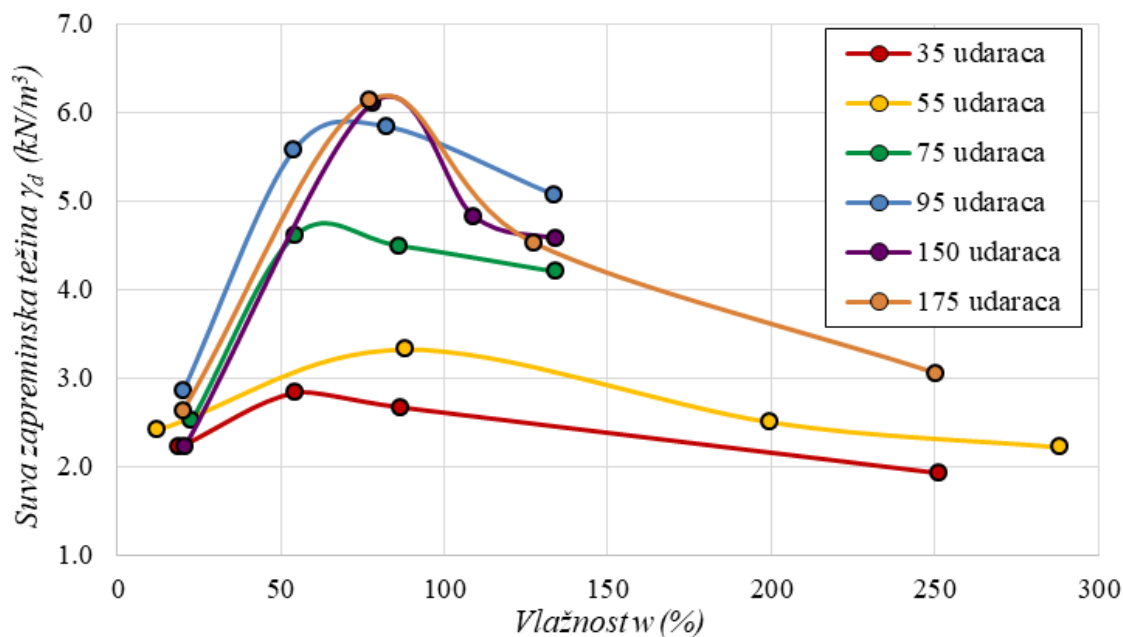


Slika 2.28: Rezultati Proktorovog opita pri energiji zbijanja $E=1125 \text{ kJ/m}^3$ (Endait i Patil, 2020)



Slika 2.29: Rezultati Proktorovog opita pri energiji zbijanja $E=5364 \text{ kJ/m}^3$ (Endait i Patil, 2020)

Okonta i sar. (2018) su u svojoj studiji pokazali kako broj udaraca utiče na parametre zbijanja komunalnog otpada. Na Slici 2.30 se vidi da sa povećanjem broja udaraca raste i maksimalna suva zapreminska težina.



Slika 2.30: Uticaj broja udaraca (promene energije) na suvu zapreminsku težinu (Okonta i sar., 2018)

U Tabeli 2.7 sistematizovani su rezultati nestandardnog ispitivanja komunalnog otpada.

Tabela 2.7: Parametri zbijanja komunalnog otpada dobijeni nestandardnim energijama zbijanja

Autori	Parametri zbijanja		Detalji vezani za ispitivanje	Energija zbijanja
	γ_{dmax}	w_{opt}		
	(kN/m ³)	(%)		kJ/m ³
Wong (2009)	5.9	56	Veštački formiran uzorak (USEPA)	4 x modifikovan Proktorov opit
Hanson i sar. (2010)	6.0	56	Veštački formiran uzorak (USEPA)	4 x modifikovan Proktorov opit
Mahesh Endait Swati Patil (2020)	8.27	58.79	Svež otpad	2 x standardni Proktorov opit
	8.47	57.14	Uzorak starosti dva meseca	
	8.78	39.04	Uzorak starosti pet godina	
	8.70	39.25	Uzorak starosti 10 godina	
	8.73	38.67	Uzorak starosti 15 godina	
	8.82	51.23	Svež otpad	2 x modifikovani Proktorov opit
	8.77	48.30	Uzorak starosti dva meseca	
	9.44	34.26	Uzorak starosti pet godina	
	9.37	37.62	Uzorak starosti 10 godina	
	9.68	36.76	Uzorak starosti 15 godina	

Analizom rezultata standardnog i modifikovanog Proktorovog opita, kao i nestandardnih opita sa korekcijom energije zbijanja, dolazi se do nekoliko najvažnijih zaključaka:

- svež otpad ima značajno veću početnu vlažnost, a samim tim i povećanu vrednost optimalne vlažnosti na krivama zbijanja u odnosu na star otpad;
- povećanjem energije zbijanja, dobija se veća maksimalna suva zapreminska težina (γ_{dmax}) i niža optimalna vlažnost (w_{opt});
- s obzirom da u telu deponije vremenom dolazi do smanjenja veličine frakcija i promene granulometrijskog sastava otpada, pre svega usled procesa degradacije, a delimično i razaranja tokom procesa zbijanja, opšti trend je da kod starijeg komunalnog otpada imamo veće vrednosti maksimalne suve zapreminske težine (γ_{dmax});
- kako bi se vršilo poređenje rezultata, potrebno je poznavanje određenih faktora koji utiču na zbijanje komunalnog otpada prilikom ispitivanja, i to: starost i sastav otpada, način uzorkovanja, granulometrijski sastav ispitivanog otpada, specifičnu težinu, kao i početnu vlažnost.

Iako se na osnovu analize rezultata iz literaturnih podataka ne izvode zaključci koji se puno razlikuju u odnosu na rezultate konvencionalne metode „mehanike tla“, većina autora ipak ukazuje na osetne razlike u laboratorijskom tretiranju komunalnog otpada. Ovo se prevashodno odnosi na usklađivanje opreme sa komunalnim otpadom. U prethodno obrađenoj literaturi, sastav i dimenzije komponenti komunalnog otpada su prilagođavani postojećoj aparaturi, pa otuda i sličnost u zaključcima.

Ispravno bi bilo da se aparatura prilagodi heterogenom materijalu kao što je komunalni otpad na kom se pored zbijanja paralelno vrši i razaranja, uz značajno veću energiju zbijanja. Tek ovako dobijeni rezultati bi dali potpunu sliku.

Tokom analize literaturnih podataka za potrebe izrade doktorske disertacije, često sam nailazila na nelogičnosti koje nisu objašnjene od strane autora kroz studije i stručne radove. Ovo je često bio razlog za nemogućnost poređenja rezultata, ali i za dovođenje istih u pitanje.

Kompleksnost formiranja uzoraka i iskustvo dobijeno prilikom rada u laboratoriji na veštački formiranim uzorcima, često su bile uzrok da se postave određena pitanja, od kojih sam izdvojila sledeće:

- Prilikom izvođenja standardnog i modifikovanog Proktorovog opita, ali i nestandardnih laboratorijskih opita na svežem komunalnom otpadu, Proktorove krive su interpretirane u rasponu vlažnosti do čak 250%. Ovakav slučaj je konstatovan kod mnogih autora (*Hettiarachchi, 2005; Pulat i Aksoy, 2013; Okonta i sar., 2018 itd.*).

Postavlja se pitanje, kako izgleda materijal sa 250% vlažnosti, i kako je praktično moguće izvesti u laboratoriji takav opit?

- Najveći broj autora Proktorove krive definiše kao polinom trećeg reda. Međutim, analizom rezultata došla sam do zaključka da ih autori često bez objašnjenja koriguju. Kao primer u prethodnom tekstu možemo primetiti razliku tumačenja rezultata između *Wonga (2009)* i *Hansona (2010)*. Definisali su krive različitog oblika sa sličnim rezultatima. U oba slučaja je ignorisan način pripreme uzorka, što bi zahtevalo promenu pristupa u izvođenju Proktorove krive.

Međutim, postavlja se pitanje, koliko je ova subjektivnost prilikom interpretacije preporučljiva ako se teži standardizaciji laboratorijskih opita za komunalni otpad (a posebno ako ona na neki način nije definisana)?

2.3. Literaturni podaci vezani za terenska ispitivanja otpada

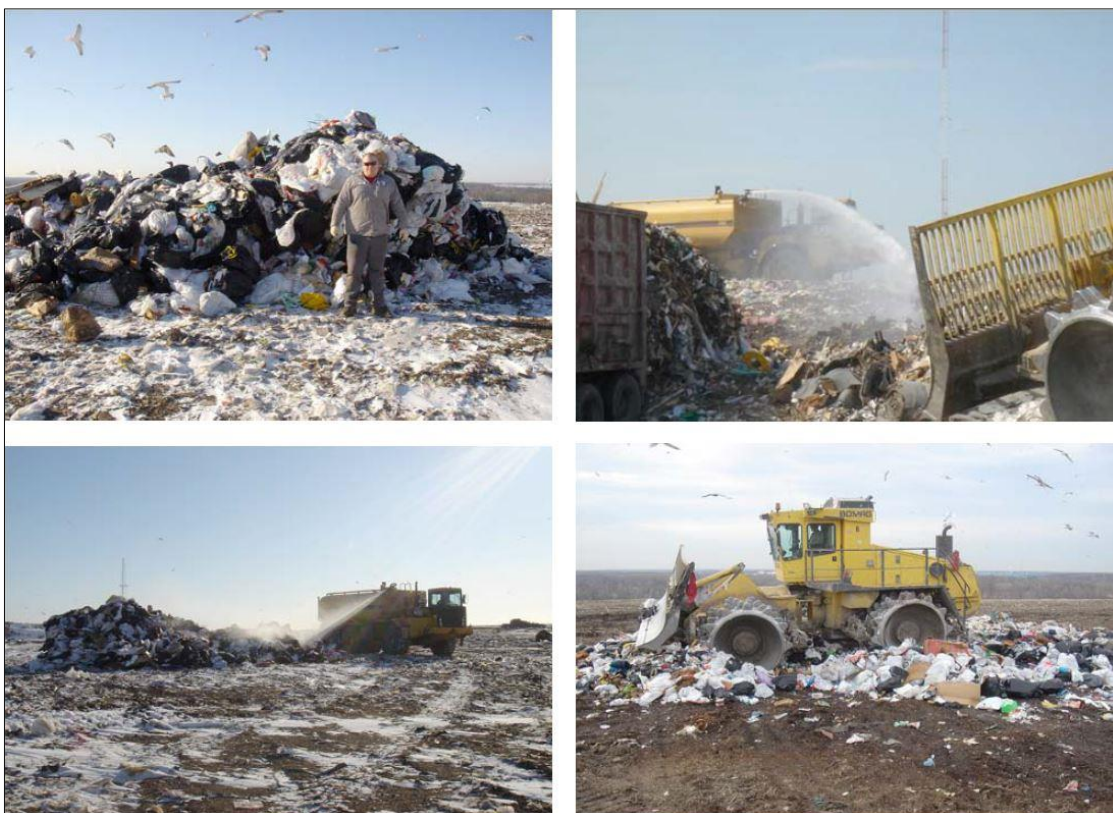
Terenski opiti (*in-situ*) na deponijama kojima se vrši ispitivanje zbijanja komunalnog otpada svakako predstavljaju način da se dobiju najrealnije vrednosti parametara zbijanja. Razlozi za to su višestruki, a pre svega se odnose na činjenicu da nema nikakve modifikacije u razmeri i da je komunalni otpad na deponiji u „prirodnom“ stanju zbijenosti i vlažnosti.

Kao i u laboratoriji, rezultati opita se najčešće izražavaju maksimalnom suvom zapreminskom težinom (γ_{dmax}) i optimalnom vlažnošću (w_{opt}), uz uvođenje parametara koji se uglavnom odnose na operativnost deponije komunalnog otpada. Međutim, opiti se teško izvode i izuzetno su skupi, posebno ako je potreban veći broj podataka za dobijanje reprezentativnih parametara zbijanja komunalnog otpada. To je verovatno razlog za skromnu literaturu koja je dostupna (*Von Stockhausen, 2007; Hanson i sar., 2010; Cox i sar., 2015*).

Hanson i sar. (2010) vršili su terenska ispitivanja komunalnog otpada na probnom polju deponije Mičigen, SAD (Slika 2.31). Za istraživanje koristili su pristigli otpad bez izmene veličine i oblika frakcija uz upotrebu uobičajene opreme i procedure koja se koristi tokom zbijanja na deponiji. Slično kao u laboratoriji, analizirana je energija zbijanja, sadržaj vlažnosti i suva zapreminska težina. Primenjen je standardni proces zbijanja otpada na deponiji tj. razastiranje otpada na takozvanu „radnu površinu“ u slojevima debljine oko 0.5 m nakon čega kompaktor u nekoliko prelaza zbija komunalni otpad. Radna površina je oko 1400 m². Svaki kompaktor je težine oko 530 kN.

Kako bi se pratila vertikalna pomeranja prilikom zbijanja komunalnog otpada korišćen je komercijalni GPS sistem. Praćene su promene na svakih 1,5 m², u predhodno formiranoj tzv. „mreži“. Smatra se da je zbijanje uspešno završeno ukoliko je vertikalna razlika u dva prelaza valjka manja od 120 mm.

Zapremina otpada na terenu tokom zbijanja određena je kao razlika između dva vertikalna merenja koja su dobijena iz prethodne i trenutne operativne sesije u intervalu od jedan dan. Težina otpada je dobijena merenjem kamiona prilikom dovoženja otpada. Zbijena zapreminska težina dobija se iz poznate početne težine komunalnog otpada i zapremine otpada nakon zbijanja (podaci su dobijeni pomoću GPS-a).



Slika 2.31: Prikaz odlaganja komunalnog otpada na probno polje, dodavanje vode i zbijanje (Hanson i sar. 2010)

Tokom istraživanja, uočene su razlike u sezonskim efektima. Posebno su analizirani uslovi zbijanja u letnjem (4 uzorka), a posebno u zimskom periodu (7 uzoraka). Efekti operativnih uslova zbijanja su istraživani kroz variranje vlažnosti otpada u datim sezonama i nadgledanjem uslova zbijanja uzimajući u obzir pređeno rastojanje kompaktora i vremenskog trajanja zbijanja. Prethodno su utvrđene količine vode potrebne kako bi se zbijanje obavilo po unapred definisanim uslovima, nakon čega je voda rasprašivana na probno polje, sa posebnim osvrtom da jednaka količina vode bude na celom polju.

Indeks zbijanja, definisan za potrebe terenskog istraživanja, kao pokazatelj energije zbijanja je:

$$E = \frac{WD}{V} \quad (2.1)$$

gde su:

E- indeks zbijanja (kJ/m³)

W- težina kompaktora (kN)

D- dužina koju je kompaktor prešao tokom ispitivanja (m)- *dobijena GPS-om*

V- zapremina otpada (m³)- *dobijena GPS-om*

Tri zapreminske težine korišćene su u analizi karakteristika zbijanja otpada, i to: suva zapreminska težina (γ_d), operativna zapreminska težina (γ_{oper}) i zapreminska težina provlaženog otpada (γ_u). Definicije za suhu (γ_d) i zapreminsku težinu provlaženog otpada (γ_u) su iste kao i u geotehničkom inženjerstvu, dok se operativna zapreminska težina (γ_{oper}) odnosi na težinu prispelog otpada prirodne vlažnosti, bez uticaja dodate vode tokom provlažavanja. Operativna zapreminska težina (γ_{oper}) je uvedena kako bi se procenio kapacitet deponije i ekonomski aspekti u praksi.

$$\gamma_d = \frac{\text{Težina suvih frakcija (čestica)}}{\text{Ukupna zbijena zapremina}} \quad (2.2)$$

$$\gamma_{oper} = \frac{\text{Težina pristiglog otpada}}{\text{Ukupna zbijena zapremina}} \quad (2.3)$$

$$\gamma_u = \frac{\text{Težina pristiglog otpada} + \text{Težina dodate vode}}{\text{Ukupna zbijena zapremina}} \quad (2.4)$$

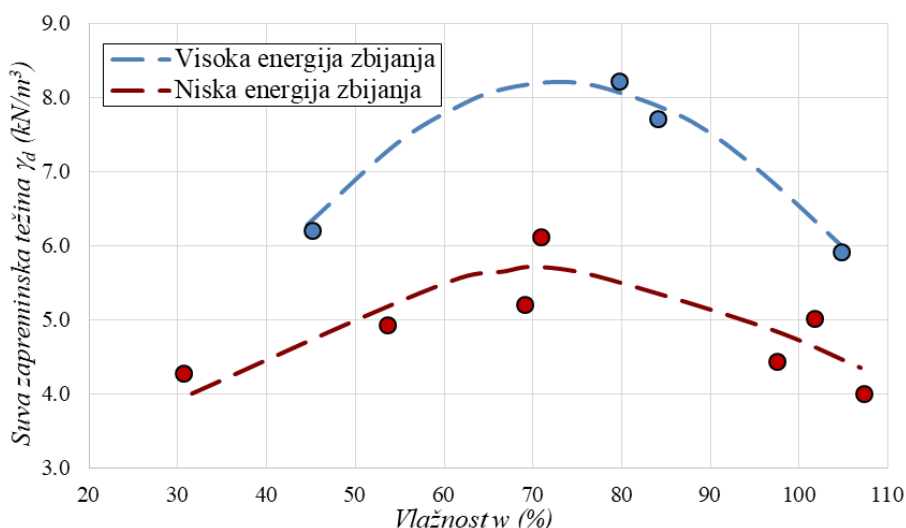
U Tabeli 2.8 prikazane su vrednosti parametara zbijanja koji su dobijeni terenskim istraživanjima. Tabela je formirana na osnovu porasta vlažnosti po sezonama (decembar-mart/ maj-jul). Temperatura vazduha za hladne vremenske uslove kretala se u intervalu od -3.9(°C) do 10(°C), a za tople vremenske uslove od 24.4(°C) do 31.7(°C).

Tabela 2.8: Prikaz parametara zbijanja dobijenih na terenu (Hanson i sar., 2010)

Datum	w	γ_d	γ_{oper}	γ_u	Trajanje testa	Energija zbijanja	
	(%)	(kN/m ³)	(kN/m ³)	(kN/m ³)	(min)	(kJ/m ³)	
HLADNI VREMENSKI USLOVI							
1.	11. XII. 2006.	30.6	4.3	5.6	5.6	6.33	2698*
2.	23.I.2006.	45.1	6.2	8.2	9.1	4.90	24031**
3.	15.II.2007.	69.4	5.2	6.8	8.8	8.91	4457*
4.	13.XII.2006.	79.5	8.2	10.7	14.7	5.82	34901**
5.	12.XII.2006.	84.1	7.7	10.0	14.1	3.92	26027**
6.	21.III.2007.	104.9	5.9	7.7	12.1	5.29	23452**
7.	19.XII.2006.	107.2	4.0	5.2	8.3	8.06	2516*
TOPLI VREMENSKI USLOVI							
8.	13.VI.2007.	53.4	4.9	7.6	7.6	6.77	3163*
9.	29.VI.2007.	70.5	6.1	9.4	10.5	6.32	3703*
10.	9.VII.2007.	97.6	4.4	6.8	8.8	5.86	5513*
11.	25.V.2007.	102.1	5.0	7.7	10.2	5.25	2847*
*niska energija zbijanja							
**visoka energija zbijanja							

Maksimalna izmerena suva zapreminska težina za hladne uslove $\gamma_{d(\text{hladni uslovi})}$ je 8.2 kN/m^3 pri odgovarajućoj vlažnosti od 79.5%. Za tople uslove maksimalna suva zapreminska težina $\gamma_{d(\text{topli uslovi})}$ iznosila je 6.1 kN/m^3 pri vlažnosti od 70.5%. Odgovarajuće operative zapreminske težine (γ_{oper}) iznosile su 10.7 i 9.4 kN/m^3 . Hladni vremenski uslovi su zahtevali višu energiju zbijanja kako bi se postigao traženi kriterijum u odnosu na tople vremenske uslove. Ovo se pripisuje povećanoj krutosti komunalnog otpada pri nižim temperaturama.

Krive zbijanja prikazane su na Slici 2.32, i to za dva nivoa energije zbijanja: niske do 6000 kJ/m^3 , i visoke preko $20\,000 \text{ kJ/m}^3$.



Slika 2.32: Rezultati terenskog istraživanja komunalnog otpada (Hanson i sar., 2010)

Maksimalna izmerena suva zapreminska težina ($\gamma_{d\text{max}}$) za nižu energiju zbijanja iznosi 5.7 kN/m^3 pri vlažnosti od 70%. Za višu energiju zbijanja maksimalna suva zapreminska težina ($\gamma_{d\text{max}}$) iznosi 8.2 kN/m^3 pri vlažnosti od 79%. Kao što se vidi na Slici 2.32, maksimalna suva zapreminska težina prilikom povećanja energije raste, dok je vlažnost relativno slična kod oba opita.

Cox i sar. (2015) sprovedli su terenska istraživanja komunalnog otpada kako bi procenili uticaj odlaganja otpada na inženjerske karakteristike deponije. Uslovi tokom odlaganja komunalnog otpada varirali su u zavisnosti od dodavanja vode tokom odlaganja. Program testiranja je sproveden na regionalnoj deponiji Santa Marija, Kalifornija (SAD).

Autori su vršili dva tipa terenskih istraživanja i to: na probnom polju (*meso-scale*) i na radnom delu aktivne deponije (*full scale*) bez modifikacije ulaznih podataka. U oba slučaja korišćena je metoda 2:1, što bi značilo da je otpad dva dana odlagan, nakon čega mu je tokom jednog dana dodavana voda do ciljane vlažnosti.

Na probnom polju (Slika 2.33a), formirane su dve parcele gde je svakodnevno u jednom sloju odlagan otpad težine oko 900 kN . Dimenzije parcele su $31 \text{ m} \times 11 \text{ m}$, dok je ukupna visina zbijenog otpada iznosila oko 4.6 m . Komunalni otpad je razastiran, vlažen i zbijan istom opremom koja se uobičajeno koristi na deponiji. Istom procedurom, ali na skoro duplo većoj površini ($15 \text{ m} \times 41 \text{ m}$) rađena su istraživanja na aktivnoj deponiji (Slika 2.33b).



Slika 2.33: Provlažavanje otpada: a) probno polje i b) aktivna deponija (Cox i sar., 2015)

Dobijeni podaci tokom terenskih istraživanja analizirani su na isti način kao i kod Hanson i sar. (2010) kroz tri različite zapreminske težine (γ_d , γ_{oper} i γ_u) uz uvođenje novog parametra za operativnost deponije (OWPF) za koji su autori predložili sledeći način računanja:

$$OWPF = \frac{\gamma_{oper-mc}}{\gamma_{oper-ar}} \quad (2.5)$$

gde su:

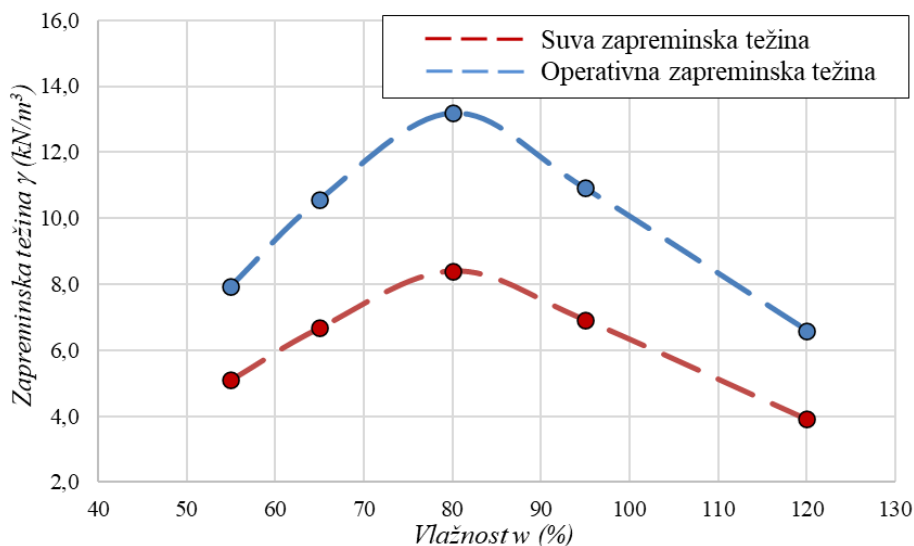
OWPF- faktor operativnog odlaganja otpada

$\gamma_{oper-mc}$ - zapreminska težina sa naknadnim dodavanjem vode

$\gamma_{oper-ar}$ - zapreminska težina bez dodavanja vode (početna vlažnost)

Kada je $OWPF > 1$, ukazuje da se više otpada može odložiti pri datom sadržaju vlažnosti nego što je slučaj pri početnom sadržaju vlažnosti, dok $OWPF < 1$ ukazuje da se manje otpada može odložiti pri datom sadržaju vlažnosti u odnosu na početni sadržaj.

Rezultati za oba pristupa terenskim istraživanjima, prikazani su tabelarno (Tabela 2.9) i grafički (Slika 2.34).



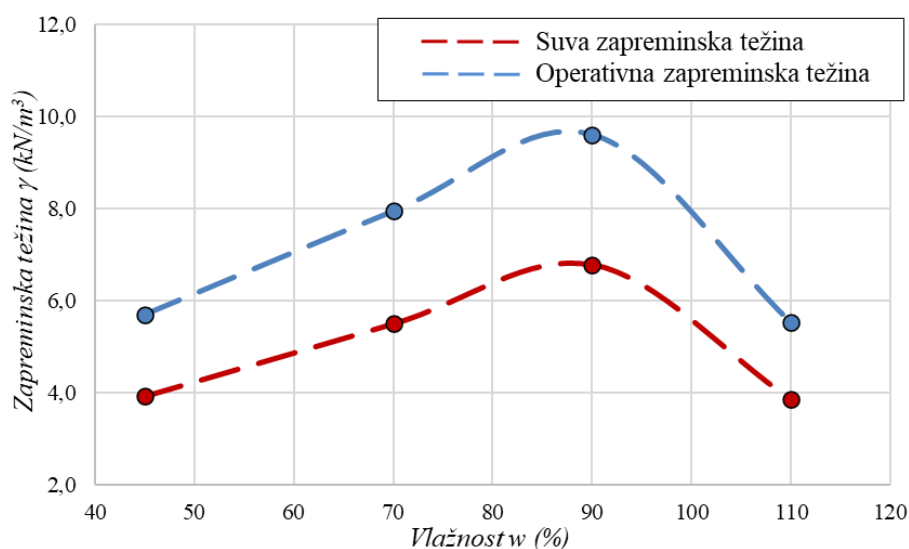
Slika 2.34: Grafički prikaz parametara zbijanja na probnom polju (Cox i sar., 2013)

Maksimalna suva zapreminska težina na probnom polju iznosi (γ_{dmax}) 8.4 kN/m^3 , pri optimalnoj vlažnosti od (w_{opt}) od 80.0%. Operativna suva maksimalna težina ($\gamma_{dmax-oper}$) iznosi 13.2 kN/m^3 pri optimalnoj vlažnosti ($w_{opt-oper}$) od 80.0%.

Tabela 2.9: Prikaz parametara zbijanja dobijenih na probnom polju (Cox i sar., 2015)

w	γ_d	γ_{oper}	γ_u	Faktor operativnog odlaganja otpada (OWPF)
(%)	(kN/m ³)	(kN/m ³)	(kN/m ³)	
55	5.10	7.95	7.95	1
65	6.68	10.58	11.31	1.33
80	8.41	13.20	15.33	1.66
95	6.92	10.91	13.49	1.37
120	3.91	6.60	8.66	0.83

Maksimalna suva zapreminska težina (γ_{dmax}) dobijena na aktivnoj deponiji je 6.8 kN/m³ pri optimalnoj vlažnosti od 90.0% (Slika 2.35). Maksimalna operativna zapreminska težina ($\gamma_{dmax-oper}$) iznosila je 9.6 kN/m³ pri optimalnoj vlažnosti od 90.0%.



Slika 2.35: Grafički prikaz parametara zbijanja na aktivnoj deponiji (Cox i sar., 2015)

Tabela 2.10: Prikaz parametara zbijanja dobijenih na aktivnoj deponiji (Cox i sar., 2015)

w	γ_d	γ_{oper}	γ_u	Faktor operativnog odlaganja otpada (OWPF)
(%)	(kN/m ³)	(kN/m ³)	(kN/m ³)	
45	3.93	5.70	5.70	1.00
70	5.50	7.94	9.36	1.39
90	6.78	9.60	12.88	1.68
110	3.86	5.52	8.10	0.97

Autori su ustanovili da bi se kapacitet deponije pri povećanoj vlažnosti u rasponu od 70% i 90% mogao povećati za oko 68%. Opšti zaključak je da se dodavanjem vode povećava zapreminska težina i količina odloženog otpada, uz značajan uticaj na životni vek deponije i njenu ekonomsku isplativost.

Rezultati terenskih (*in-situ*) istraživanja pokazuju da se zbijanjem komunalnog otpada na probnim poljima ili na odabranom delu deponije pri višim energijama zbijanja, uz povećanje vlažnosti, dobijaju veće zapremske težine nego u laboratorijskim uslovima. Sa druge strane, prilikom niskih energija zbijanja rezultati sa terena i iz laboratorije su slični. Obradivost otpada je viša pri

povećanoj vlažnosti u odnosu na nizak sadržaj vlažnosti, što omogućava brže prelaženje kompaktora i na taj način skraćivanje vremena zbijanja.

Trajanje zbijanja ima značajni ekonomski uticaj za rad deponije. Finansijskom analizom dobijen je podatak o uštedi pornog prostora na deponiji (koja je dobijena zbijanjem uz dodavanje vode). Dobijeni porni prostor se „pretvarao“ u mogućnost odlaganja veće količine komunalnog otpada na njemu.

U Tabeli 2.11 dat je prikaz finansijske alalize tokom zbijanja komunalnog otpada pri sistemskom povećavanju vlažnosti. Voda je dodavana kako bi se postigle četiri različite vlažnosti od kojih je jedna optimalna.

Tabela 2.11: Finansijska analiza sistemskog povećavanja vlažnosti tokom zbijanja komunalnog otpada (Cox i sar., 2015)

Vlažnost	w=65%	w=75% (optimalna vlažnost)	w=85%	w=105%
Broj prelaza kamiona sa vodom u danu	3	4.5	6	9
Cena kamiona sa vodom po danu (\$/dan)	70	112	140	210
Dodatni operativni troškovi (\$/dan)	87	139	174	261
Dodatni troškovi pumpanja vode iz bunara (\$/dan)	0.56	0.81	1.12	1.68
Ukupni godišnji troškovi (\$)	13 140	21 015	26 250	39 370
Ukupna cena (\$/ha)	8 725	14 000	17 400	26 100
Povećanje slobodne zapremine na dnevnom nivou (m ³ /dan)	75	146	139	-151
Dodatna dnevna težina otpada (kN)	466	1 428	1 339	-743
Godišnji prihod (\$)	275 000	841 600	789 000	-437 600
Neto prihod (\$/ha)	175 000	547 000	508 500	318 000

Finansijska analiza imala je za cilj da prikaže važnost poznavanja optimalne vlažnosti za različite uslove zbijanja tokom životnog veka deponije. Analizom tabele se uočava da povećanje pornog prostora dovodi do odlaganja veće količine otpada na deponiji, uz povećanje godišnjeg prihoda. Pored toga, uočava se da dosta veća vrednost vlažnosti od optimalne ima negativan uticaj kako na povećanje slobodnog prostora na deponiji, tako i na značajne finansijske uštede.

Uz sve navedeno i analizirano, dolazi se do zaključka da laboratorijska ispitivanja (iako dosta jeftinija) za određivanje parametara zbijanja komunalnog otpada daju dovoljno dobre rezultate, kako za predviđanje ponašanja tokom samog zbijanja, tako i za dugoročnu procenu efekata zbijanja (povećavanje zapreminske težine, količine odloženog otpada itd.). Iako se terenska istraživanja smatraju dosta pouzdanijim zbog činjenice da nema modifikacija u razmeri, niti u korišćenju opreme za zbijanje, zbog visoke cene retko se koriste.

3. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA ZBIJANJA KOMUNALNOG OTPADA

3.1. Određivanje fizičkih karakteristika komunalnog otpada

Većinu deponija komunalnog otpada karakteriše izražena heterogenost na malom prostoru, zbog čega je teško predvideti njegovo ponašanje tokom terenskih i laboratorijskih istraživanja. Međutim, bez obzira na to, moguće je formirati reprezentativne uzorke sa posebnom pažnjom na osnovne pokazatelje fizičkog stanja kao što su: vlažnost, zapreminska težina, specifična težina, granulometrijski sastav, poroznost, sadržaj organske komponente i sl. U nastavku teksta, daje se kratak opis fizičkih pokazatelja koji su značajni za zbijanje i način njihovog određivanja, kako na terenu, tako i laboratorijski.

Vlažnost (w) komunalnog otpada predstavlja značajan parametar koji utiče na geotehničke karakteristike komunalnog otpada, među kojima je i zbijanje. Najčešće se definiše preko odnosa gubitka mase i mase preostalog materijala, dobijene sušenjem pri konstantnoj temperaturi. Zbog specifičnosti komunalnog otpada, temperatura se prilagođava u rasponu od 55- 60°C. Međutim, nije redak slučaj da se koriste i nešto veće temperature. Različiti autori koriste drugačije postupke pri određivanju vlažnosti, pa se samim tim dolazi i do različitih zaključaka (*Gabr & Valero, 1995; Coumoulos i sar., 1995; König & Jessberger, 1997; Zomberg, 1999; Rakić, 2013*). Opšte je prihvaćeno da sa dubinom raste vlažnost komunalnog otpada. Međutim, *Coumoulos i sar. (1995)* su u svojoj studiji objavili nešto drugačije podatke koji prikazuju da se sa dubinom vlažnost smanjuje.

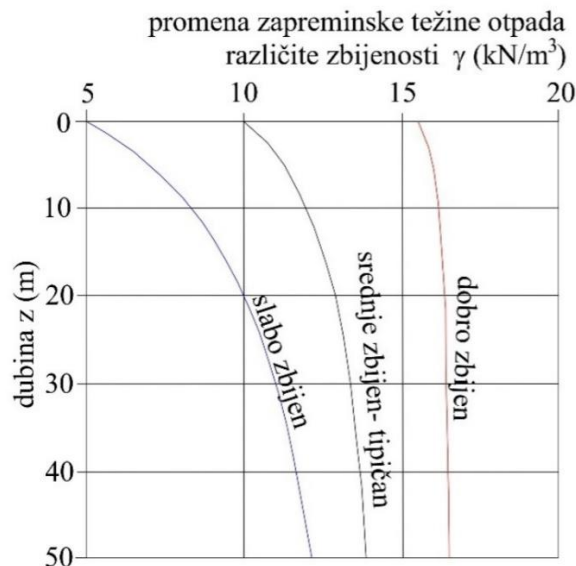
Zapreminska težina (γ) komunalnog otpada se smatra jednim od ključnih fizičkih pokazatelja koji je značajan za rad i funkcionalnost deponije. Ona utiče na sve faze izgradnje i eksploatacije deponije, a time i na zbijanje. Postoji mnogo načina za određivanje zapreminske težine komunalnog otpada, a neki najčešći su: merenje na terenu i na uzorcima u laboratoriji. Kao što je slučaj kod većine opita sa komunalnim otpadom, najbolje rezultate daju ispitivanja na terenu. Međutim, u laboratorijskim uslovima se češće rade.

Na određivanje zapreminske težine komunalnog otpada značajno utiču: sastav otpada, degradacija, starost, način odlaganja, zemljane prekrivke, zbijanje komunalnog otpada i sl. Zbog toga je neophodno prethodno ih odrediti ili bar pretpostaviti.

Fassett i sar. (1994) su u zavisnosti od zbijanja prikazali vrednosti zapreminske težine za svež otpad (Tabela 3.1).

Tabela 3.1: Zapreminske težine svežeg otpada u zavisnosti od zbijenosti (*Fassett i sar., 1994*)

	Slabo zbijen	Srednje zbijen	Dobro zbijen
Uobičajene vrednosti (kN/m^3)	3.0-9.0	5.0-7.8	8.8-10.5
Prosečna vrednost (kN/m^3)	5.3	7.0	9.6
Standardna devijacija (kN/m^3)	2.5	0.5	0.8
Koeficijent varijacije (%)	48	8	8



Slika 3.1: Promena zapremine težine otpada različite zbijenosti u odnosu na dubinu (Zekkos i sar., 2006)

Kao što se vidi u Tabeli 3.1., uticaj zbijanja na zapreminsku težinu je značajan. Vrednosti za dobro zbijeni otpad u odnosu na onaj koji to nije su čak i do tri puta veće. Zekkos i sar. (2006) ukazali su na nelinearan odnos između zapremine težine i dubine. Pored toga, predložili su krive na kojima se vide promene zapremine težine otpada različite zbijenosti u odnosu na dubinu (Slika 3.1).

Uzorci komunalnog otpada sadrže pore unutar i između čvrstih čestica zbog čega je određivanje **specifične težine (Gs)** dosta složenije nego što je to slučaj kod tla. U literaturi se nalaze različiti izrazi za određivanje specifične težine. Autori su dobili vrednosti u intervalu od 1.7 do 2.4 (Skempton i Petley, 1970; Kaniraj i Joseph, 1996; De Haan, 1997; Huat, 2004; Rakić, 2013).

Poznavanje **granulometrijskog sastava** je neophodno pri svakoj klasifikaciji komunalnog otpada, kao i prilikom izgradnje postrojenja za razvrstavanje u okviru separacionih i transfer stanica. Najčešće se izdvajaju sitnozrne čestice zemljastog porekla (materijal iz prekrivke, razgrađeni otpad i sl.) i krupne čestice od različitih materijala u otpadu (plastika, staklo, keramika i sl.). Kod sitnozrnih materijala koriste se uobičajene metode usvojene u mehanici tla (sejanje), dok se kod krupnijih materijala u otpadu primenjuju standardne metode za komunalni otpad (Rakić, 2013). Najčešće se određuje veličina čestica svih izdvojenih komponenti na neki od sledećih načina:

$$d_c = l \quad (3.1)$$

$$d_c = \frac{l + b}{2} \quad (3.2)$$

$$d_c = \frac{l + b + h}{3} \quad (3.3)$$

gde su:

d_c - veličina komponente (cm)

l - dužina čestice (cm)

b - širina čestice (cm)

h - visina čestice (cm)

Kao što je već napomenuto, osnovni fizički pokazatelji komunalnog otpada mogu biti određeni na osnovu sličnosti sa tlom. Međutim, često se koriste metode koje se ne smatraju u potpunosti ispravnim zbog heterogenosti komunalnog otpada kao materijala za zbijanje. Već je ustaljena praksa da se aparatura prilagođava ponašanju komunalnog otpada za izvođenje različitih geomehaničkih opita (npr. konstrukcija specijalnih ćelija za izvođenje edometarskog ili trijaksijalnog opita). Mana ovako prilagođenih opita je što različiti pristupi dovode do nemogućnosti međusobnog poređenja rezultata. Upravo zbog svega ovoga, sve češće se pominje prilagođavanje standarda za terenska i laboratorijska ispitivanja fizičkih pokazatelja komunalnog otpada.

3.2. Određivanje parametara zbijanja konvencionalnim laboratorijskim metodama

Zbijanje komunalnog otpada predstavlja mehanički postupak povećanja gustine, tj. zapreminske težine, kojim se čestice (komponente) pakuju bliže jedna drugoj uz smanjenje zapremine vazduha i neznatno zapremine vode. Zavisno je, između ostalog, od veličine i oblika komponenti, kao i od sastava komunalnog otpada.

Stanje zbijenosti se opisuje zapreminskom težinom komunalnog otpada u suvom stanju (suvom zapreminskom težinom), koju možemo sračunati iz jednačine 3.4:

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+w} \quad (3.4)$$

gde su:

γ - zapreminska težina u „prirodnom“ stanju (kN/m^3)

w- vlažnost (-)

Zapreminska težina komunalnog otpada u suvom stanju (γ_d) dobijena zbijanjem zavisi od vlažnosti (w) i primenjene energije zbijanja (E). Može se, između ostalog, odrediti konvencionalnim laboratorijskim metodama koje se koriste u mehanici tla. Najčešće se koristi Proktorov opit (standardni i modifikovan). Ovim opitom se određuje optimalna vlažnost, tj. vlažnost pri kojoj, se komunalni otpad najbolje zbija pri datoj energiji, tako da se dobija maksimalna suva zapreminska težina za datu energiju zbijanja.

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 8 cm) i metalnog nabijača prečnika 5 cm, težine 25 N u cilindričnoj vodiči nešto većeg prečnika, kako bi se omogućilo kretanje nabijača. Kalup se svojim donjim krajem postavlja na metalnu ploču, gde ostaje dobro učvršćen tokom zbijanja.

Pre izvođenja opita, komunalni otpad 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 homonizuje (ne sme je biti previše da ne bi materijal bio kašast, kao ni premalo jer to utiče na obradivost čestica). Potom se vrši zbijanje u tri sloja po 25 udaraca, u kalupu zapremine 944 cm^3 . Ukoliko se koristi kalup (Slika 3.3) veće zapremine ($2 \cdot 125 \text{ cm}^3$), kao što je slučaj u doktorskoj disertaciji, potrebna energija zbijanja se postiže sa 56 udaraca po sloju. Za ovako izveden opit, vrednost energije zbijanja (E) se može izraziti jednačinom:

$$E = \frac{n \cdot N \cdot W \cdot h}{V} = 600 \text{ kJ/m}^3 \quad (3.5)$$

gde su:

n- broj slojeva (3)

N- broj udaraca po sloju (25/56)

W- težina malja (25 N)

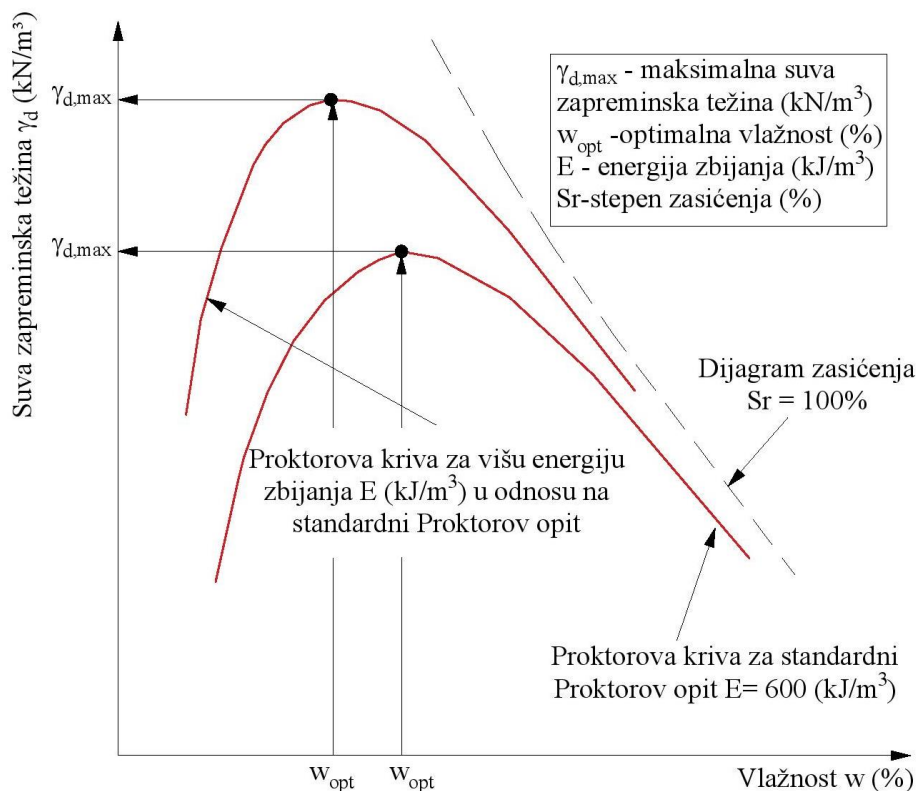
h- visina pada malja (30.5 cm)

V- zapremina cilindra ($944 \text{ cm}^3 / 2125 \text{ cm}^3$)

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 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 $E=2700 \text{ kJ/m}^3$. Za ovaj opit se koristi malj veće težine (44.5 N) i visine pada (46 cm). Za kalup manje zapremine (944 cm^3) materijal se zbija sa 25 udaraca u pet slojeva, dok se za kalup veće zapremine (2125 cm^3) materijal zbija sa 55 udaraca u tri sloja.

Povećanjem energije zbijanja postiže se veća zbijenost uzorka, smanjuje se njegova poroznost, odnosno količina vode u komunalnom otpadu, a povećava suva zapreminska težina. Proktorovim opitom dobija se dijagram zavisnosti suve zapreminske težine i vlažnosti, pri istoj energiji zbijanja (Slika 3.2).



Slika 3.2: Proktorovi dijagrami za različite energije zbijanja

Dijagram potpunog zasićenja može se konstruisati ako se na apscisu nanosi vlažnost (w), a na ordinatu - suva zapreminska težina (γ_d):

$$w = \frac{n}{\gamma_s (1-n)} \quad (3.6)$$

$$\gamma_d = \gamma_s (1 - n) \quad (3.7)$$

gde su:

n- poroznost komunalnog otpada

γ_s - zapreminska težina čvrstih čestica komunalnog otpada.

Za klasifikaciju tla (otpada) upotrebljava se i Proktorov broj:

$$Pr = \frac{10}{\gamma_{d,max}} - \frac{10}{\gamma_s} \quad (3.8)$$

Ovako određivanje odnosa suve zapreminske težine i vlažnosti definisano je odgovarajućim propisima u slučaju standardnog (SRPS EN 13286-2, ASTM D 698-12), odnosno modifikovanog (SRPS EN 13286-2, ASTM D1557-12) Proktorovog opita. Kao što je prikazano u prethodnom poglavlju, strani autori su u najvećem broju slučajeva koristili neke od ova dva opita. Međutim, sa izraženom specifičnošću koju komunalni otpad poseduje kao materijal, kao zaključak mnogi navode potrebu za modifikacijom propisa koji će se odnositi na komunalni otpad.

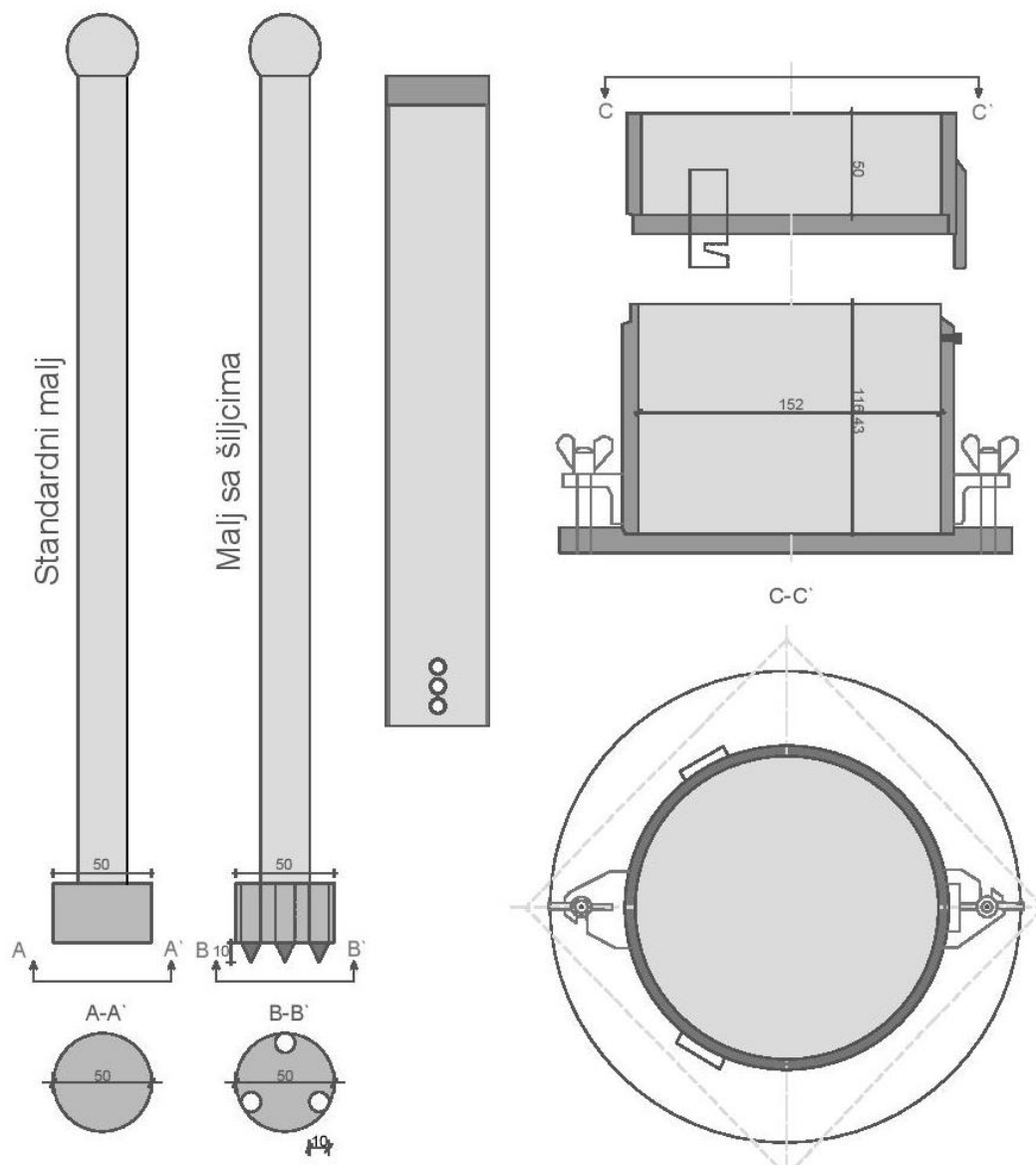
3.3. Predlog novog pristupa ispitivanja parametara zbijanja komunalnog otpada

Dosadašnja praksa (kao kod tla) pokazala se dovoljno dobrom za ispitivanje zbijenosti komunalnog otpada, ali uz izvesna ograničenja prilikom korišćenja podataka i formiranja uzoraka. Zbog toga je sve češći slučaj promene pristupa, odnosno odstupanja od standardizovanih metoda ispitivanja.

Kao što je prikazano u pregledu literature, najčešća promena je u povećanju energije zbijanja. Korišćenjem postojeće opreme simulirano je ponašanje značajno težih kompaktora na deponijama u odnosu na one koji se koriste za zbijanja tla kod nasipa.

Međutim, u dosadašnjim istraživanjima autori nisu uzimali u obzir korišćenje kompaktora sa ježevima koji pored zbijanja služe i za razaranje i usitnjavanje komunalnog otpada na deponijama. Kako bi se demonstrirao rad kompaktora na deponijama u okviru doktorske disertacije, pored standardne opreme za izvođenje Proktorovog opita, korišćena je inovativna, nestandardna oprema koja je podrazumevala ugradnju šiljaka na ravnu površinu malja za zbijanje (Slika 3.3). Na ravnu površinu malja, dodata su tri šiljka visine i prečnika po 10 mm. Ovakav raspored i izgled šiljaka usvojen je kako bi se postigla sličnost sa kompaktorima koji se najčešće koriste na deponijama.

Osnovna uloga šiljaka je da sa svakim padom malja na komunalni otpad izvrše razaranje različitih komponenti koje ulaze u sastav otpada kako bi se postigli što bolji uslovi zbijanja, baš kao što to rade kompaktori na deponiji. Pored inovativnog malja, korišćen je kalup veće zapremine (2 125 cm³) koji je sastavni deo standardizovane opreme za Proktorov opit.



Slika 3.3: Skica inovativne opreme za Proktorov opit (standardni ravni malj i malj sa šiljcima)

Na Slici 3.4 prikazana je oprema kojom je vršeno zbijanje komunalnog otpada standardnim Proktorovim opitom tj. standardna oprema za Proktorov opit u kojoj se može postići veća energija zbijanja (cilindar za modifikovani opit), uz klasičan i inovativni malj.



Slika 3.4: Oprema korišćena za izvođenje Proktorovog opita (Proktorov kalup, klasičan i malj sa šiljcima)

4. PROGRAM LABORATORIJSKIH ISPITIVANJA

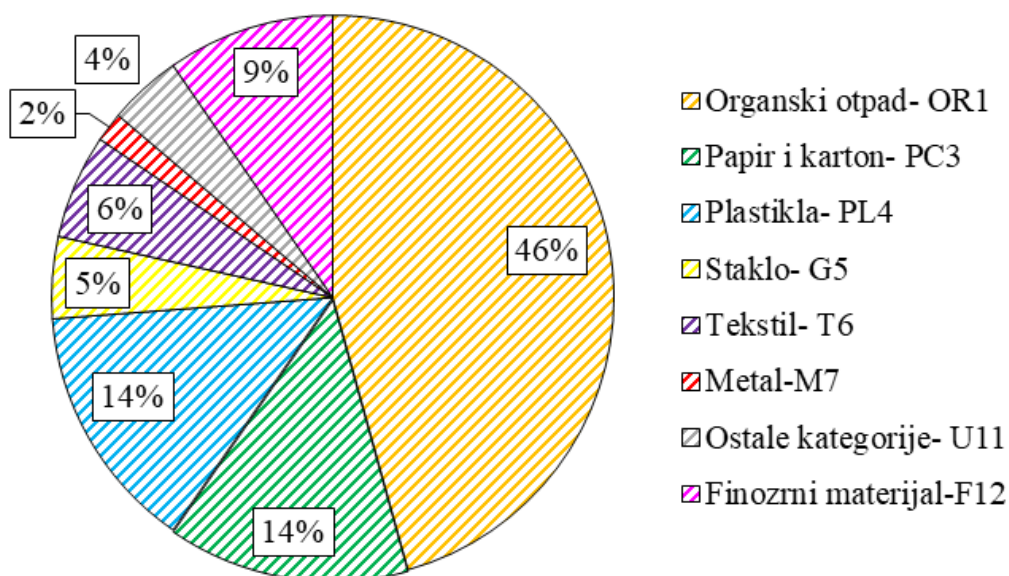
4.1. Definisavanje sastava

Termin „sastav otpada“ obično se koristi da opiše pojedine komponente koje čine otpad, a njihovo učešće se najčešće izražava procentualno u masi, a retko procentom zapremine (Rakić, 2013). Poznavanje sastava je jedan od ključnih činioca tokom formiranja deponije. On utiče na sve procese kao što su: istovar, razastiranje, prekrivanje i na kraju zbijanje. Poznavanje sastava komunalnog otpada je od velikog značaja prilikom geotehničkih istraživanja, kako u terenskim, tako i u laboratorijskim uslovima.

Zbog izrazite heterogenosti, određivanje sastava komunalnog otpada nije jednostavno, a često može da bude i neprecizno. Sastav otpada varira u zavisnosti od mnogo faktora kao što su: društveno uređenje, nivo prosečnih prihoda, stepen industrijalizacije, klimatski uslovi i kapital određene zemlje (Pulat i sar., 2013). Zbog toga se često formiraju nacionalni standardi, kao i standardi različitih regiona (ASTM, EPA itd.). Pomenuti standardi definišu sastav komunalnog otpada različitim metodama, kroz praćenje materijalnog toka, anketiranje ljudi i sl.

U Srbiji je na nacionalnom nivou vrlo oskudno rađena analiza sastava komunalnog otpada. Prva konkretna studija je rađena na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, pod nazivom „Utvrđivanje sastava otpada i procene količine u cilju definisanja strategije upravljanja sekundarnim sirovinama u sklopu održivog razvoja Republike Srbije“ (2009).

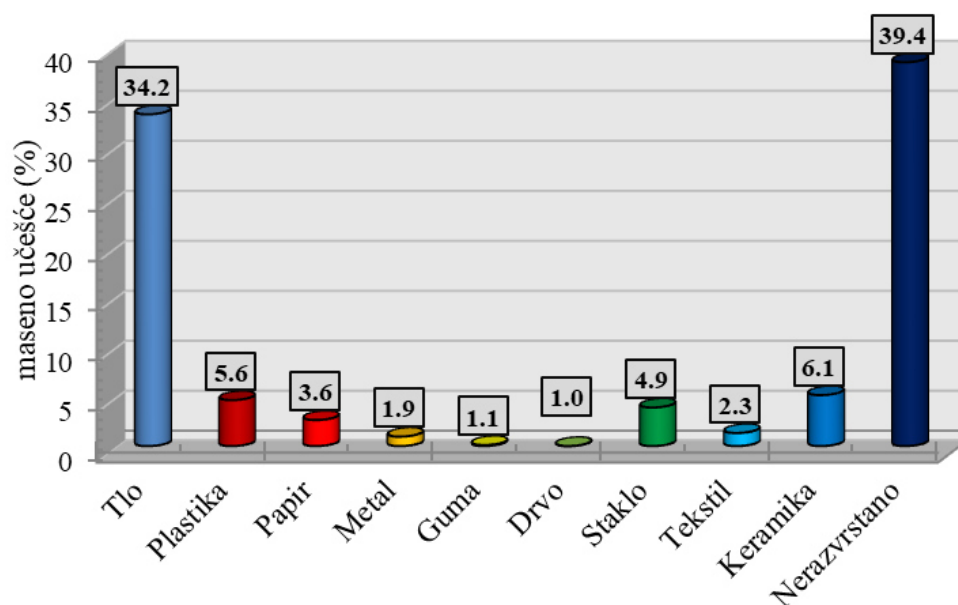
Sastav komunalnog otpada je za deset odabranih opština dobijen metodologijom „S.W.A.- Tool“, sortiranjem u dva koraka i to: prvi korak je obuhvatao procenu generisanih količina komunalnog otpada u odabranim opštinama za period od sedam dana i drugi korak koji je podrazumevao uzorkovanje i analizu morfološkog sastava za referentne opštine. Sastav otpada dobijen ovom studijom prikazan je na Slici 4.1. Primenjena metodologija definisanja sastava otpada odnosi se na otpad koji se direktno sa mesta izvora odlaže na deponije.



Slika 4.1: Sastav otpada u Srbiji (podaci iz studije: Utvrđivanje sastava otpada i procene količine u cilju definisanja strategije upravljanja sekundarnim sirovinama u sklopu održivog razvoja Republike Srbije; Departman za inženjerstvo zaštite Životne sredine, Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu, 2009)

Za potrebe doktorske disertacije, korišćen je komunalni otpad sa dve deponije u Republici Srbiji.

Prva grupa uzoraka formirana je od komunalnog otpada sa deponije Ada Huja u Beogradu koja je zatvorena 1978. godine. Ovaj komunalni otpad je već korišćen za istraživanje u doktorskoj disertaciji *D. Rakića (2013)* pod nazivom „Konstitutivne zavisnosti komunalnog otpada sa deponija u Srbiji“, gde je definisan sastav. Korišćen otpad je u trenutku uzimanja sa deponije bio starosti između 35 i 40 godina.



Slika 4.2: Sastav komunalnog otpada sa deponije Ada Huja, Beograd (Rakić, 2013)

Ranijom studijom sa Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu definisan je sastav pre odlaganja na deponije. S druge strane, s obzirom na prosečni eksploatacioni period deponija u Srbiji od preko 30 godina, za sastav otpada koji je *D. Rakić (2013)* formirao u svojoj doktorskoj disertaciji može se reći da je reprezentativan za već formirane deponije, jer je u pitanju stariji otpad. Za deponiju Ada Huja dat je grafički prikaz sastava otpada koji je preuzet iz prethodno pomenute doktorske disertacije (Slika 4.2).

Druga grupa uzoraka formirana je od komunalnog otpada sa deponije Plandište (Slika 4.3). Deponija je starosti oko 40 godina, i još uvek je aktivna. Komunalni otpad se bez ikakvog tretmana odlaže na deponiju. Pored komunalnog otpada, na deponiju se nekontrolisano odlaže i industrijski i opasan otpad. Samo uređenje deponije je veoma haotično, bez sistemskog odlaganja, zbijanja i sl. Jedina aktivnost na samoj deponiji je izdvajanje metalnog otpada koji se kasnije prodaje kao sekundarna sirovina.

Uzorci za laboratorijska ispitivanja uzeti su istražnim bušenjem. Na mestu uzimanja uzoraka, komunalni otpad je starosti oko desetak godina i proces biodegradacije se smatra završenim. Kompletan komunalni otpad je spakovan u džakove za transport sa deponije, nakon čega je zbog izrazito neprijatnih mirisa sušen na najilonu u spoljnim uslovima na temperaturi oko 25°C nekoliko sati (Slika 4.4a). Vizuelnim pregledom je na licu mesta izvršeno razvrstavanje otpada (Slika 4.4b).



Slika 4.3: Uzimanje uzoraka istražnim bušenjem na deponiji u Plandištu

Fizičkim izdvajanjem formirane su karakteristične grupe koje su zastupljene u uzorku, i to: tvrda plastika, plastika- tekstil- guma, metal-staklo-keramika, papir, drvo i ostali otpad gde dominira zemljasti i nerazvrstani materijal. Razvrstavanje je vršeno na osnovu dostupnog materijala iz istražnog bušenja. Osnovni kriterijum za formiranje grupa od različitih komponenata u sastavu otpada bilo je ponašanje otpada tokom zbijanja. Nakon razvrstavanja otpad je vraćen u plastične kese u kojima je prebačen u Laboratoriju za mehaniku tla na Rudarsko- geološkom fakultetu.

a)

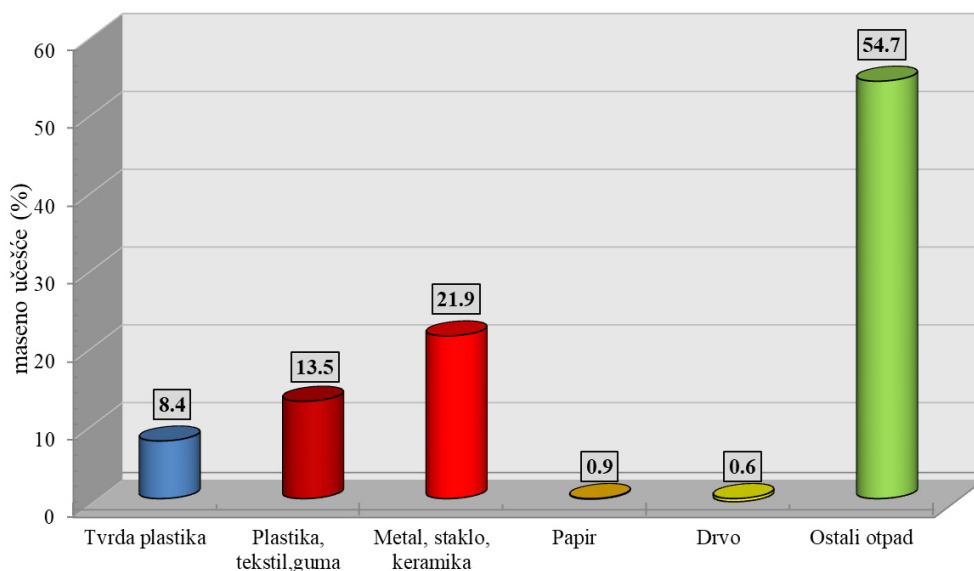


b)



Slika 4.4: Postupak a) sušenja i b) razvrstavanja otpada

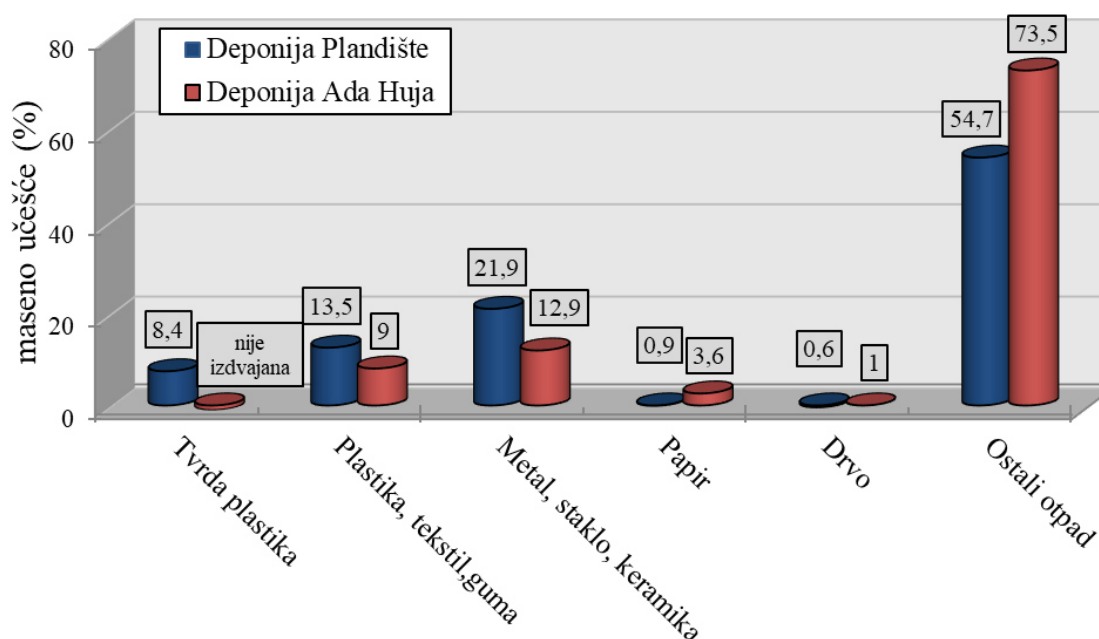
Kompletan materijal tj. uzorci koji su dopremljeni u laboratoriju za mehaniku tla su sušeni na temperaturi od 60°C, kako bi se definisala vlažnost. Nakon sušenja određeno je maseno učešće izdvojenih komponenti kako bi se definisao sastav otpada sa deponije Plandište (s obzirom na činjenicu da je tretiran kompletan materijal koji je dobijen istražnim bušenjem). Sastav otpada deponije Plandište prikazan je na Slici 4.5.



Slika 4.5: Sastav komunalnog otpada sa deponije Plandište

Pod „ostalim otpadom“ smatra se otpad koji se nije mogao izdvojiti niti u jednu od prethodno navedenih grupa. To je uglavnom otpad zemljastog porekla, pretežno sitnozrn. Kada bi se ovakav sastav poredio sa onim za deponiju Ada Huja (Slika 4.2), s obzirom da su oba uzorka uzeta iz tela deponije, došlo bi se do logičnih zaključaka koji potvrđuju trend ponašanja otpada na starim deponijama. Komponente „nerazvrstan otpad“ i „tlo“ kod komunalne deponije Ada Huja, mogu se poistovetiti sa komponentom „ostali otpad“ na deponiji Plandište. Razlika u masenom učešću od oko 20% može se pripisati činjenici da je razlika u starosti otpada oko 25 do 30 godina, što se između ostalog ogleda u povećanom učešću sitnozrne komponente.

Uporedni prikaz sastava komunalnog otpada sa obe deponije prikazan je na Slici 4.6. Na njemu je sastav otpada sa deponije Ada Huja prilagođen tako da bi se mogao porediti sa sastavom otpada na deponiji Plandište. Uz to, na ovaj način može se videti i uticaj starosti, što je ranije objašnjeno.



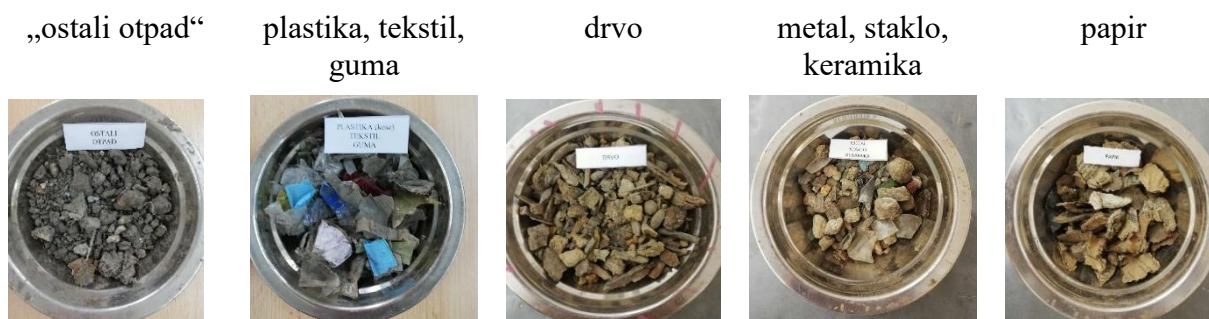
Slika 4.6: Zbirni prikaz sastava sa deponije Plandište i Ada Huja

Neophodno je naglasiti da je sastav otpada dobijen istražnim bušenjem samo nasumično „birana lokacija“ u odnosu na celu površinu deponije. Kao takav, ne može se smatrati potpuno relevantnim, čak ni za samu deponiju za koju je određivan. Ovo se naglašava kako bi se u budućnosti na određivanje sastava otpada prilikom njegovog dovoženja obratila posebna pažnja, zbog značaja ponašanja pojedinačnih komponenti komunalnog otpada pre i nakon odlaganja.

4.2. Formiranje i priprema uzoraka za laboratorijska ispitivanja

Kao što je već ranije naglašeno, uzorci za laboratorijska ispitivanja veštački su formirani od komunalnog otpada sa dve deponije. Prva grupa uzoraka je od starog otpada sa zatvorene deponije Ada Huja, dok je druga grupa uzoraka sa aktivne deponije u Plandištu. Osnovna razlika ovih grupa uzoraka ogleda se u starosti i sastavu komunalnog otpada.

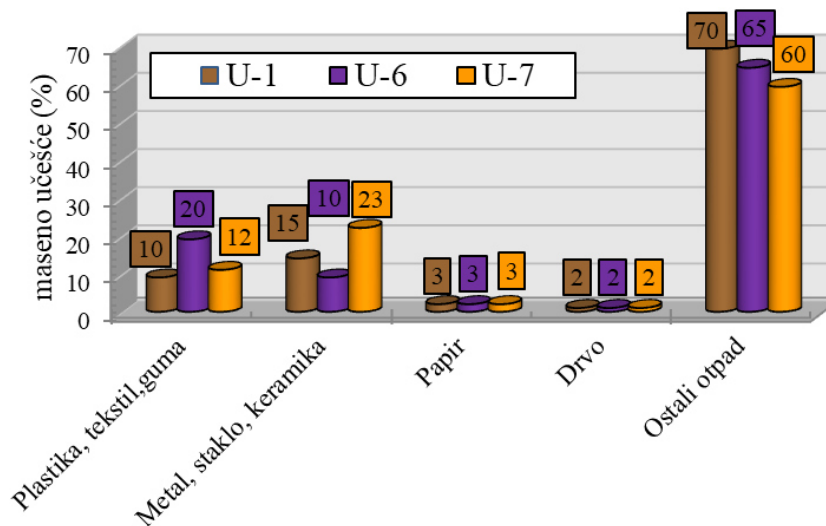
Komunalni otpad sa deponije Ada Huja je već ranije korišćen za laboratorijska ispitivanja. Do njegovog ponovnog korišćenja za potrebe izrade ovog rada prošlo je oko deset godina. Zbog svega ovoga, možemo ga smatrati potpuno starim otpadom. U ranijoj fazi istraživanja, on je tretiran kroz homogenizaciju, mešanje, četvrtanje i usitnjavanje pojedinih komponenti za različite laboratorijske opite, a neiskorišćeni materijal je odložen u plastične kese. Kada sam pristupila ponovnom sortiranju otpada, došla sam do zaključka da je moguće prilagoditi sortiranje otpada u skladu sa njegovim ponašanjem tokom zbijanja, slično kao i kod deponije Plandište. Tokom formiranja uzoraka sa deponije Ada Huja vodilo se računa da se sadržaj komponente „ostali otpad“ postepeno smanjuje (oko 5% za svaki uzorak) kako bi se radi poređenja „približio“ sadržaju otpada sa deponije Plandište. Izdvojene su komponente: plastika-tekstil-guma, metal-staklo-keramika, papir, drvo i ostali otpad. Komponenta „tvrda plastika“ je bila prisutna u značajno manjem procentu nego što je to bio slučaj kod deponije Plandište, pa je s obzirom na to pripisana komponentama „plastika-tekstil-guma“ (Slika 4.7).



Slika 4.7: Izdvojene komponente sa deponije Ada Huja

Za potrebe laboratorijskih ispitivanja formirane su dve grupe uzoraka sa po tri različita sastava (ukupno šest uzoraka). Svaki od formiranih uzoraka sadrži određeni procenat svih komponenti. Razlog za ovakav pristup prilikom formiranja dve grupe sa po tri uzorka sličnog sastava jeste primenjena metodologija prilikom izvođenja standardnog Proktorovog opita klasičnim i maljem sa šiljcima. Neophodno je napomenuti da je procentualno učešće određenih komponenti „diktirala“ njihova dostupnost. Stoga se visok procenat komponente „ostali otpad“ u sastavu tokom formiranja veštačkih uzoraka sa deponije Ada Huja opravdava na taj način. Međutim, bez obzira na to, u kasnijim analizama, takav način formiranja uzoraka zbog velikog učešća zemljaste komponente je dao svoj doprinos.

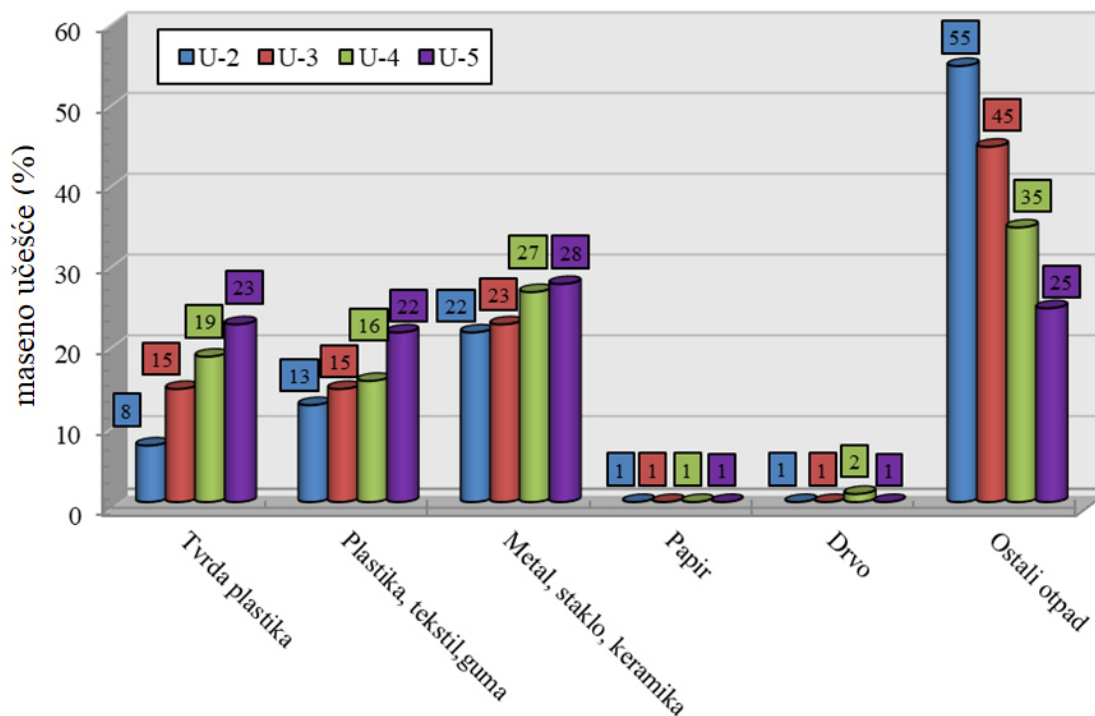
U grupi uzoraka sa deponije Ada Huja nije vršeno usitnjavanje materijala jer je to obavljeno u ranijim laboratorijskim istraživanjima. Materijal je pre opita sortirano nakon čega je u određenom sastavu (Slika 4.8) izmešan i homogenizovan. Formiranim uzorcima su date oznake U-1, U-6 i U-7.



Slika 4.8: Sastav komunalnog otpada koji je korišćen za formiranje uzoraka sa deponije Ada Huja

Za formiranje uzoraka sa deponije Plandište neophodna je bila duža procedura obzirom da je reč o komunalnom otpadu koji nije ranije tretiran. Nakon razvrstavanja i sušenja otpada, pristupilo se njegovom usitnjavanju. Maksimalna veličina komponenti u svim uzorcima iznosila je 30 mm, kako bi se dobio odgovarajući odnos sa dimenzijama kalupa u kojem je izvođen Proktorov opit. S obzirom na specifičnost materijala koji je sadržan u komunalnom otpadu, usvojena je maksimalna veličina čestica od 20 % u odnosu na karakterističnu dimenziju kalupa (prečnik), tako da je najveći prečnik komponenti iznosio 30 mm.

Nakon usitnjavanja definisan je sastav uzoraka na osnovu dostupnog materijala. Izdvojene komponente koje su definisane ranije (Slika 4.5) su pomešane u različitom procentualnom učešću. Formirano je osam uzoraka sa četiri različita sastava (Slika 4.9). Komponenta „ostali otpad“ je i u formiranju uzoraka sa deponije Plandište dominantna, ali je pored toga prisutno i znatno veće učešće veštačkih materijala u odnosu na deponiju Ada Huja.



Slika 4.9: Sastav komunalnog otpada koji je korišćen za formiranje uzoraka sa deponije Plandište

4.3. Postupak ispitivanja

Posle definisanja sastava formirani uzorci su stavljeni u šušnicu na temperaturu od 60°C. Nakon sušenja, svih 14 uzoraka je prosejano kroz seriju sita sledećih otvora: 30 mm, 20 mm, 12.5 mm, 8 mm, 4 mm, 2 mm, 0.8 mm, 0.63 mm, 0.425 mm, 0.2 mm i 0.075 mm.

Po završetku sejanja na svakom uzorku sa odgovarajućim sastavom urađeni su Proktorov opit sa klasičnim maljem i maljem sa šiljcima. Sva ispitivanja su obavljena u kalupu zapremine 2125 cm³. Zbijanje je izvedeno u 3 sloja sa 56 udaraca po sloju, korišćen je malj težine 2.5 kg koji pada sa visine od 30.5 cm. Energija zbijanja za ovako izveden opit iznosi 600 kJ/m³, i ona odgovara standardnoj. U svaki uzorak je dodavana unapred definisana količina vode, kako bi se dobile tačke za Proktorovu krivu. Izgled materijala tokom provlažavanja prikazan je na Slici 4.10. Na ovaj način je za sve uzorke (bez obzira koji je malj korišćen– klasičan ravan ili sa šiljcima) dobijeno po pet različitih tačaka pomoću kojih je kasnije prikazana odgovarajuća Proktorova kriva.

Tokom samog ispitivanja, uočena je razlika u ponašanju komunalnog otpada u odnosu na tlo, kao i u ponašanju komunalnog otpada različitog sastava. Naime, uzorci u kojima ima dosta komponente „ostali otpad“ se ponašaju najslabije tlu. Razlog za to je prisustvo zemljaste komponente koja se mahom koristi za dnevne prekrivke tokom životnog veka deponije, ili je produkt raspadanja otpada. Sa druge strane, uzorci koji sadrže nešto veći udeo komponente „plastika“ imaju potpuno drugačije ponašanje. Naime, prilikom provlažavanja, znatno veći procenat vode prima „ostali otpad“, dok veštački plastični materijali slabo upijaju vodu. Pored toga, zapremina koju zauzima ova komponenta je prilično velika, a njen maseni udeo to ne prati, što se odražava na ukupnu masu uzorka, pa se mora voditi računa o relevantnosti dobijenih podataka. Sa druge strane, maseni udeo komponente „staklo-metal-keramika“ je dosta veliki pa se i na to mora obratiti posebna pažnja. Na osnovu rezultata opita, izveden je zaključak da se razaranje zbijanjem najviše primećuje na komponenti „metal, staklo, keramika“.



Slika 4.10: Izgled materijala tokom provlažavanja

Po završetku ispitivanja uzoraka standardnim Proktorovim opitom (sa različitim maljevima), kompletan materijal je ponovo stavljen u šušnicu na temperaturu od 60°C. Materijal je sušen do postizanja konstantne mase. S obzirom na sastav, postupak sušenja za neke uzorke je trajao i do tri dana zbog visokog sadržaja vode koja se dodaje tokom Proktorovog opita. Nakon sušenja, materijal je ponovo prosejan kroz istu seriju sita kao i pre izvođenja opita, vodeći računa o međusobnom razdvajanju pojedinih komponenti koje su se spojile (slepile) na različite načine tokom zbijanja.

5. PRIKAZ REZULTATA ISPITIVANJA

Za sve grupe ispitanih uzoraka prvo su prikazane njihove fizičke karakteristike. Nakon toga prikazani su rezultati granulometrijskog sastava, kao i Proktorove krive. Krive granulometrijskog sastava, sa krivama zastupljenosti pojedinih komponenti komunalnog otpada, prikazane su pre i nakon izvođenja Proktorovog opita (klasičnim i maljem sa šiljcima). Na taj način je prikazan efekat razaranja komunalnog otpada različitim postupcima zbijanja.

5.1. Prikaz fizičkih karakteristika uzoraka

Vlažnost uzoraka otpada određena je sušenjem na temperaturi od 60°C, na osnovu jednačine 5.1.

$$w(T^{\circ}\text{C}) = \frac{m_m}{m_s} \cdot 100\% \quad (5.1)$$

gde su:

m_m - gubitak mase materijala tokom sušenja

m_s - gubitak mase materijala dobijena sušenjem do konstantne temperature.

Otpad sa deponije Ada Huja uzet je iz dve bušotine i izmešan, nakon čega su proizvoljno odabrani uzorci za određivanje vlažnosti. Dobijene su vrednosti u intervalu 31-39%, sa izuzetkom jednog uzorka za koji je izmerena vlažnost od 68%. Ovolike razlike u veličinama vlažnosti ukazuju na izraženu heterogenost otpada, sa mogućnošću stvaranja lokalnih zona sa izrazitim promenama vlažnosti u deponiji (*D. Rakić, 2013*).

Za deponiju u Plandištu, uzet je komunalni otpad iz dve istražne bušotine, nakon čega su odabrani uzorci za uzimanje vlažnosti. Dobijene su vrednosti vlažnosti u intervalu od 56- 75%.

Za potrebe doktorske disertacije **zapreminska težina** maksimalno zbijenog otpada je laboratorijski dobijena iz Proktorovog aparata. U zavisnosti od načina zbijanja i sastava otpada, dobijene vrednosti za deponiju Ada Huja prilikom korišćenja klasičnog malja kreću se u rasponu od 11.4 - 16.2 kN/m³, dok se za malj sa šiljcima kreću u rasponu od 12.5- 16.7 kN/m³.

Na mlađem komunalnom otpadu, sa deponije Plandište, maksimalna zbijena zapreminska težina klasičnim maljem iznosila je od 8.8-16.0 kN/m³, dok se za malj sa šiljcima kretala u intervalu od 9.3-15.8 kN/m³.

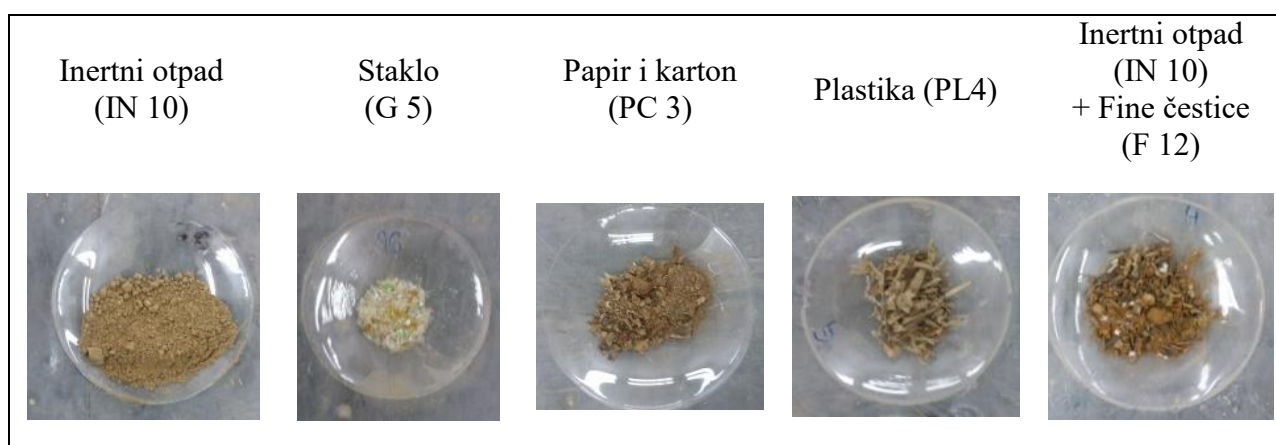
Specifična težina usvojena za potrebe doktorske disertacije određena je laboratorijski korišćenjem automatizovanog piknometra AccuPyc1330 (Slika 5.1).



Slika 5.1: Automatizovani piknometar AccuPyc 1330 (www.spwindustrial.com)

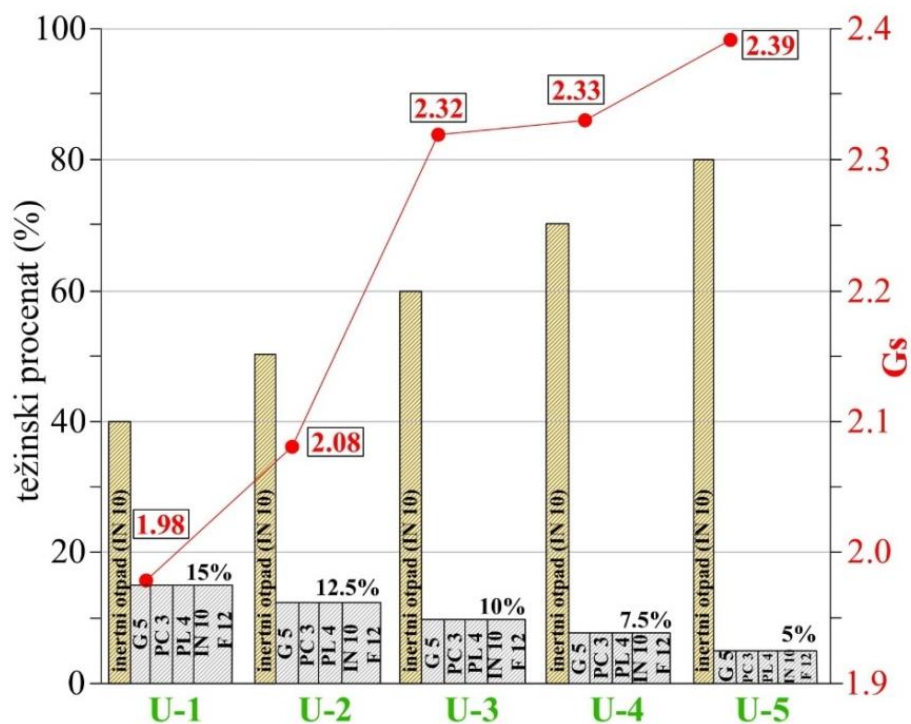
Prednost korišćenja ovakve opreme je u mogućnosti dobijanja zapremine čvrstih čestica nepravilnog oblika na osnovu merenja razlike pritiska helijuma u kalibranoj zapremini, i na taj način automatskog izračunavanja gustine čvrstih čestica, korišćenjem unapred izmerene mase suvog uzorka. Rezultati se dobijaju na osnovu deset uzastopnih merenja.

Formirano je pet uzoraka sa posebnim akcentom na uticaj komponente „ostali otpad“ koja zbog svog pretežno zemljastog porekla značajno utiče na dobijene rezultate. Pre izvođenja opita, uzorci su usitnjeni, kako bi se prilagodili aparaturi (Slika 5.2).



Slika 5.2: Prikaz komponenti korišćenih za formiranje uzoraka pri određivanju specifične težine

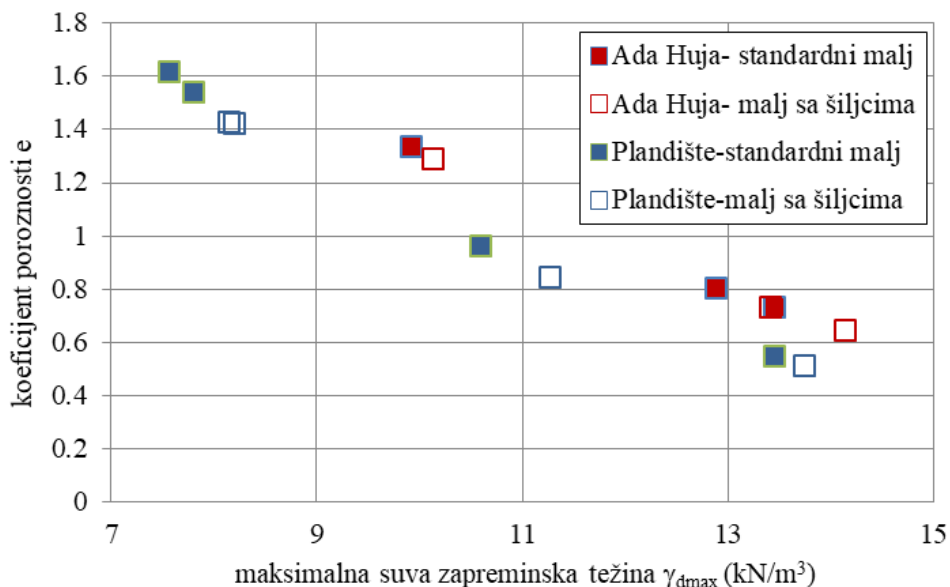
Dobijene vrednosti specifične težine u odnosu na maseno učešće sastava komunalnog otpada prikazane su na Slici 5.3 (D. Rakić i sar., 2020). Kao što se vidi, dobijene vrednosti su u intervalu koji je preporučen od strane drugih autora. Pored toga, uočava se povećanje vrednosti specifične težine sa većim masenim učešćem zemljaste komponente „ostali otpad“.



Slika 5.3: Laboratorijski određene vrednosti specifične težine u zavisnosti od masenog sastava komunalnog otpada (D. Rakić i sar.,2020)

Neophodno je napomenuti da postoje razlike u sastavima u odnosu na uzorke koji su korišćeni za laboratorijska ispitivanja u doktorskoj disertaciji, pa se otuda javljaju određena odstupanja.

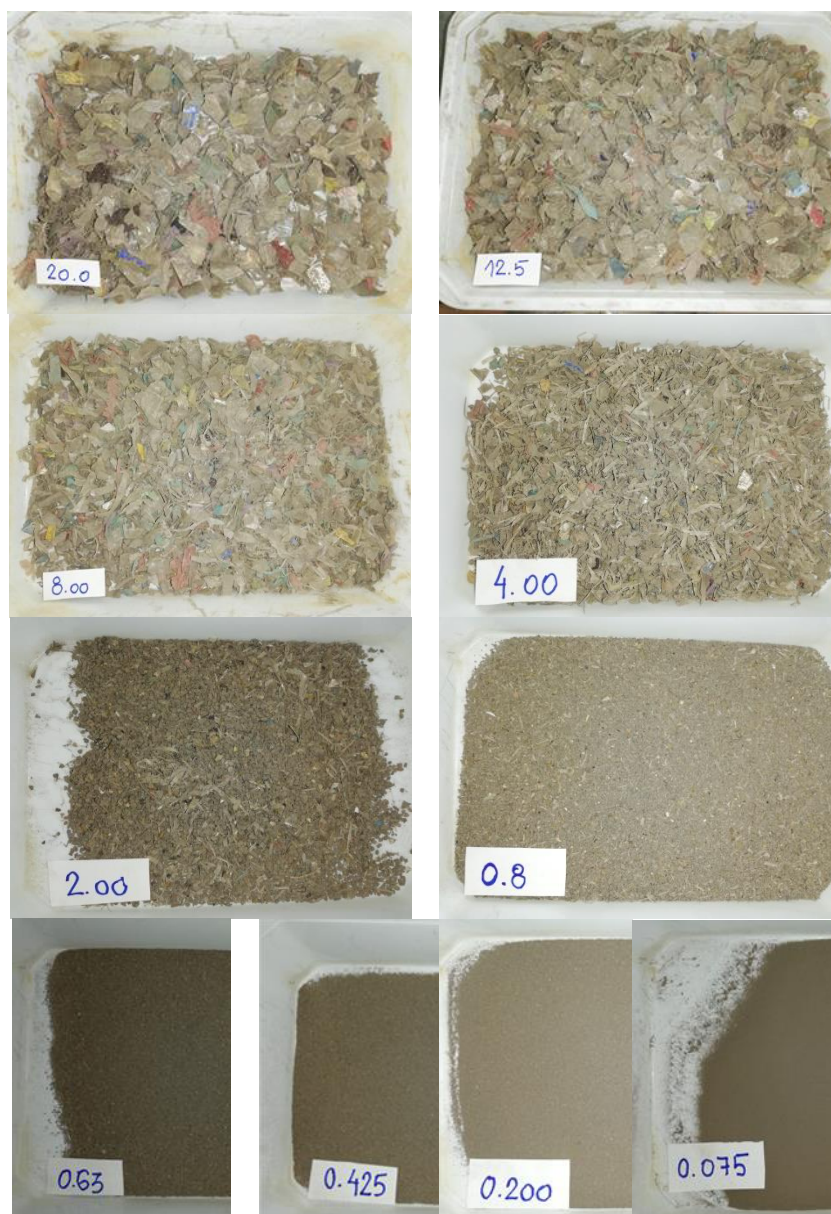
Za dobijanje **koeficijenta poroznosti (e)**, korišćene su specifične težine prema odgovarajućem sastavu koje su prikazane ranije u tekstu. Sračunate su vrednosti koeficijenta poroznosti za maksimalnu suhu zapreminsku težinu koja je dobijena standardnim Proktorovim opitom sa klasičnim maljem i maljem sa šiljcima. Dobijene vrednosti se odnose na šest uzoraka sa deponije Ada Huja, i osam uzoraka sa neuređene deponije u Plandištu. Koeficijent poroznosti se za klasičan malj kretao u intervalu od $e=0.546-1.617$ dok je za malj sa šiljcima iznosio $e=0.513-1.428$ (Slika 5.4).



Slika 5.4: Dijagram zavisnosti maksimalne suve zapreminske težine i koeficijenta poroznosti

Komunalni otpad je specifičan materijal koji karakteriše **poroznost (n)** unutar i između čestica. Njeno određivanje je zbog izražene heterogenosti veoma komplikovano i zbog toga nije retko da se analizira samo poroznost između čestica.

Za potrebe ovog rada definisan je **granulometrijski sastav** za 14 uzoraka na kojima je izveden standardni Proktorov opit sa klasičnim i maljem sa šiljcima. Izvršeno je prosejavanje kroz garnituru sita pre i nakon izvođenja Proktorovog opita, kako bi se prikazao uticaj različitih postupaka zbijanja na veličinu komponenti.



Slika 5.5: Ostatak komunalnog otpada na sitima različitih veličina otvora (mm) za uzorak U-3

Najveći prečnik sita iznosio je 30 mm, a najmanji 0.075 mm. Granulometrijske krive prikazane su u narednim poglavljima kao jedan od osnovnih pokazatelja razaranja, i u vezi sa tim, njihov uticaj na promenu ponašanja komunalnog otpada prilikom zbijanja standardnim i maljem sa šiljcima.

Na Slici 5.5 je prikazan ostatak otpada na sitima različitih otvora, gde se jasno uočava izdvajanje karakterističnih veštačkih¹ komponenti na sitima sa većim prečnikom, dok se „zemljaste“ komponente uočavaju na sitima manjeg prečnika.

5.2. Rezultati ispitivanja granulometrijskog sastava

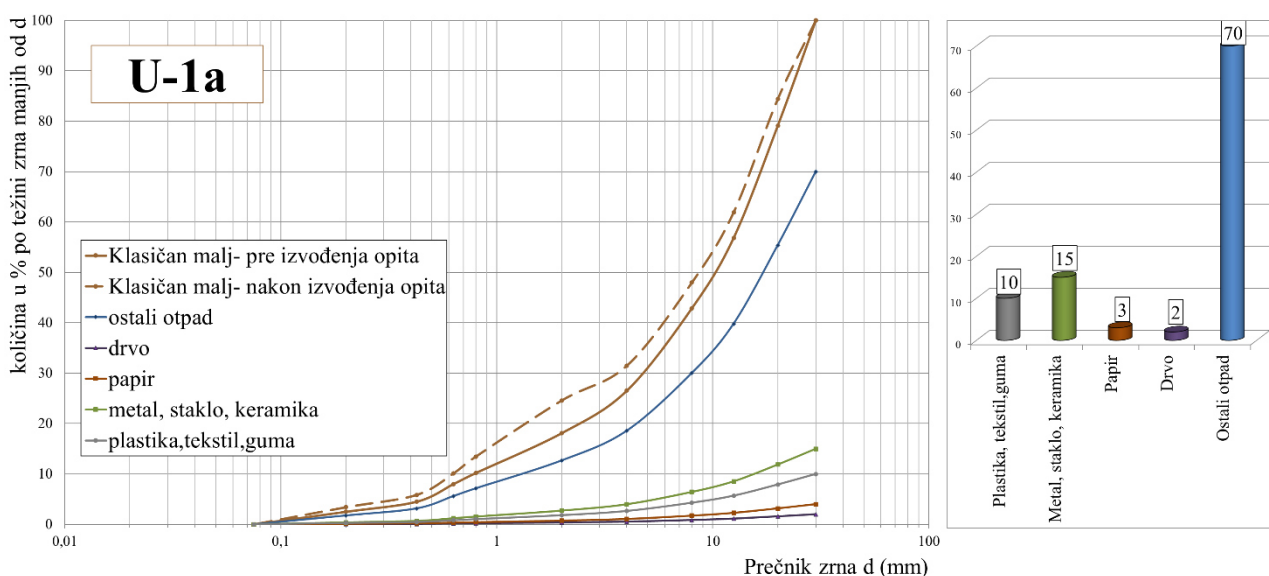
5.2.1. Deponija Ada Huja

S obzirom da se radi o starom komunalnom otpadu, granulometrijski sastav dobijen na uzorcima sa deponije Ada Huja ima dosta sličnosti sa granulometrijskim sastavom za neke vrste tla. Razlog za ovo je veliko učešće ranije opisane komponente „ostali otpad“. U okviru ove grupe, ispitano je šest uzorka U-1a , U-1b, U-6a, U-6b, U-7a i U-7b. Granulometrijski sastav je dobijen suvim postupkom sejanja.

Uzorci U-1a i U-1b

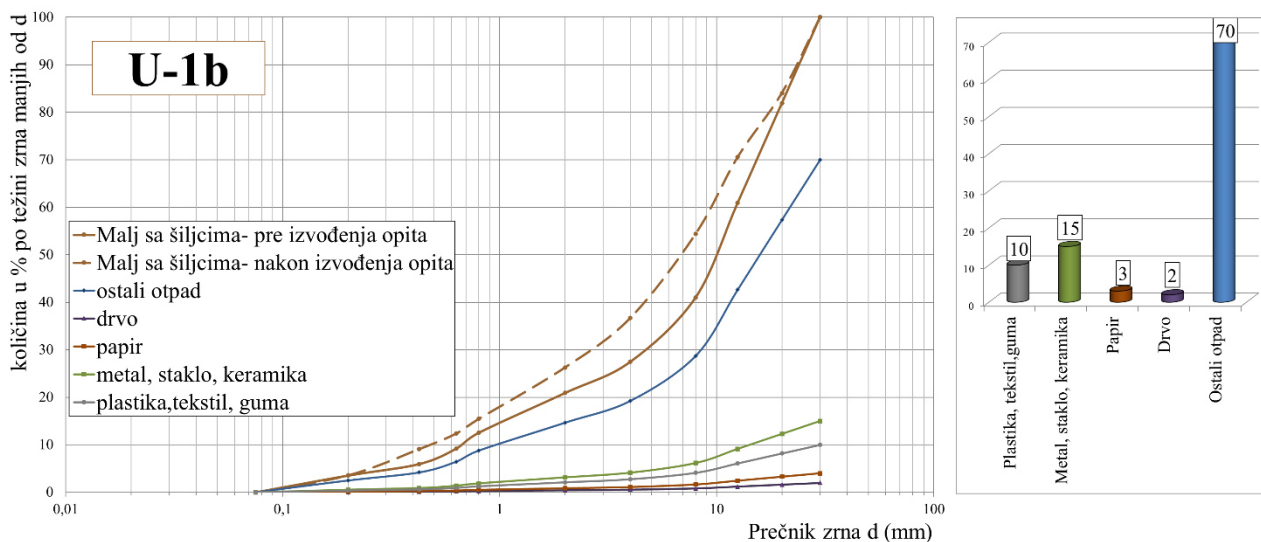
Na Slikama 5.6 i 5.7 prikazane su granulometrijske krive i krive zastupljenosti za uzorke koje karakteriše najveće učešće komponente „ostali otpad“ (70%).

Granulometrijske krive koje su dobijene sejanjem pre i nakon izvođenja Proktorovog opita klasičnim maljem prikazane su na Slici 5.6, dok su krive dobijene izvođenjem opita maljem sa šiljcima prikazane na Slici 5.7.



Slika 5.6: Granulometrijske krive i krive zastupljenosti za uzorak U-1a pre i nakon izvođenja standardnog Proktorovog opita klasičnim ravnim maljem

¹ Pod „veštačkim“ komponentama podrazumevaju se materijali koji nisu „zemljastog“ porekla. Tu se ubrajaju: plastika, staklo, metal, keramika, tekstil i sl.



Slika 5.7: Granulometrijske krive i krive zastupljenosti za uzorak U-1b pre i nakon izvođenja standardnog Proktorovog opita maljem sa šiljcima

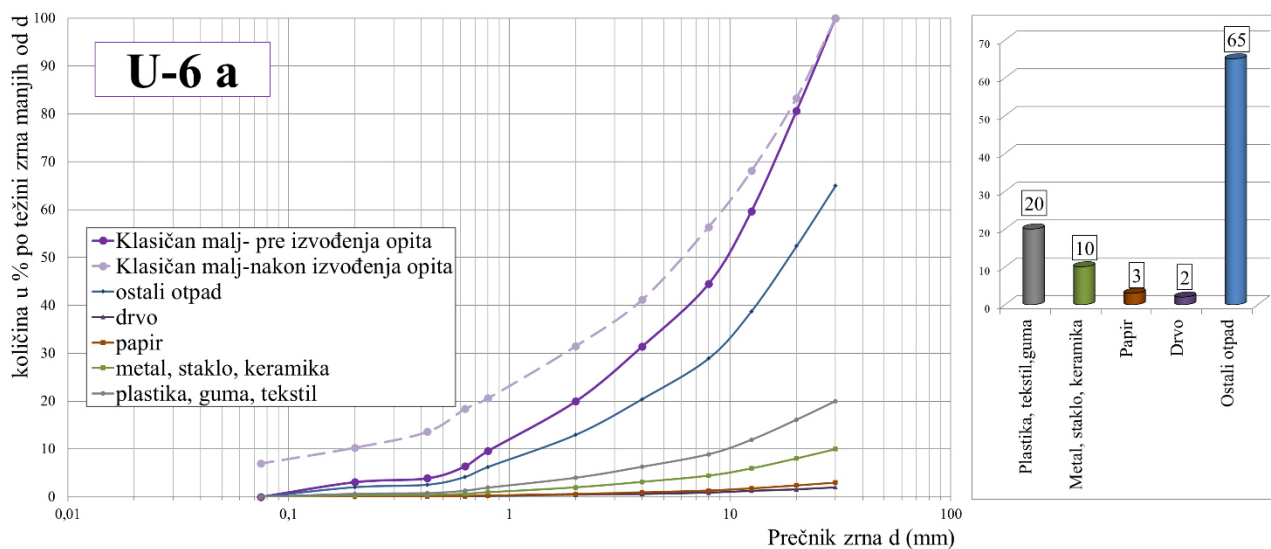
Uz grafički prikaz za granulometrijske krive, rezultati su dati i tabelarno (Tabela 5.1) tako što je definisana promena zastupljenosti pojedinih frakcija pre i nakon izvođenja opita. Veličina frakcija je podeljena u tri grupe (sitnozrne, srednjezrne i krupnozrne frakcije), tako da se uočava efekat razaranja komunalnog otpada tokom zbijanja različitim postupcima, što će detaljnije biti opisano u narednom poglavlju.

Tabela 5.1: Prikaz uticaja zbijanja na frakcije različitih dimenzija za uzorke U-1a i U-1b

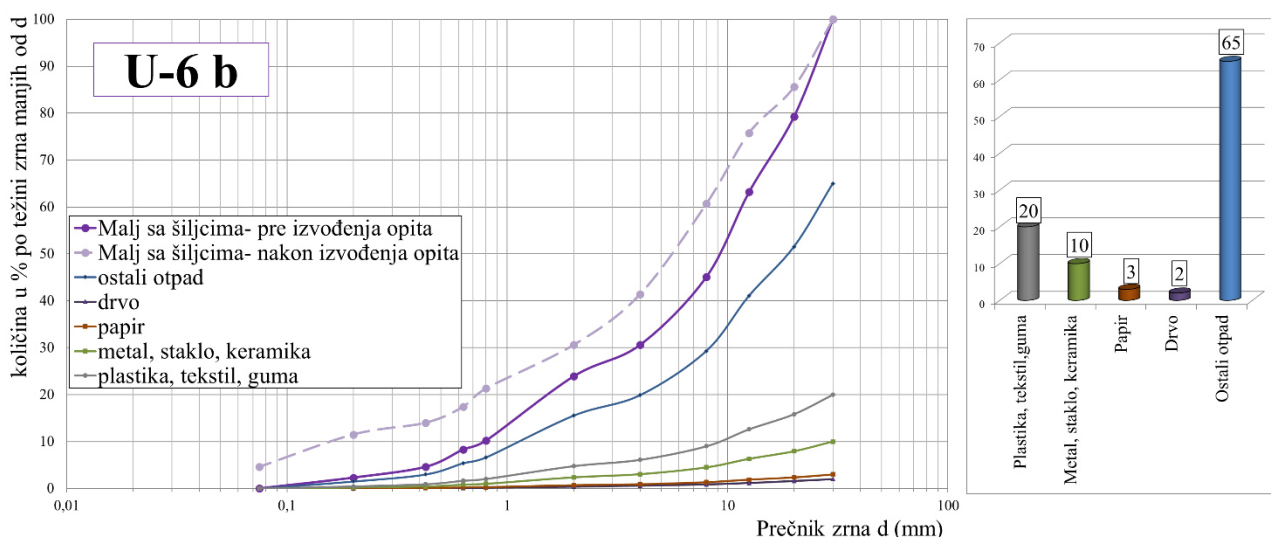
	PROCENAT FRAKCIJA KOJE SU SITNIJE OD OTVORA SITA (mm)		
	sitnozrne frakcije	srednjezrne frakcija	krupnozrne frakcije
	<1.0	1.0-10.0	10.0-30.0
Klasičan malj- pre izvođenja opita	12	37	51
Klasičan malj- nakon izvođenja opita	16	38	46
Malj sa šiljcima- pre izvođenja opita	15	35	50
Malj sa šiljcima- nakon izvođenja opita	18	44	38

Uzorci U-6a i U-6b

Grafički prikaz granulometrijskih krivih za uzorke sa nešto manjim učešćem komponente „ostali otpad“ (65%) prikazan je na Slici 5.8 za komunalni otpad zbijan klasičnim maljem i Slici 5.9 za komunalni otpad koji je zbijan maljem sa šiljcima.



Slika 5.8: Granulometrijske krive i krive zastupljenosti za uzorak U-6a pre i nakon izvođenja standardnog Proktorovog opita klasičnim ravnim maljem



Slika 5.9: Granulometrijske krive i krive zastupljenosti za uzorak U-6b pre i nakon izvođenja standardnog Proktorovog opita maljem sa šiljcima

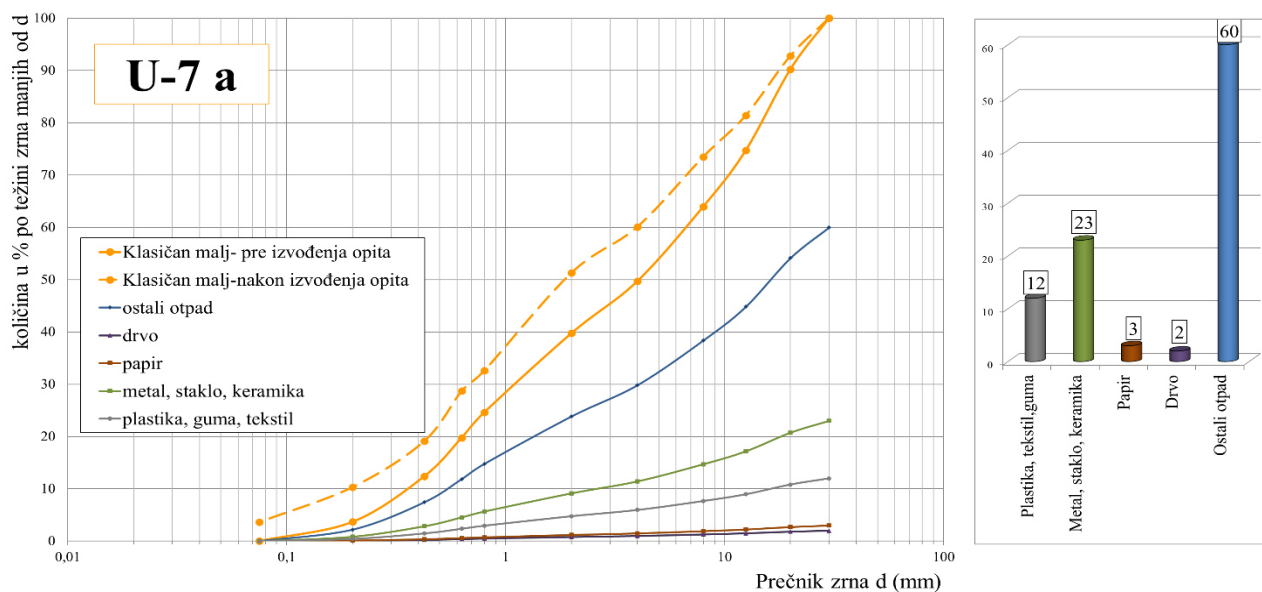
U tabeli 5.2 prikazana je promena zastupljenosti pojedinih frakcija pre i nakon zbijanja komunalnog otpada različitim maljevima.

Tabela 5.2: Prikaz uticaja zbijanja na frakcije različitih dimenzija za uzorke U-6a i U-6b

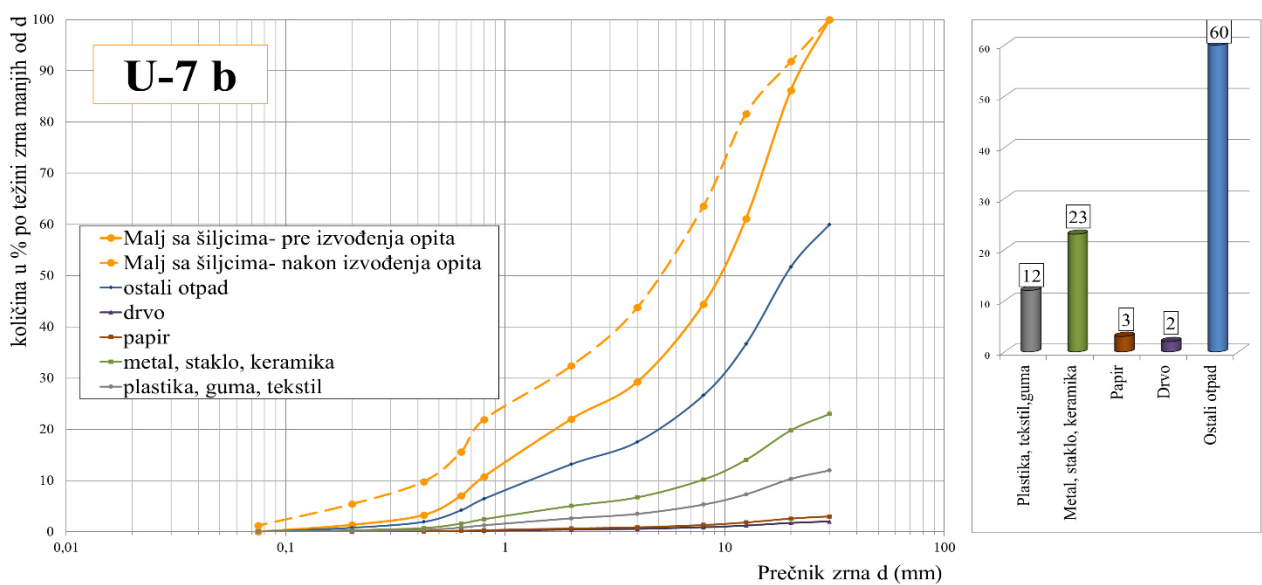
	PROCENAT FRAKCIJA KOJE SU SITNIJE OD OTVORA SITA (mm)		
	sitnozrne frakcije	srednjezrne frakcija	krupnozrne frakcije
	<1.0	1.0-10.0	10.0-30.0
Klasičan malj- pre izvođenja opita	12	39	49
Klasičan malj- nakon izvođenja opita	24	39	37
Malj sa šiljcima- pre izvođenja opita	14	40	46
Malj sa šiljcima- nakon izvođenja opita	24	44	32

Uzorci U-7a i U-7b

Granulometrijske krive za uzorak otpada sa najmanjim učešćem komponente „ostali otpad“ (60%) sa deponije Ada Huja prikazane su na Slici 5.10 i Slici 5.11.



Slika 5.10: Granulometrijske krive i krive zastupljenosti za uzorak U-7a pre i nakon izvođenja standardnog Proktorovog opita klasičnim ravnim maljem



Slika 5.11: Granulometrijske krive i krive zastupljenosti za uzorak U-7b pre i nakon izvođenja standardnog Proktorovog opita maljem sa šiljcima

Na osnovu podataka o granulometrijskom sastavu promena zastupljenosti pojedinih frakcija prikazana je u Tabeli 5.3.

Tabela 5.3: Prikaz uticaja zbijanja na frakcije različitih dimenzija za uzorke U-7a i U-7b

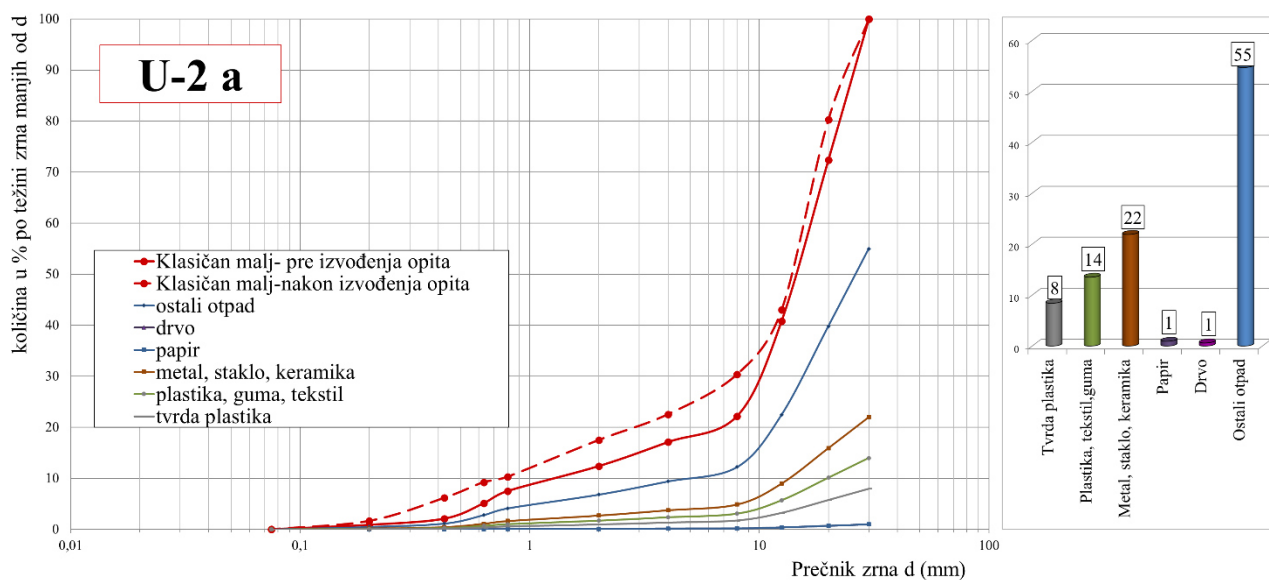
	PROCENAT FRAKCIJA KOJE SU SITNIJE OD OTVORA SITA (mm)		
	sitnozrne frakcije	srednjezne frakcija	krupnozrne frakcije
	<1.0	1.0-10.0	10.0-30.0
Klasičan malj- pre izvođenja opita	11	26	63
Klasičan malj- nakon izvođenja opita	19	41	40
Malj sa šiljcima- pre izvođenja opita	11	29	60
Malj sa šiljcima- nakon izvođenja opita	23	45	32

5.2.2. Deponija Plandište

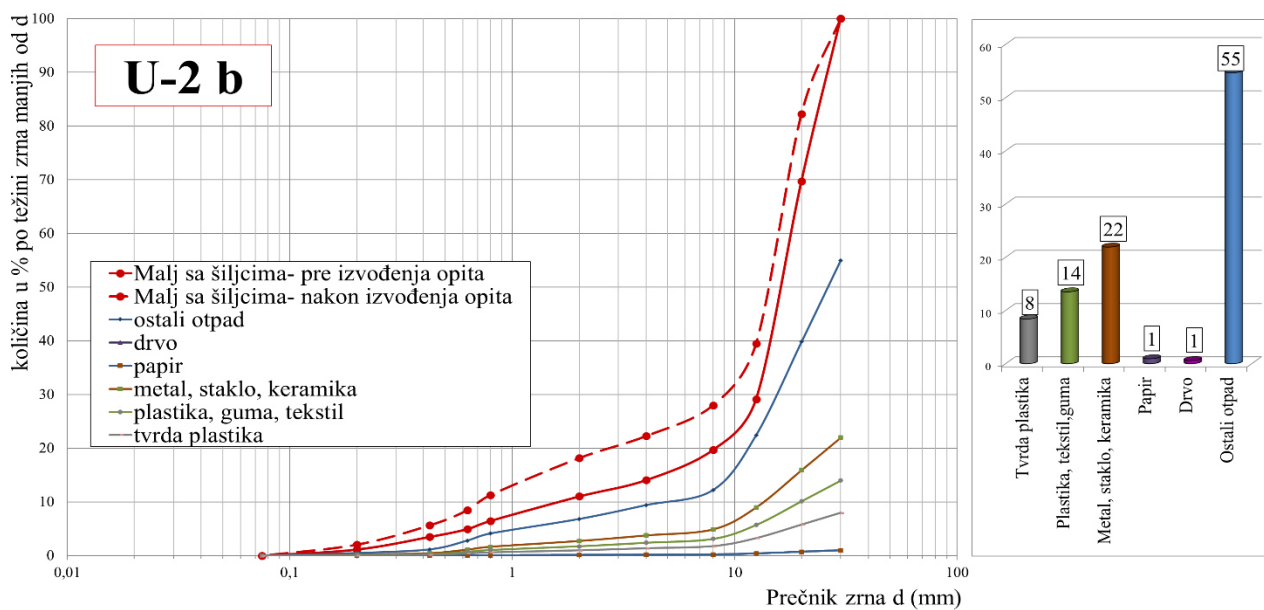
Za mlađi otpad (starosti oko 10 godina) sa deponije Plandište formirani su uzorci u četiri različita sastava. S obzirom da je prisustvo komponente „ostali otpad“ manje u odnosu na deponiju Ada Huja, a sadržaj veštačkih komponenti (plastika, staklo, metal i sl.) viši, uočava se razlika na granulometrijskim krivama pre i nakon izvođenja Proktorovog opita. Razlog je drugačije ponašanje veštačkih komponenti tokom razaranja zbijanjem. U okviru ove grupe ispitani su uzorci U-2a, U-2b, U-3a, U-3b, U-4a, U-4b, U-5a i U-5b.

Uzorci U-2a i U-2b

Granulometrijske krive i krive zastupljenosti za uzorke koji sadrže najveći procenat komponente „ostali otpad“ za deponiju Plandište prikazane su na Slici 5.12 i Slici 5.13.



Slika 5.12: Granulometrijske krive i krive zastupljenosti za uzorak U-2a pre i nakon izvođenja standardnog Proktorovog opita klasičnim ravnim maljem



Slika 5.13: Granulometrijske krive i krive zastupljenosti za uzorak U-2b pre i nakon izvođenja standardnog Proktorovog opita maljem sa šiljcima

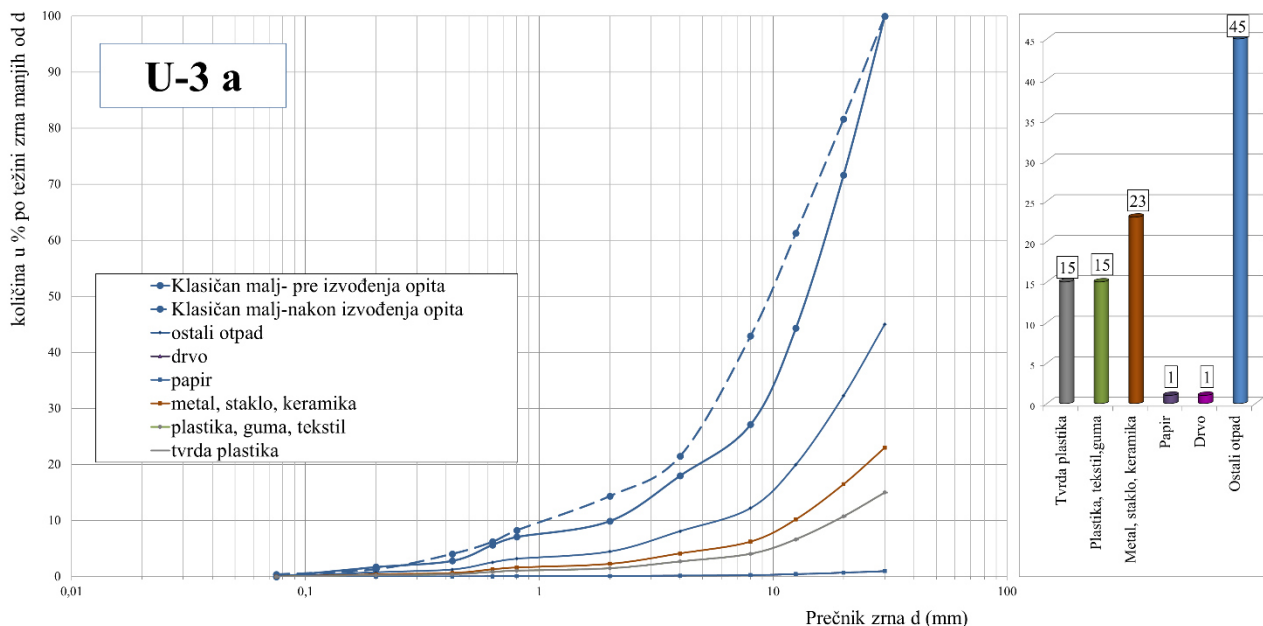
Promena veličina frakcija prikazana je u Tabeli 5.4.

Tabela 5.4: Prikaz uticaja zbijanja na frakcije različitih dimenzija za uzorke U-2a i U-2b

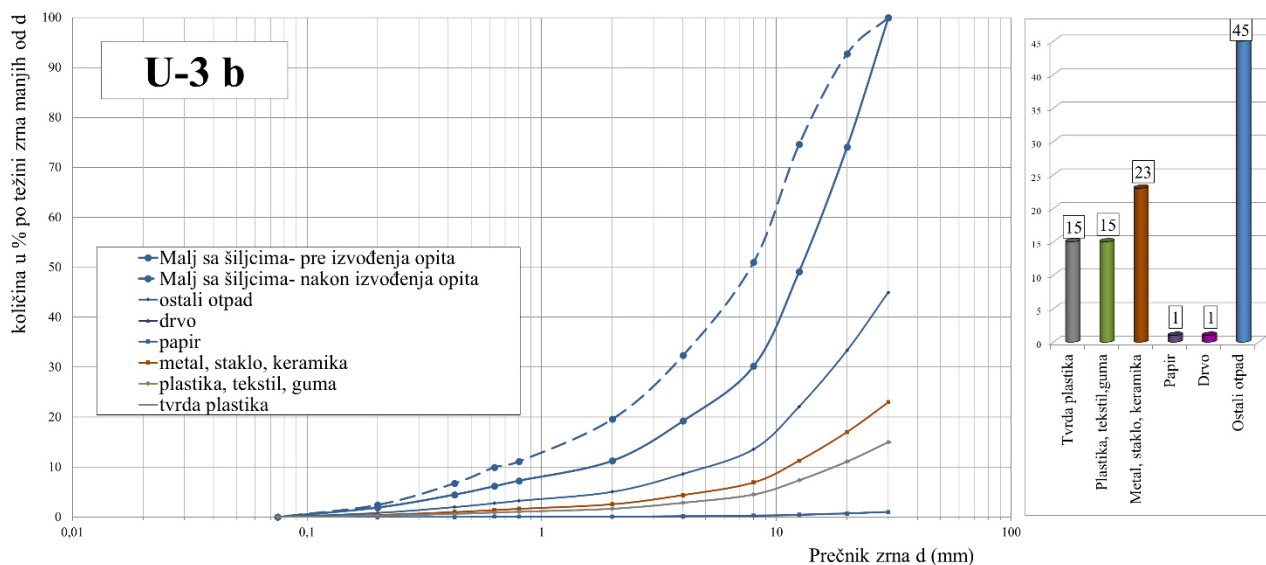
	PROCENAT FRAKCIJA KOJE SU SITNIJE OD OTVORA SITA (mm)		
	sitnozrne frakcije	srednjezrne frakcija	krupnozrne frakcije
	<1.0	1.0-10.0	10.0-30.0
Klasičan malj- pre izvođenja opita	9	21	70
Klasičan malj- nakon izvođenja opita	12	23	65
Malj sa šiljcima- pre izvođenja opita	7	16	77
Malj sa šiljcima- nakon izvođenja opita	13	19	68

Uzorci U-3a i U-3b

Granulometrijski sastav za uzorke U-3a i U-3b prikazan je na Slici 5.14 i Slici 5.15.



Slika 5.14: Granulometrijske krive i krive zastupljenosti za uzorak U-3a pre i nakon izvođenja standardnog Proktorovog opita klasičnim ravnim maljem



Slika 5.15: Granulometrijske krive i krive zastupljenosti za uzorak U-3b pre i nakon izvođenja standardnog Proktorovog opita maljem sa šiljcima

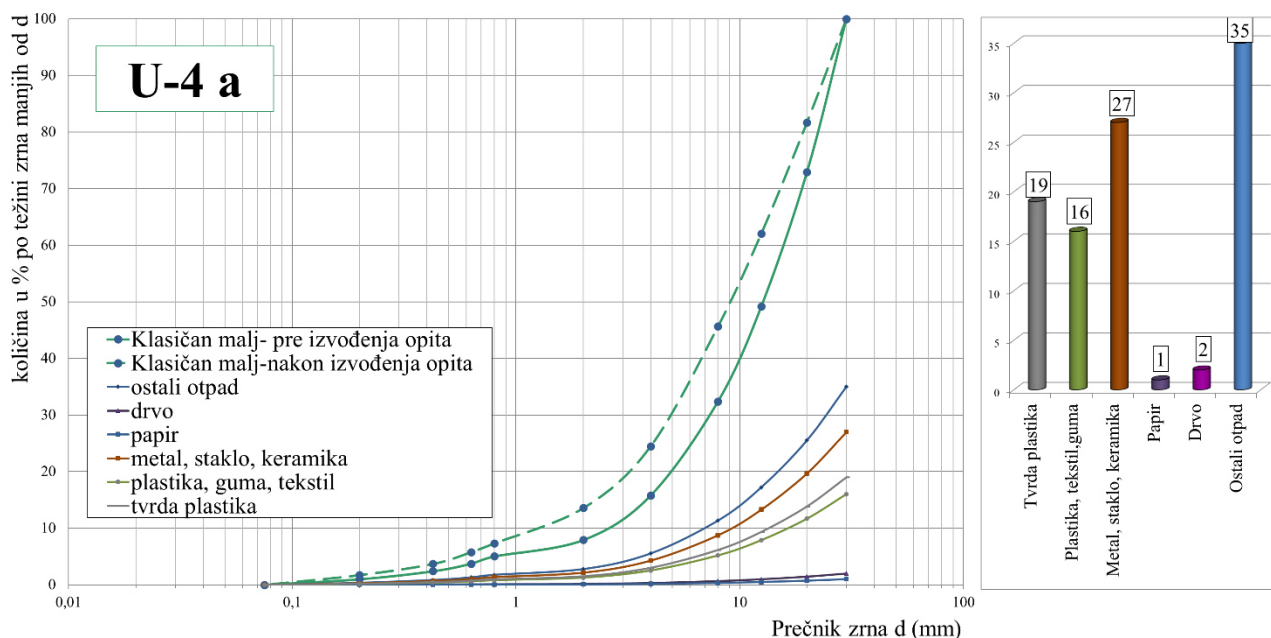
Na osnovu granulometrijskog sastava, u Tabeli 5.5 je prikazana promena veličine frakcija tokom zbijanja.

Tabela 5.5: Prikaz uticaja zbijanja na frakcije različitih dimenzija za uzorke U-3a i U-3b

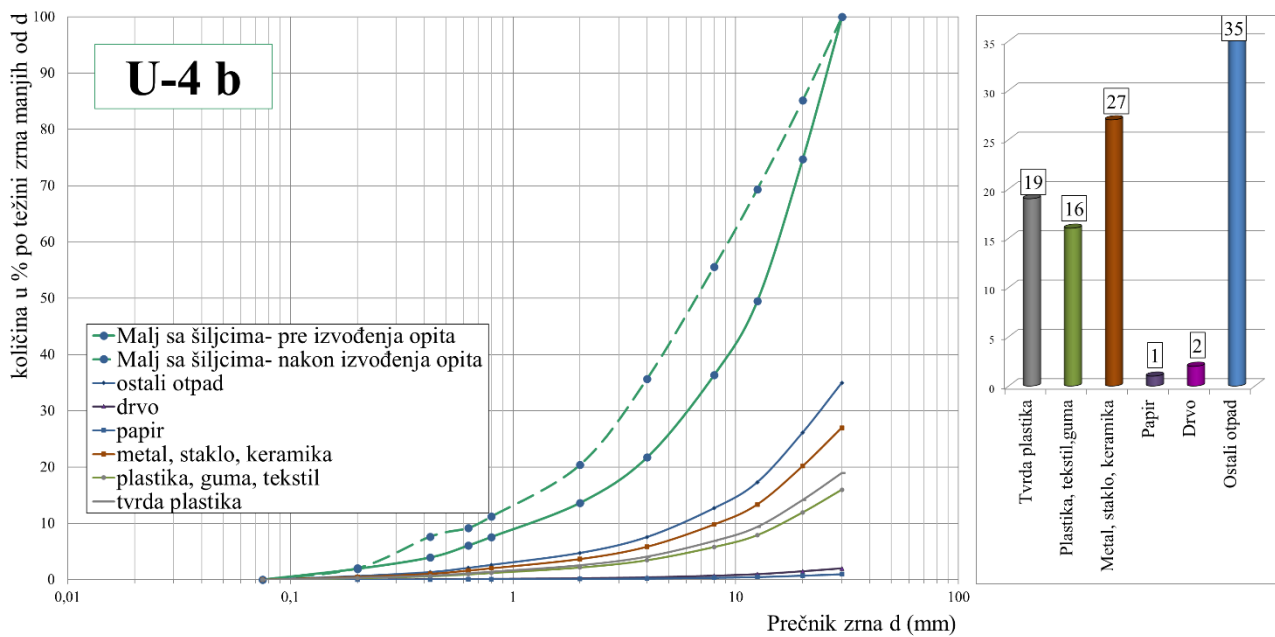
	PROCENAT FRAKCIJA KOJE SU SITNIJE OD OTVORA SITA (mm)		
	sitnozrne frakcije	srednjezne frakcija	krupnozrne frakcije
	<1.0	1.0-10.0	10.0-30.0
Klasičan malj- pre izvođenja opita	8	26	66
Klasičan malj- nakon izvođenja opita	10	41	49
Malj sa šiljcima- pre izvođenja opita	8	30	62
Malj sa šiljcima- nakon izvođenja opita	13	48	39

Uzorci U-4a i U-4b

Grafički prikaz granulometrijskog sastava za uzorke U-4a i U-4b koji je određen pre i nakon zbijanja Proktorovim opitom različitim postupcima prikazan je na Slici 5.16 i Slici 5.17.



Slika 5.16: Granulometrijske krive i krive zastupljenosti za uzorak U-4a pre i nakon izvođenja standardnog Proktorovog opita klasičnim ravnim maljem



Slika 5.17: Granulometrijske krive i krive zastupljenosti za uzorak U-4b pre i nakon izvođenja standardnog Proktorovog opita maljem sa šiljcima

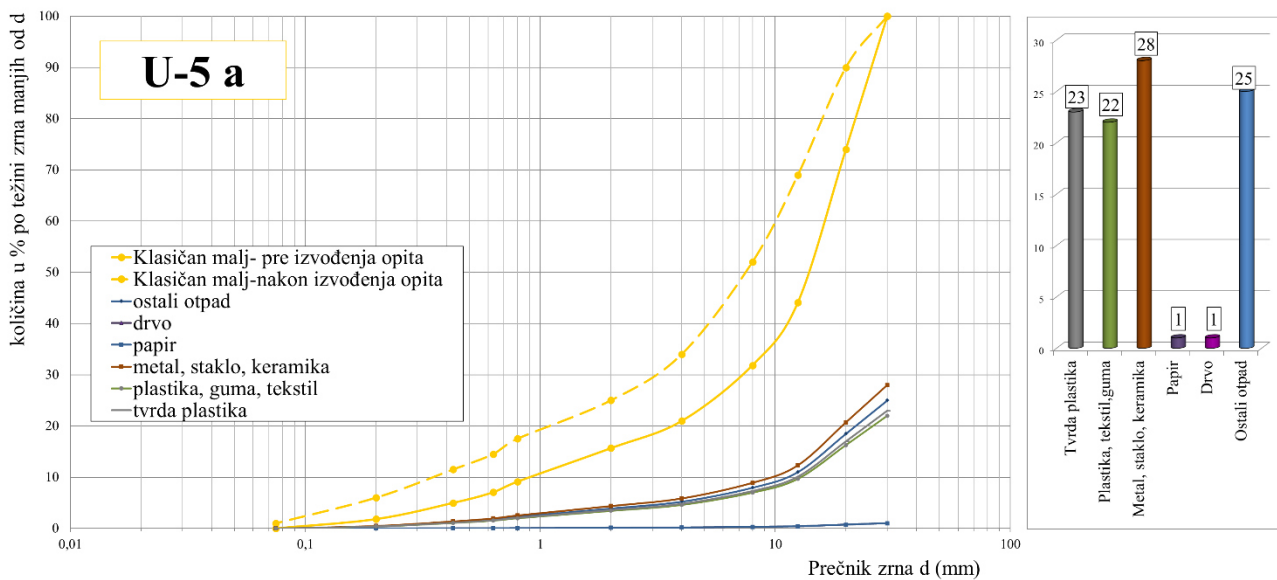
Promene na granulometrijskim krivama tokom zbijanja prikazane su u Tabeli 5.6.

Tabela 5.6: Prikaz uticaja zbijanja na frakcije različitih dimenzija za uzorke U-4a i U-4b

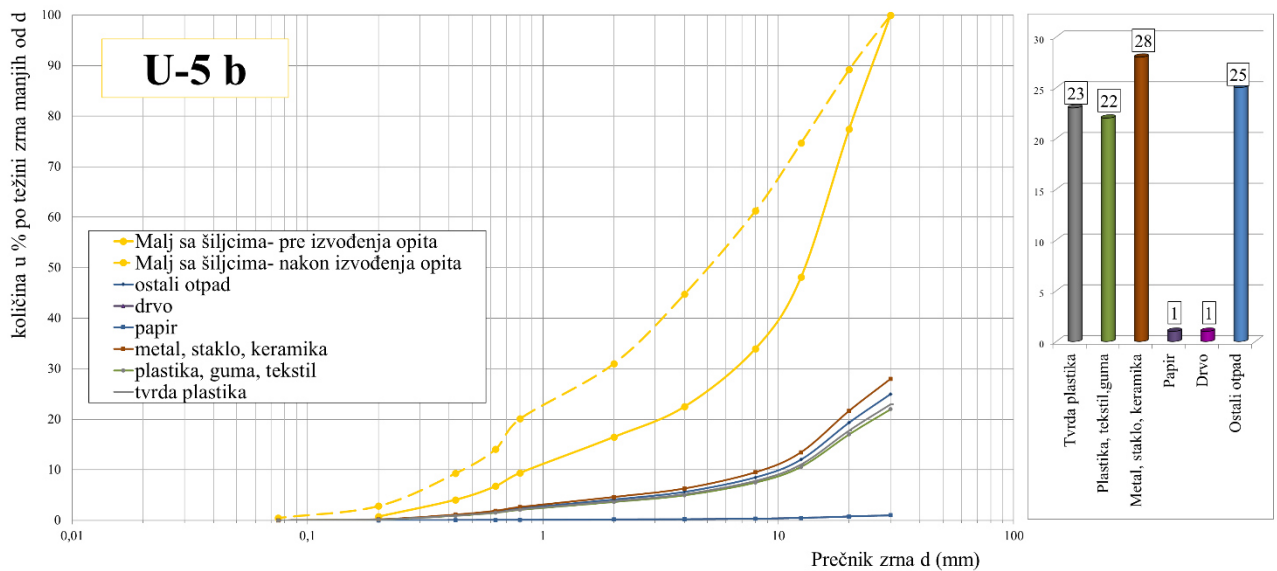
	PROCENAT FRAKCIJA KOJE SU SITNIJE OD OTVORA SITA (mm)		
	sitnozrne frakcije	srednjezrne frakcija	krupnozrne frakcije
	<1.0	1.0-10.0	10.0-30.0
Klasičan malj- pre izvođenja opita	6	34	60
Klasičan malj- nakon izvođenja opita	9	54	37
Malj sa šiljcima- pre izvođenja opita	9	32	58
Malj sa šiljcima- nakon izvođenja opita	13	49	38

Uzoraci U-5a i U-5b

Granulometrijski sastav za uzorak sa najvećim učešćem veštačke komponente prikazan je na Slici 5.18 i Slici 5.19.



Slika 5.18: Granulometrijske krive i krive zastupljenosti za uzorak U-5a pre i nakon izvođenja standardnog Proktorovog opita klasičnim ravnim maljem



Slika 5.19: Granulometrijske krive i krive zastupljenosti za uzorak U-5b pre i nakon izvođenja standardnog Proktorovog opita maljem sa šiljcima

Promena zastupljenosti pojedinih frakcija prikazana je u Tabeli 5.7.

Tabela 5.7: Prikaz uticaja zbijanja na frakcije različitih dimenzija za uzorke U-5a i U-5b

	PROCENAT FRAKCIJA KOJE SU SITNIJE OD OTVORA SITA (mm)		
	sitnozrne frakcije	srednjezne frakcija	krupnozrne frakcije
	<1.0	1.0-10.0	10.0-30.0
Klasičan malj- pre izvođenja opita	6	34	60
Klasičan malj- nakon izvođenja opita	9	54	37
Malj sa šiljcima- pre izvođenja opita	9	32	58
Malj sa šiljcima- nakon izvođenja opita	13	49	38

5.3. Rezultati ispitivanja dobijeni Proktorovim opitom

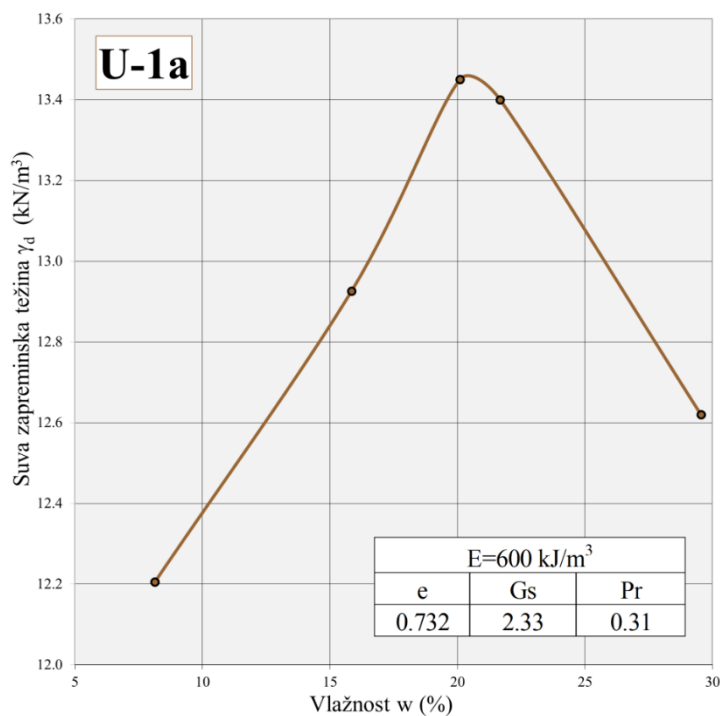
Nakon izvršenog sejanja pripremljenog materijala, urađen je Proktorov opit klasičnim i maljem sa šiljcima na 14 uzoraka. Ispitivanjima je utvrđeno da starost i sastav otpada utiče na rezultate Proktorovog opita što je prikazano dalje u tekstu. Prikazani su rezultati ispitivanja za deponije Ada Huja i Plandište.

5.3.1. Deponija Ada Huja

Kao što je naglašeno ranije, komunalni otpad sa deponije Ada Huja predstavlja stari otpad sa povećanim učešćem sitnozrne komponente ("ostali otpad"), što je uticalo na rezultate Proktorovog opita.

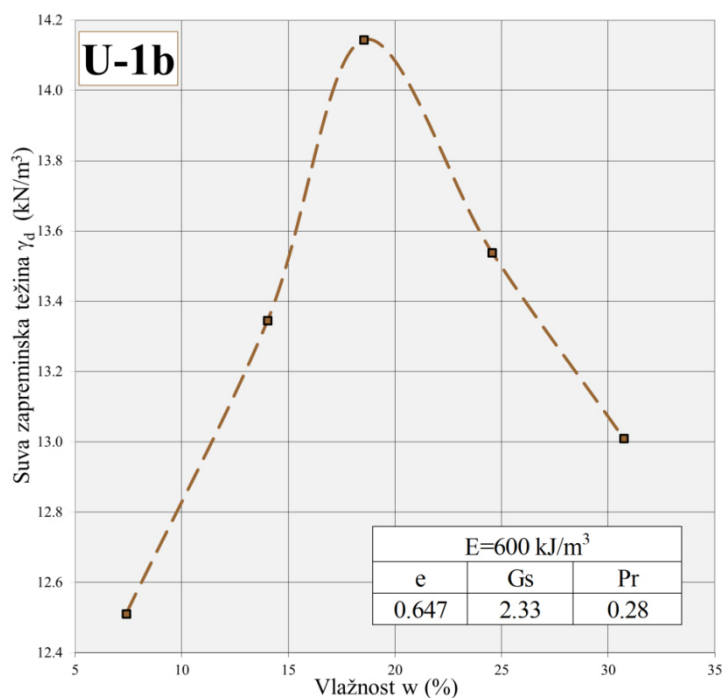
Uzorci U-1a i U-1b

Na uzorku U-1a, sa najvećim učešćem komponente "ostali otpad" dobijena je maksimalna suva zapreminska težina $\gamma_{dmax}=13.45 \text{ kN/m}^3$, pri optimalnoj vlažnosti $w_{opt}=20.10\%$ u slučaju korišćenja standardne opreme tokom izvođenja Proktorovog opita (Slika 5.20).



Slika 5.20: Rezultati Proktorovog opita sa klasičnim ravnim maljem za uzorak U-1a

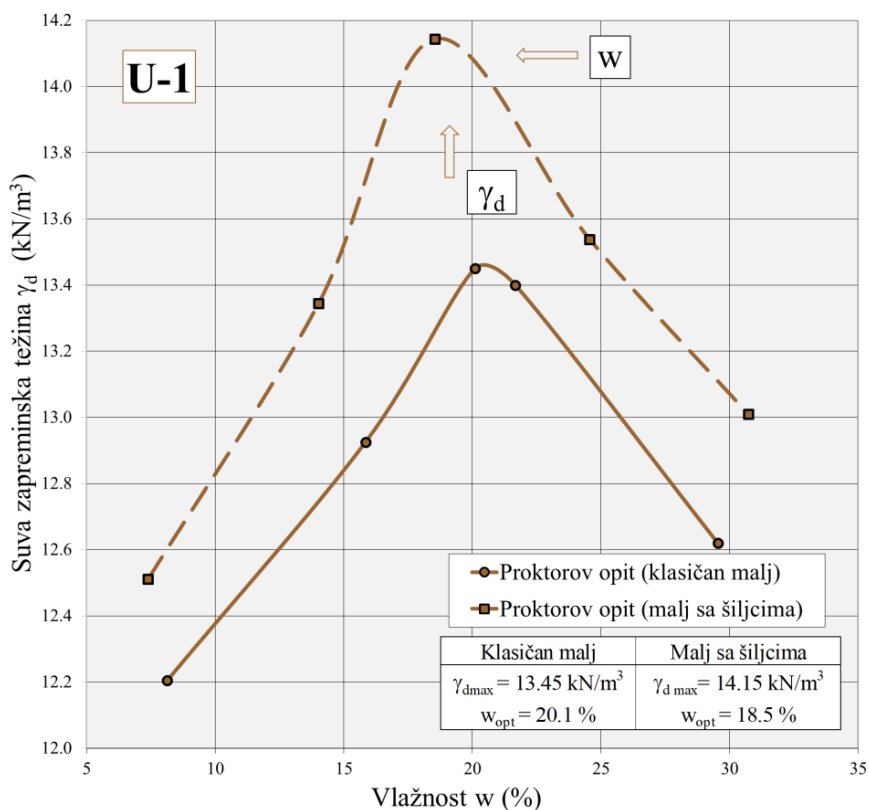
Rezultat Proktorovog opita koji je izveden maljem sa šiljcima za uzorak U-1b prikazan je na Slici 5.21.



Slika 5.21: Rezultati Proktorovog opita sa maljem sa šiljcima za uzorak U-1b

Na Slici 5.21 vidi se da kada su u pitanju rezultati dobijeni korišćenjem modifikovanog malja sa šiljcima, na uzorku istog sastava, dobijena je nešto veća vrednost maksimalne suve zapremine težine $\gamma_{dmax}=14.15 \text{ kN/m}^3$ pri optimalnoj vlažnosti od $w_{opt}=18.50\%$.

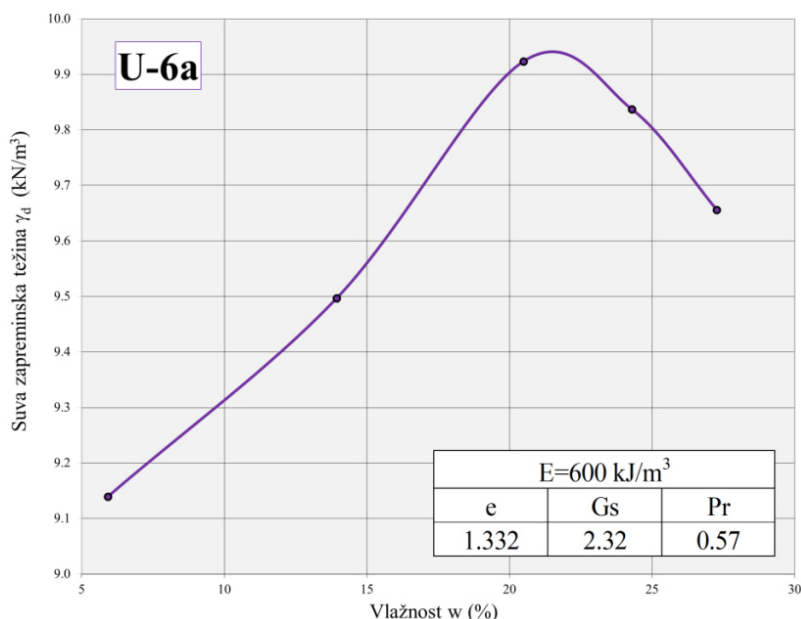
Na Slici 5.22 prikazan je zbirni dijagram za obe Proktorove krive izvedene za uzorak U-1 (a i b).



Slika 5.22: Uporedni prikaz rezultata Proktorovog opita za uzorak U-1a i U-1b (klasičan i malj sa šiljcima)

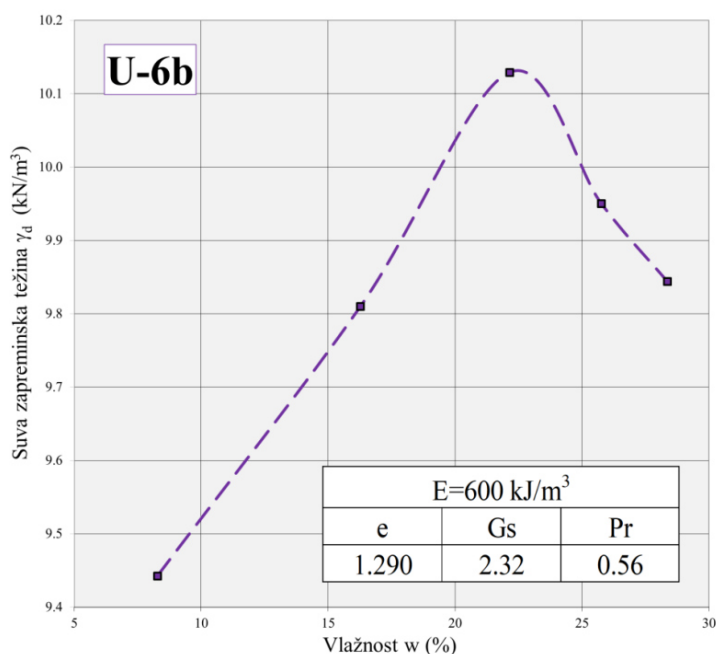
Uzorak U-6a i U-6b

Rezultati standardnog Proktorovog opita izvedenih klasičnim maljem prikazani su na Slici 5.23.



Slika 5.23: Rezultati Proktorovog opita sa klasičnim ravnim maljem za uzorak U-6a

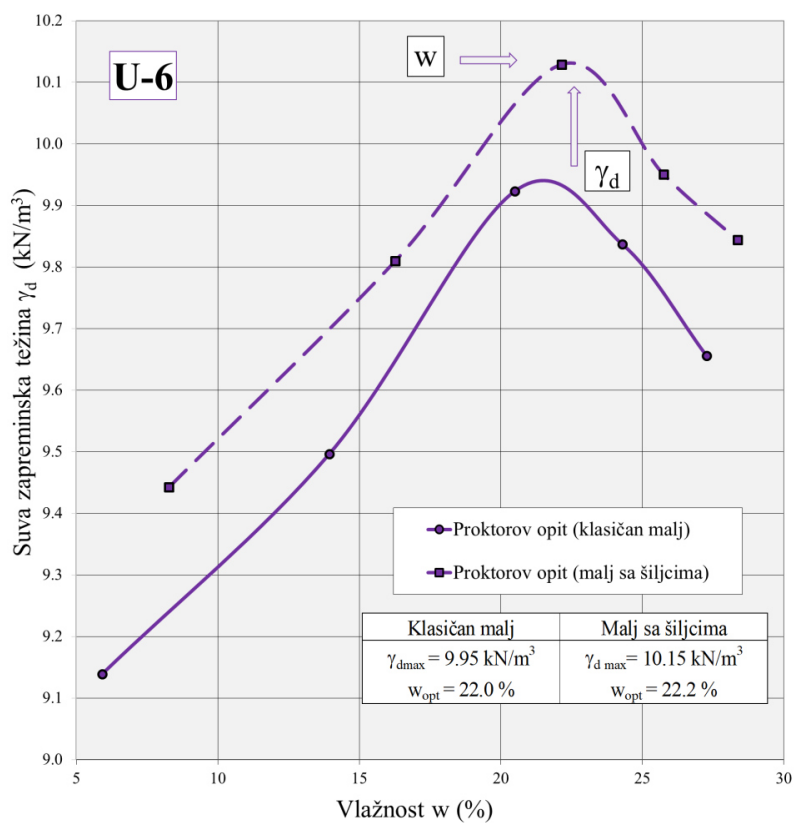
Na uzorku U-6a za zbijanje klasičnim maljem dobijena je maksimalna suva zapreminska težina $\gamma_{d\max}=9.95 \text{ kN/m}^3$ i optimalna vlažnost $w_{\text{opt}}=22.0\%$. Rezultati standardnog Proktorovog opita izvedenog maljem sa šiljcima prikazani su na Slici 5.24.



Slika 5.24: Rezultati Proktorovog opita sa maljem sa šiljcima za uzorak U-6b

U slučaju nekonvencionalnog izvođenja standardnog Proktorovog opita, pomoću inovativnog malja sa šiljcima, dobijena je maksimalna suva zapreminska težina $\gamma_{d\max}=10.15$, pri optimalnoj vlažnosti oko $w_{\text{opt}}=22.2\%$.

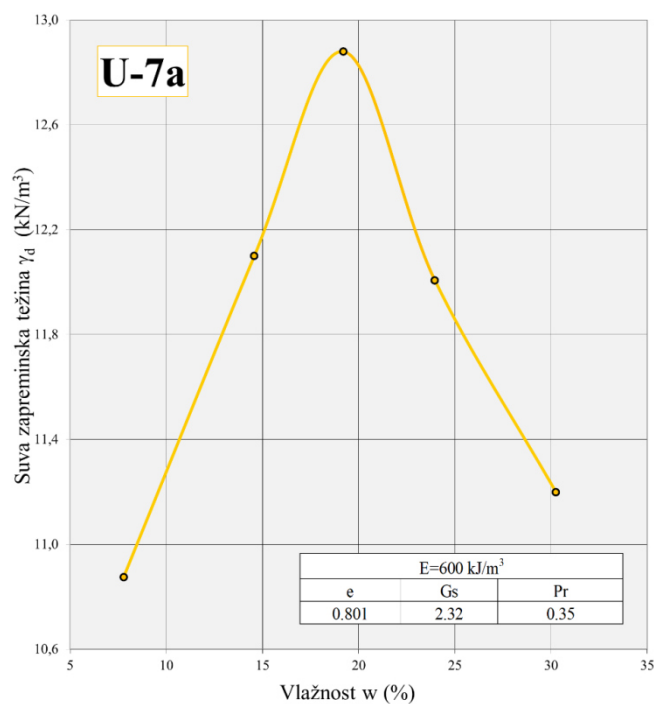
Uporedni prikaz rezultata Proktorovog opita za uzorak U-6a i U-6b prikazan je na Slici 5.25.



Slika 5.25: Uporedni prikaz rezultata Proktorovog opita za uzorak U-6a i U-6b (klasičan i malj sa šiljcima)

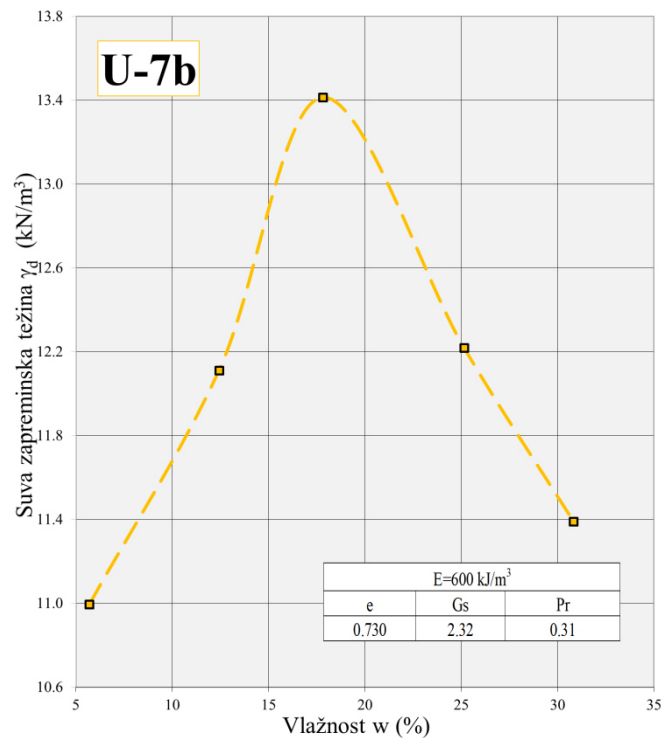
Uzoraci U-7a i U-7b

Rezultat Proktorovog opita upotrebom klasičnog malja za uzorak U-7a prikazan je na Slici 5.26.



Slika 5.26: Rezultati Proktorovog opita sa klasičnim ravnim maljem za uzorak U-7a

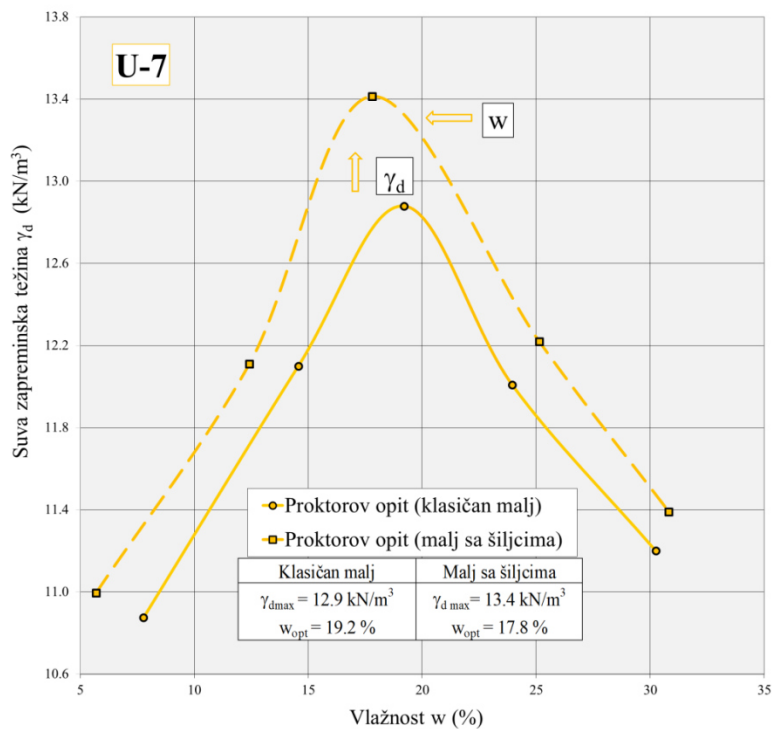
Za uzorak U-7a dobijena je maksimalna suva zapreminska težina $\gamma_{dmax}=12.9 \text{ kN/m}^3$ i optimalna vlažnost $w_{opt}=19.2\%$.



Slika 5.27: Rezultati Proktorovog opita sa maljem sa šiljcima za uzorak U-7b

Za Proktorov opit koji je izveden maljem sa šiljcima za uzorak U-7b dobijena je maksimalna suva zapreminska težina $\gamma_{dmax}=13.4 \text{ kN/m}^3$ pri optimalnoj vlažnosti $w_{opt}=17.8\%$ (Slika 5.27).

Dobijene Proktorove krive za dva različita načina izvođenja opita prikazane su na Slici 5.28.



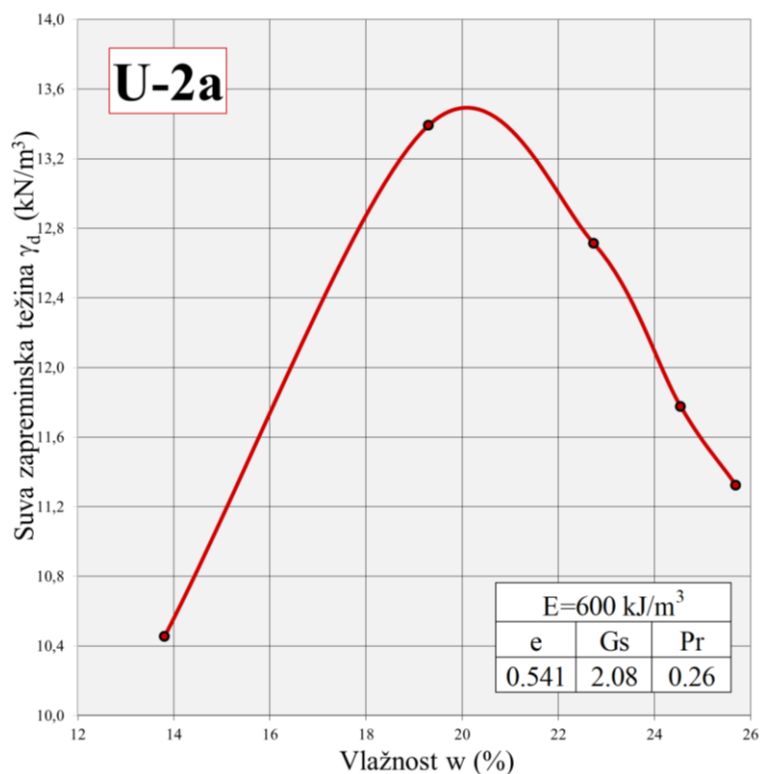
Slika 5.28: Uporedni prikaz rezultata Proktorovog opita za uzorak U-7a i U-7b (klasičan i malj sa šiljcima)

5.3.2. Deponija Plandište

Komunalni otpad sa deponije Plandište je mlađi u odnosu na otpad sa deponije Ada Huja. To se pre svega ogleda u različitom sastavu zbog povećanog prisustvu veštačkih komponenti, pa su samim tim i rezultati Proktorovog opita nešto drugačiji.

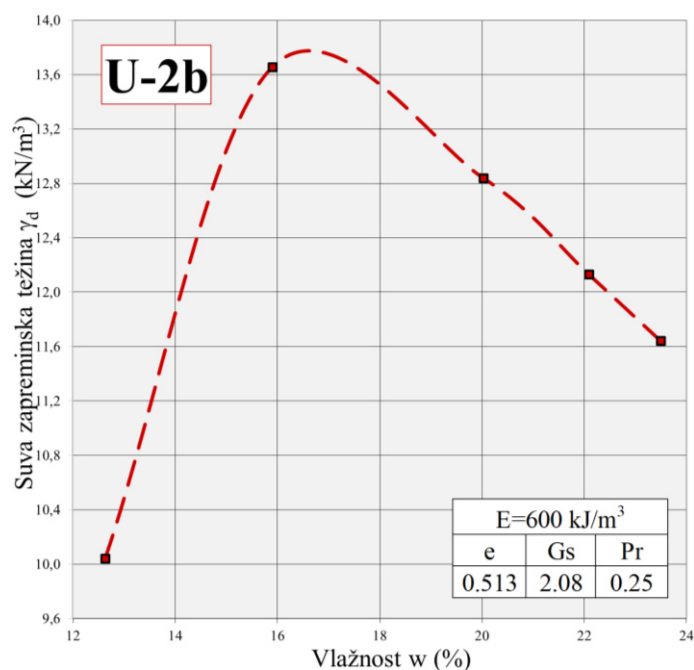
Uzorci U-2a i U-2b

Rezultati standardnog Proktorovog opita za uzorak U-2a izvedenog sa klasičnim ravnim maljem prikazani su na Slici 5.29.



Slika 5.29: Rezultati Proktorovog opita sa klasičnim ravnim maljem za uzorak U-2a

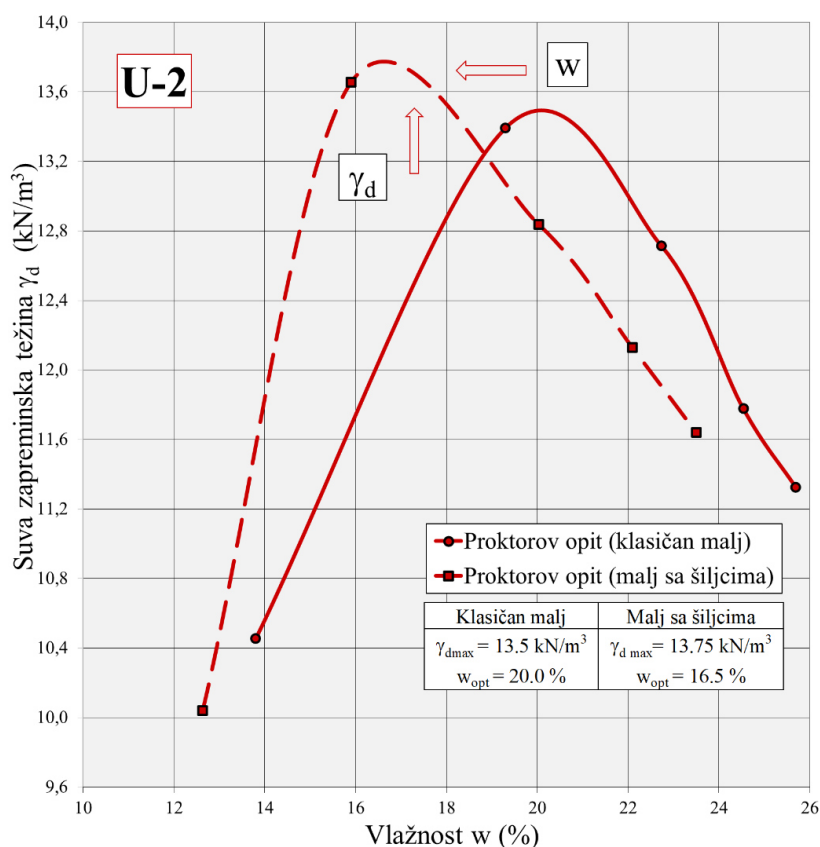
Na uzorku U-2b, sa najvećim učešćem nerazvrstanog otpada ("ostali otpad") dobijena je maksimalna suva zapreminska težina $\gamma_{dmax}=13.5 \text{ kN/m}^3$, pri optimalnoj vlažnosti $w_{opt}=20.0 \%$ u slučaju korišćenja standardne opreme tokom izvođenja Proktorovog opita. Rezultat Proktorovog opita izvedenog maljem sa šiljcima prikazan je na Slici 5.30.



Slika 5.30: Rezultati Proktorovog opita sa maljem sa šiljcima za uzorak U-2b

Kada su u pitanju rezultati dobijeni korišćenjem inovativnog malja sa šiljcima, na istom uzorku U-2b, dobijena je nešto veća vrednost maksimalne suve zapremine težine $\gamma_{dmax}=13.75 \text{ kN/m}^3$ pri optimalnoj vlažnosti od $w_{opt}=16.50\%$.

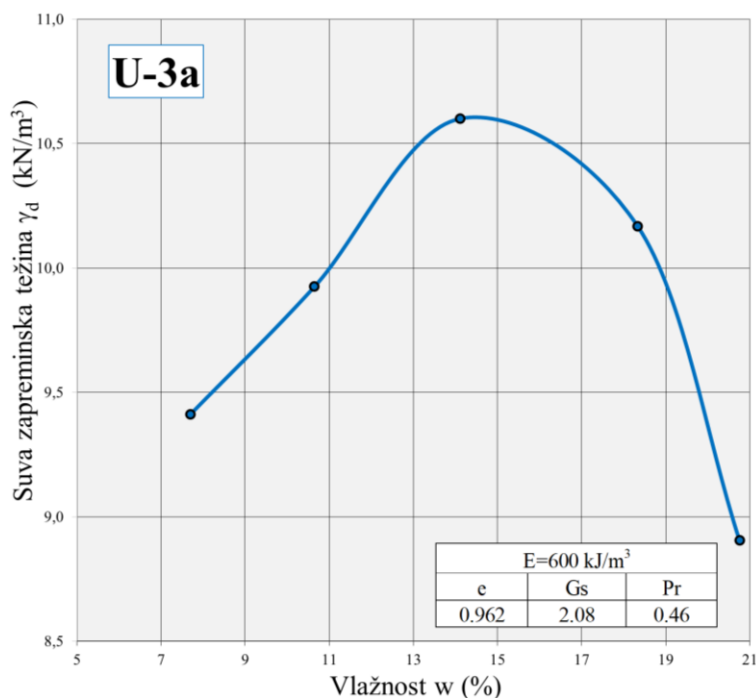
Dobijene Proktorove krive za dva načina izvođenja opita date su grafički na Slici 5.31.



Slika 5.31: Uporedni prikaz rezultata Proktorovog opita za uzorak U-2a i U-2b (klasičan i malj sa šiljcima)

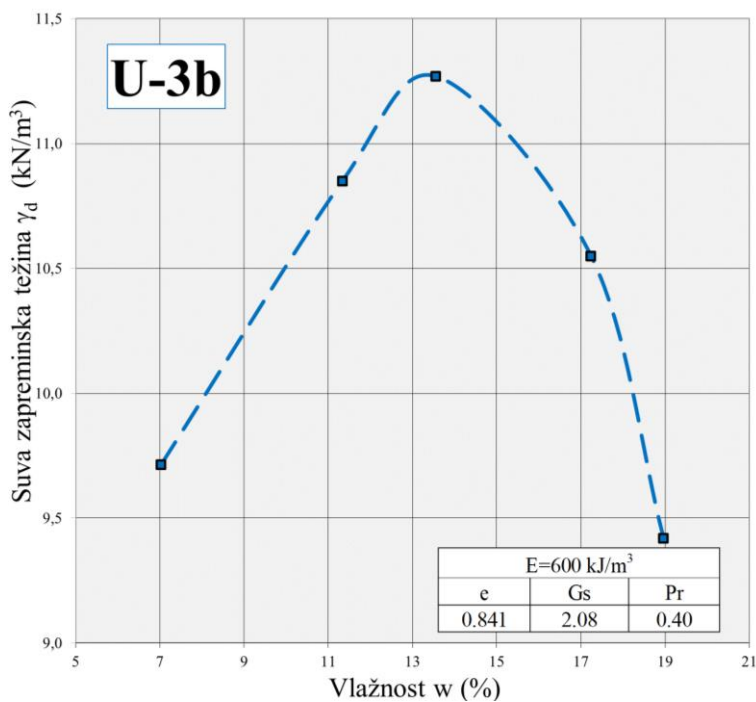
Uzorci U-3a i U-3b

Kao što je prikazano na Slici 5.32 za uzorak U-3a, maksimalna suva zapreminska težina dobijena Proktorovim opitom kod klasičnog malja iznosila je $\gamma_{dmax}=10.60 \text{ kN/m}^3$ pri optimalnoj vlažnosti od $w_{opt}=14.1\%$.



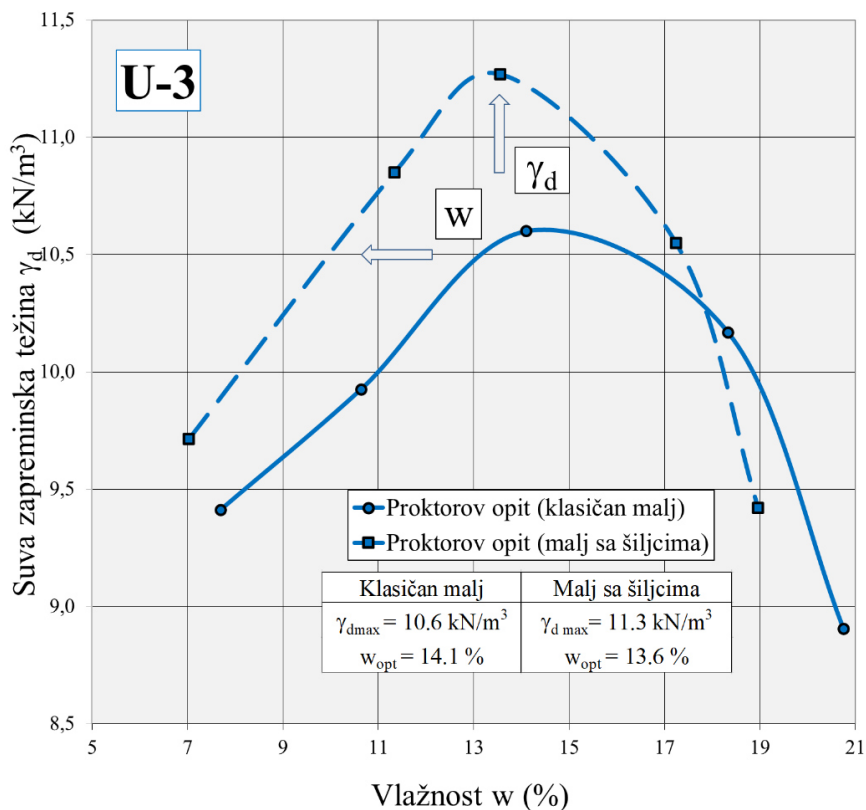
Slika 5.32: Rezultati Proktorovog opita sa klasičnim ravnim maljem za uzorak U-3a

Rezultati standardnog Proktorovog opita izvedenog inovativnim maljem sa šiljcima na uzorku U-3b prikazani su na Slici 5.33.



Slika 5.33: Rezultati Proktorovog opita sa maljem sa šiljcima za uzorak U-3b

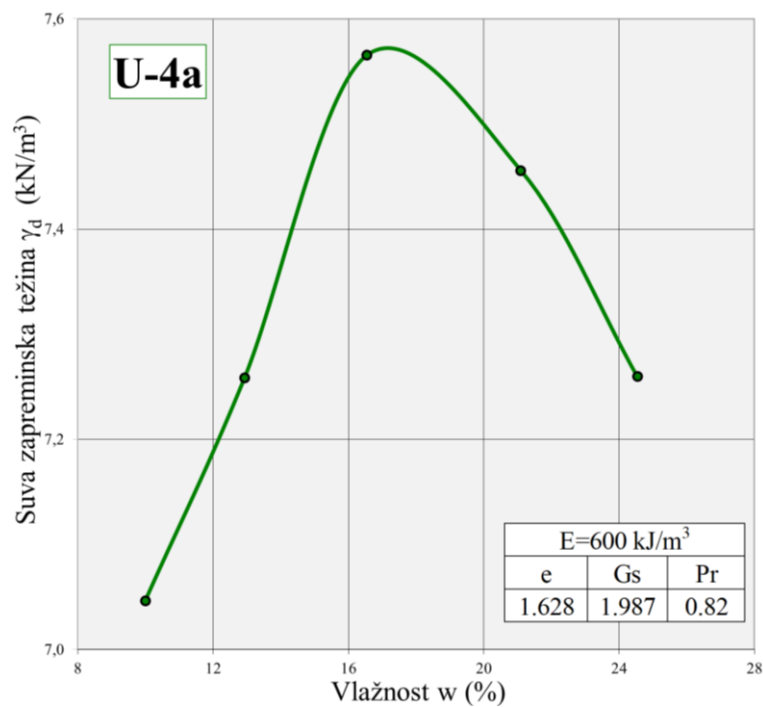
Inovativnim maljem sa šiljcima dobijena je maksimalna suva zapreminska težina $\gamma_{dmax}=11.3 \text{ kN/m}^3$ uz optimalnu vlažnost od 13.6%. Zbirni grafički prikaz Proktorovih krivih izvedenih za uzorak U-3a i U-3b prikazan je na Slici 5.34.



Slika 5.34: Uporedni prikaz rezultata Proktorovog opita za uzorak U-3a i U-3b (klasičan i malj sa šiljcima)

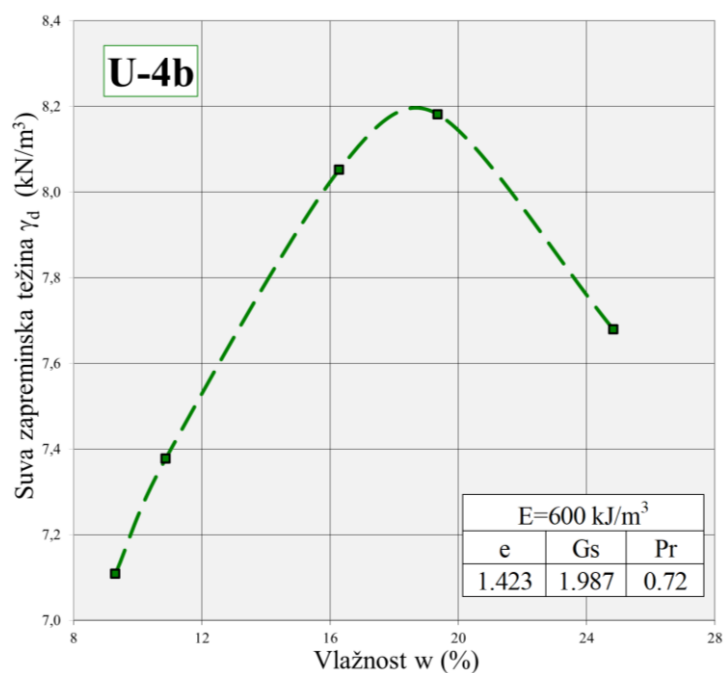
Uzorci U-4a i U-4b

Rezultati standardnog Proktorovog opita za klasičan malj prikazani su na Slici 5.35. Za uzorak U-4a dobijena je maksimalna suva zapreminska težina $\gamma_{dmax}=7.57 \text{ kN/m}^3$ i optimalna vlažnost $w_{opt}=17.0\%$



Slika 5.35: Rezultati Proktorovog opita sa klasičnim ravnim maljem za uzorak U-4a

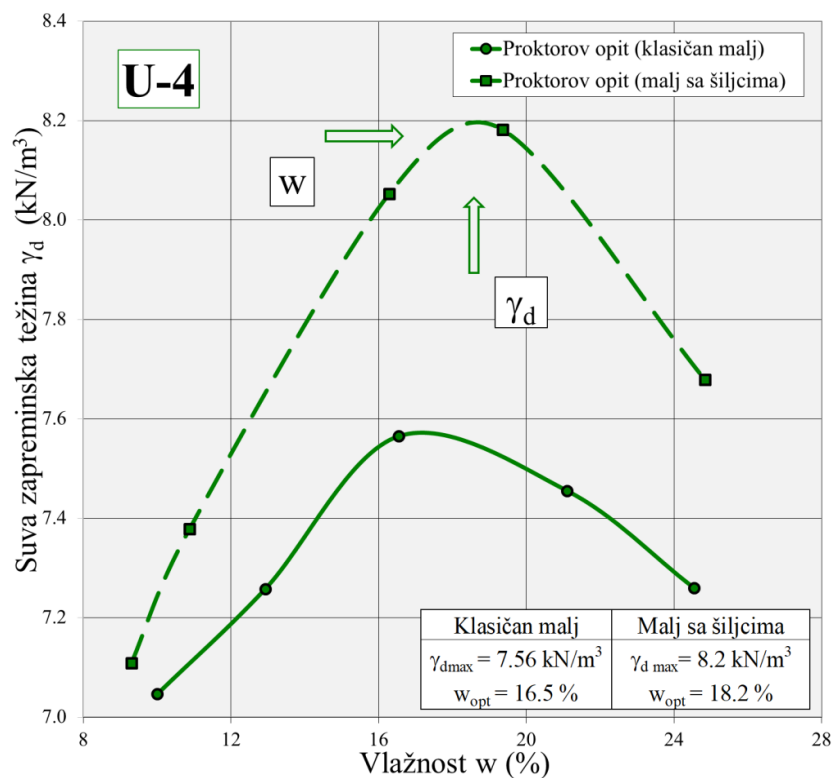
Rezultat standardnog Proktorovog opita izvedenog maljem sa šiljcima za uzorak U-4b prikazani su na Slici 5.36.



Slika 5.36: Rezultati Proktorovog opita sa maljem sa šiljcima za uzorak U-4b

U slučaju nekonvencionalnog izvođenja Proktorovog opita, pomoću inovativnog malja sa šiljcima, dobijena je maksimalna suva zapreminska težina $\gamma_{dmax}=8.2 \text{ kN/m}^3$, pri optimalnoj vlažnosti $w_{opt}=18.20\%$.

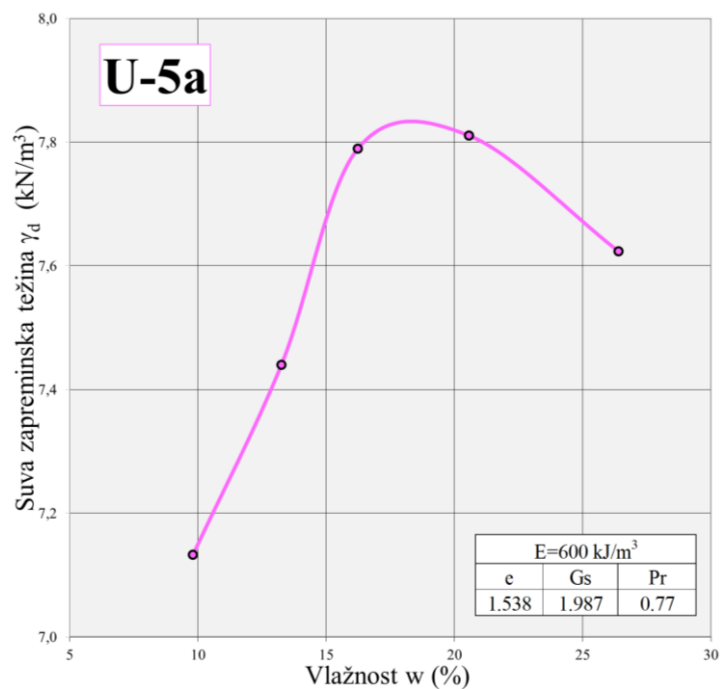
Zbirni grafički prikaz Proktorovih krivih izvedenih za uzorak U-4a i U-4b prikazan je na Slici 5.37.



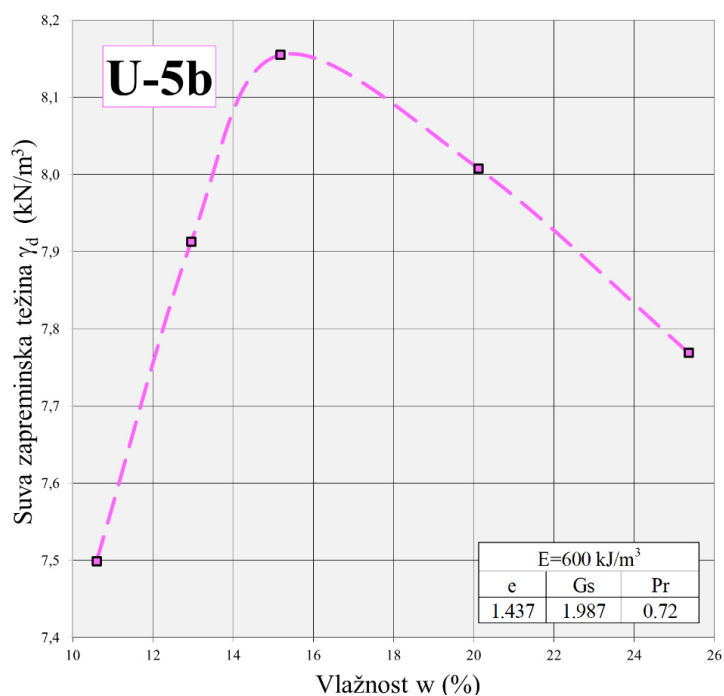
Slika 5.37: Uporedni prikaz rezultata Proktorovog opita za uzorak U-4a i U-4b (klasičan i malj sa šiljcima)

Uzorci U-5a i U-5b

Na Slici 5.38 prikazani su rezultati standardnog Proktorovog opita za uzorak U-5a koji je izveden klasičnim maljem. Dobijena je maksimalna suva zapreminska težina $\gamma_{dmax}=7.83 \text{ kN/m}^3$ i optimalna vlažnost $W_{opt}=18.00 \%$.



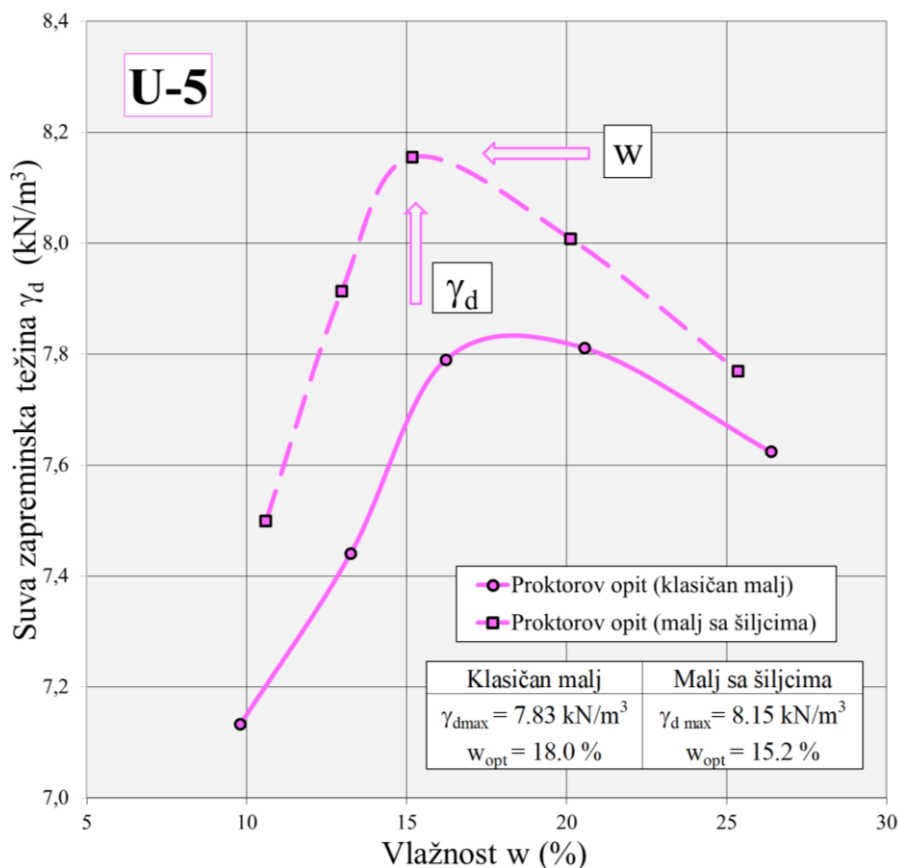
Slika 5.38: Rezultati Proktorovog opita sa klasičnim maljem za uzorak U-5a



Slika 5.39: Rezultati Proktorovog opita sa šiljcima za uzorak U-5b

U slučaju nekonvencionalnog izvođenja standardnog Proktorovog opita, pomoću inovativnog malja sa šiljcima, na uzorku U-5b dobijena je maksimalna suva zapreminska težina $\gamma_{dmax}=8.15 \text{ kN/m}^3$, pri optimalnoj vlažnosti $w_{opt} = 15.2 \%$.

Zbirni grafički prikaz rezultata Proktorovog opita za uzorke U-5a i U-5b dat je na Slici 5.40.

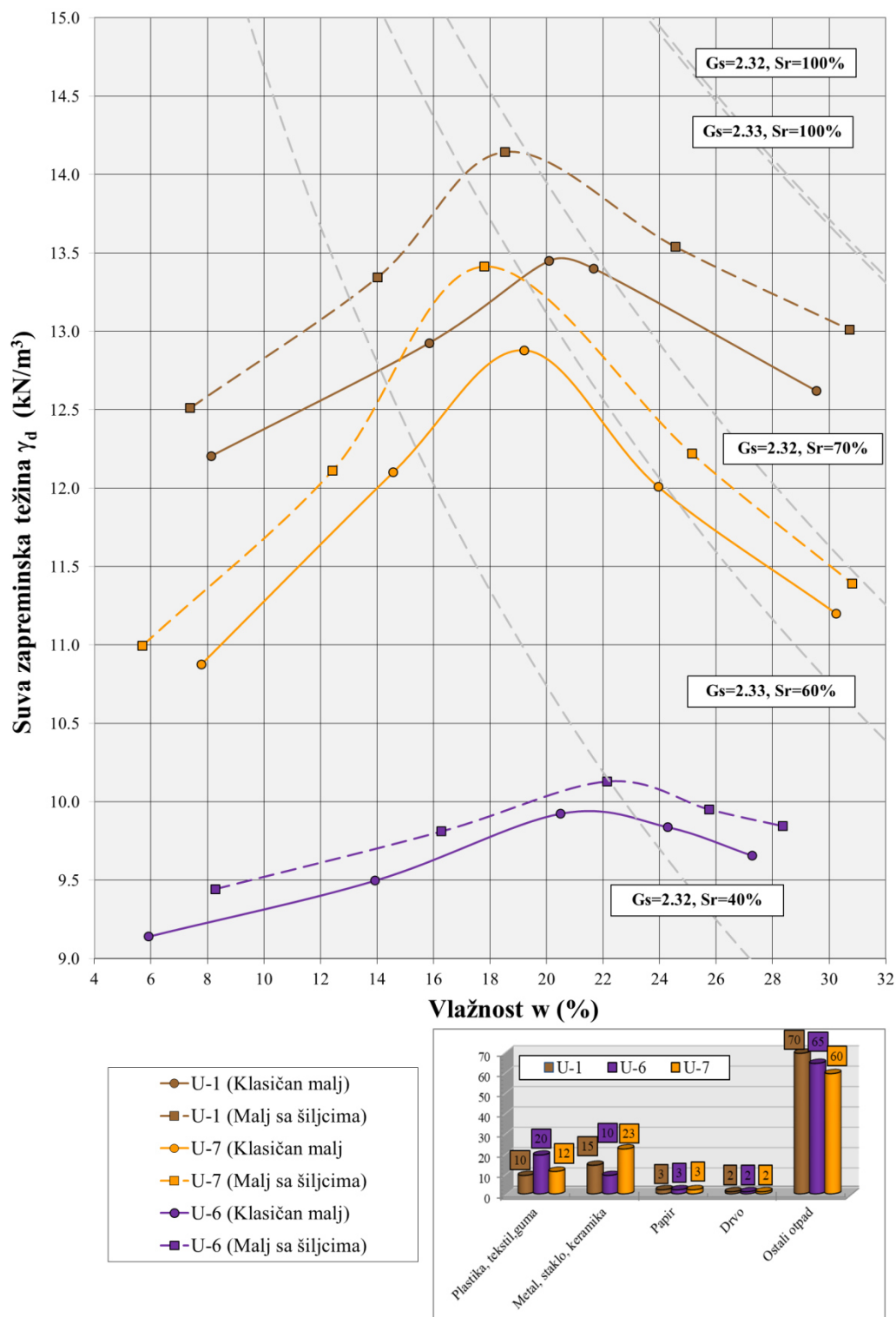


Slika 5.40: Uporedni prikaz rezultata Proktorovog opita za uzorak U-5a i U-5b (klasičan i malj sa šiljcima)

6. ANALIZA REZULTATA LABORATORIJSKIH ISPITIVANJA

6.1. Analiza rezultata - deponija Ada Huja

Sumirani rezultati za šest uzoraka (po dva uzorka za tri sastava) sa deponije Ada Huja prikazani su na Slici 6.1. Za svaki sastav rađen je Proktorov opit klasičnim i maljem sa šiljcima. Kao što je naglašeno ranije, usvojena specifična težina (G_s) nije ista za sve uzorke, već varira u zavisnosti od sastava komunalnog otpada.



Slika 6.1: Rezultati Proktorovog opita (klasičan i malj sa šiljcima) na uzorcima komunalnog otpada sa deponije Ada Huja

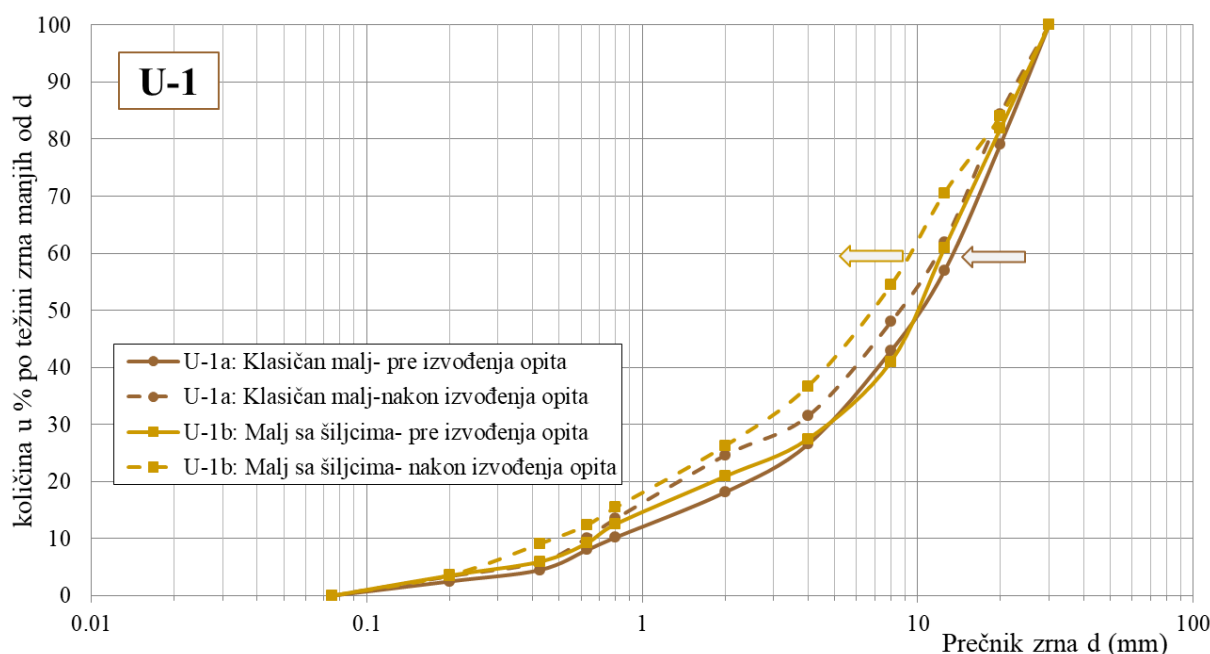
Analizom dobijenih rezultata uočene su neke sličnosti, ali i razlike koje su vezane za Proktorove krive. Na svim ispitanim uzorcima malj sa šiljcima je dao veću maksimalnu suhu zapreminsku težinu. Razlika u vrednostima prilično varira, a kao osnovni razlog može se navesti različito učešće komponente „ostali otpad“.

U daljem tekstu će biti prikazana analiza rezultata svih parova uzoraka (misli se na iste uzorke koji su zbijani različitom opremom). Pored toga, biće analizirane promene koje su dobijene razaranjem komunalnog otpada različitim postupcima zbijanja, a koje su potvrđene sejanjem pre i nakon izvođenja Proktorovog opita (klasičnim i maljem sa šiljcima). Uz to, daće se predlog za određivanje koeficijenta razaranja koji prikazuje sklonost materijala na destrukciju zbijanjem.

Na uzorcima U-1a i U-1b dobijene su najveće vrednosti maksimalne suve zapreminske težine u odnosu na druga dva para formiranih uzoraka. Analizom Proktorovih krivih, uočava se jasan „pik“ u oba slučaja, a odnos među vrednostima suve zapreminske težine iznosi oko 4.5%. Proktorove krive imaju približno zvonast oblik (za klasičan i malj sa šiljcima), što je karakteristično za tlo. Međutim, manji nagib krivih u odnosu na krive za tlo je u ovom slučaju prisutan, što se objašnjava prisustvom veštačkih materijala.

Pored povećanja maksimalne suve zapreminske težine, kod ovog para uzoraka je prisutna smanjena optimalna vlažnost prilikom korišćenja malja sa šiljcima. Razlika je oko 1.5%.

Što se tiče granulometrijskog sastava koji je određen pre i nakon izvođenja Proktorovog opita, rezultati za ovaj uzorak ukazuju da Proktorov opit sa šiljcima vrši veće razaranje (destrukciju) u odnosu na klasičan malj. Ta razlika nije značajna, što se pripisuje komponenti „ostali otpad“ koja zbog svoje sličnosti sa tlom ima i takvo „ponašanje“ tokom zbijanja (Slika 6.2). Modifikovan malj ima isti učinak kao i klasičan ravni za sitnozrno tlo (a slično je prethodno pomenutoj komponenti), o čemu će u narednim poglavljima biti govora.



Slika 6.2: Kumulativne krive za uzorak U-1a i U-1b

Detaljnijom analizom granulometrijskog sastava za sve urađene uzorke pre i nakon izvođenja Proktorovog opita, uočava se određeni model ponašanja koji je dobijen razaranjem materijala. S obzirom na to, kako bi se takav efekat kvantitativno prikazao, za svaki par uzoraka uveden je novi numerički pokazatelj, tzv. **koeficijent razaranja (Δr)** koji je prikazan na Slici 6.3.

Koeficijent razaranja (Δr) predstavlja procentualnu razliku između prolaska komponenti kroz određeni prečnik sita pre i nakon izvođenja Proktorovog opita, jednačina 6.1:

$$\Delta r_{(di)} = S_{pre} - S_{posle} \quad (6.1)$$

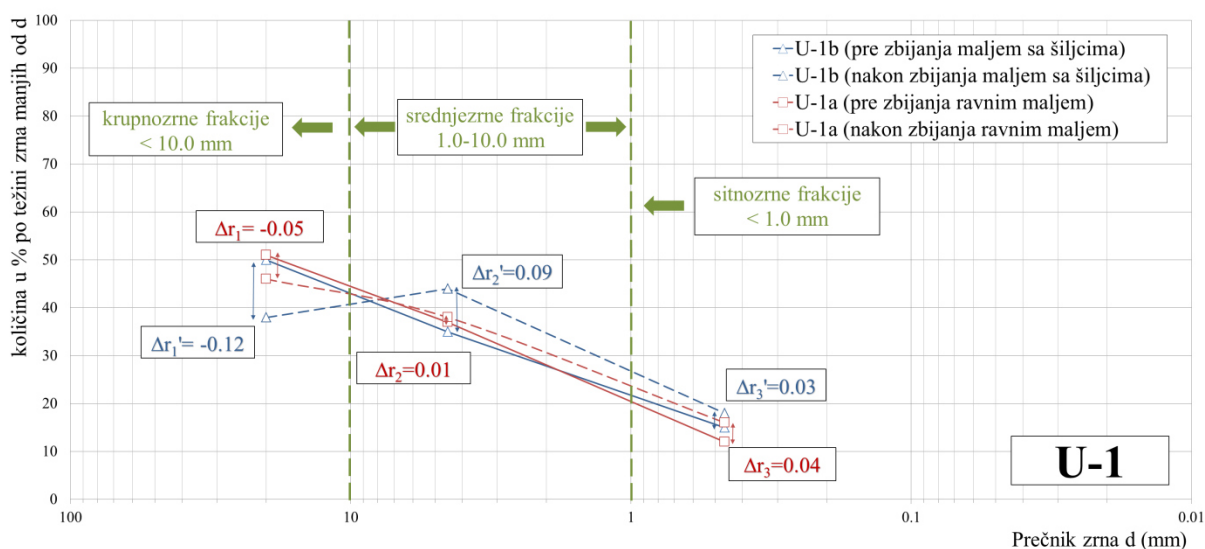
gde je:

Δr - koeficijent razaranja

S_{pre} - komponente koje su prošle kroz sito određenog rečnika (d) pre zbijanja (%)

S_{posle} - komponente koje su prošle kroz sito određenog rečnika (d) posle zbijanja (%)

Kako bi se definisale promene koje su vezane za sastav komunalnog otpada, materijal je podeljen u tri grupe, i to na: sitnozrne frakcije (manje od 1.0 mm), srednjezrne frakcije (1.0- 10.0 mm) i krupnozrne frakcije (veće od 10 mm).

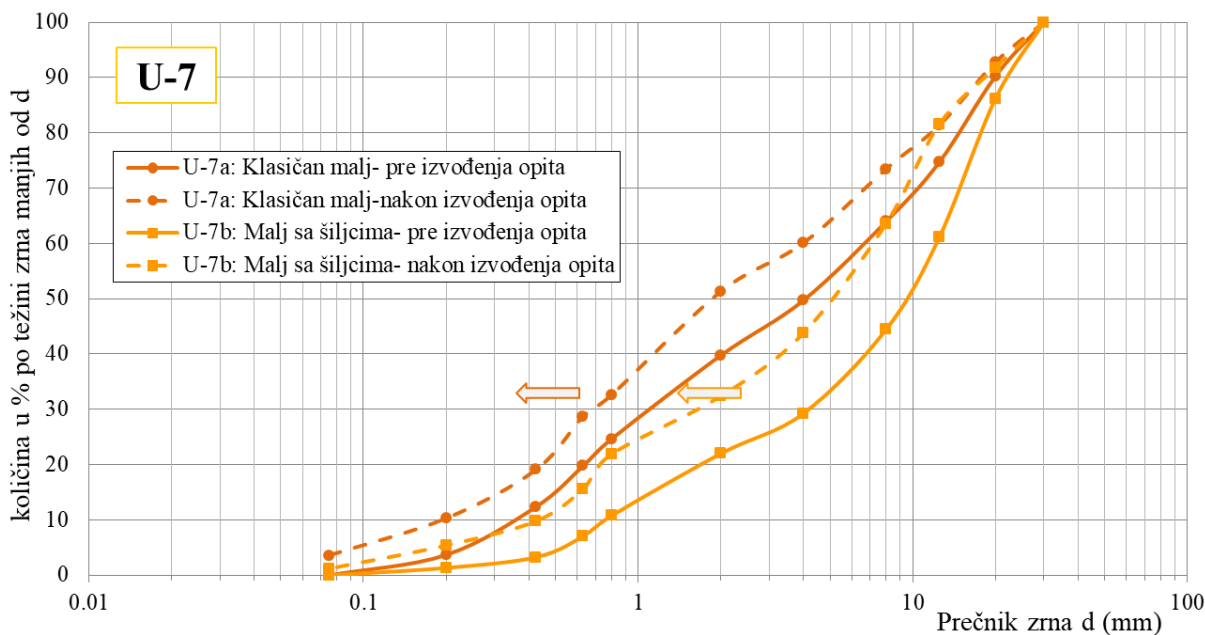


Slika 6.3: Promena koeficijenta razaranja za uzorke U-1a i U-1b

Najveća promena u koeficijentu razaranja kod uzorka U-1 konstatovana je kod krupnozrnih frakcija, u oba načina zbijanja komunalnog otpada. Pored toga, vidi se značajan uticaj razaranja srednjezrnih frakcija kod zbijanja maljem sa šiljcima.

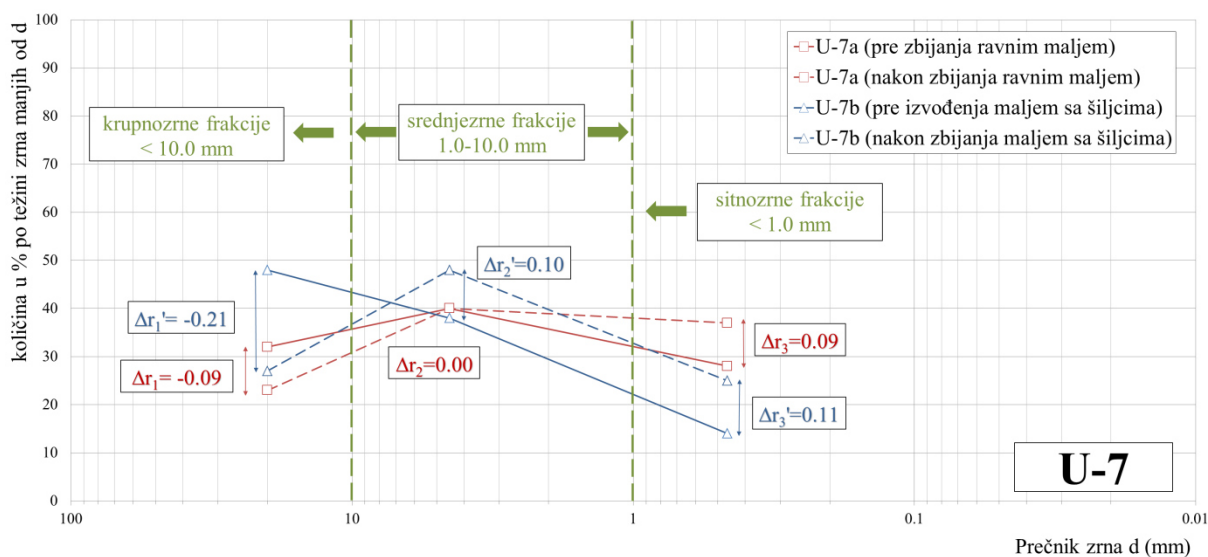
Proktorova kriva za uzorak U-7 ima zvonastiji oblik u odnosu na uzorak U-1 (a i b). Pored toga, krive se nalaze u neposrednoj blizini krivih uzorka U-1(a i b) (Slika 6.1). Iako je u pitanju materijal sa najmanjim učešćem komponente „ostali otpad“, ovaj uzorak pokazuje uticaj ostalih komponenti koje se dobro zbijaju, a to su „metal, staklo, keramika“. Kada je u kombinaciji sa zemljastim materijalom, ova komponenta se dobro razara i popunjava porni prostor.

Maksimalna suva zapreminska težina za uzorak U-7 kod Proktorovog opita prilikom korišćenja malja sa šiljcima je za oko 4% veća u odnosu na klasičan malj, dok je optimalna vlažnost manja za oko 1.5%. Uticaj razaranja komunalnog otpada, kako klasičnim tako i maljem sa šiljcima je jasno uočljiv i na granulometrijskim krivama (Slika 6.4).



Slika 6.4: Kumulativne krive za uzorak U-7a i U-7b

Promene koeficijenta razaranja za uzorak U-7a i U-7b prikazane su na Slici 6.5. Kao što je bio slučaj sa prethodno opisanim uzorkom, najveća promena se uočava kod zbijanja krupnozrnih materijala maljem sa šiljcima. Pored toga, prisutna je i nešto veća promena kod sitnozrnih frakcija.

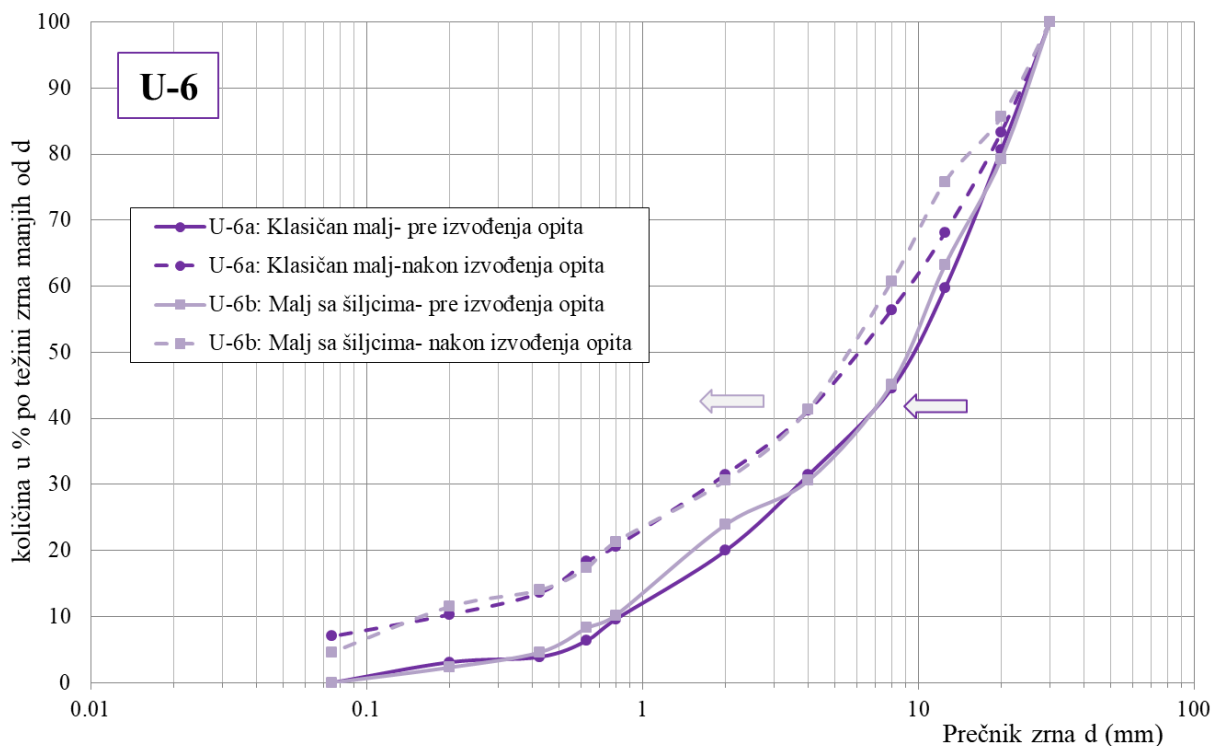


Slika 6.5: Prikaz promene koeficijenta razaranja za uzorak U-7

Uzorak U-6 karakteriše najviše odstupanja u odnosu na ostala dva para uzoraka. Objašnjenje za to bi se moglo naći u povećanom učešću komponente „plastika, tekstil, guma“ (20%). Okonta i sar. (2018) su u svojim istraživanjima naglasili da je Proktorov opit nemoguće izvršiti ukoliko u sastavu ima veći procenat plastike. Međutim, ono što se pokazalo kroz izvođenje laboratorijskih ispitivanja za doktorsku disertaciju, bitno je o kojoj se plastici radi. Naime, plastične kese predstavljaju najveći problem tokom izvođenja opita. Razlog za to je njihova elastičnost i činjenica da na njih razaranja (klasičnim ili maljem sa šiljcima) ne utiče na isti način kao što je to slučaj kod drugih komponenti. Uz sve to, zauzimaju veću zapreminu u odnosu na malo težinsko učešće, što dodatno doprinosi drugačijem ponašanju. Pored ovoga, uočava se, bez obzira na homogenizaciju veštački pripremljenog uzorka da se voda zadržava „unutar“ plastike, pa je njeno ravnomerno rasprašivanje često komplikovano zbog nemogućnosti da je plastika upije.

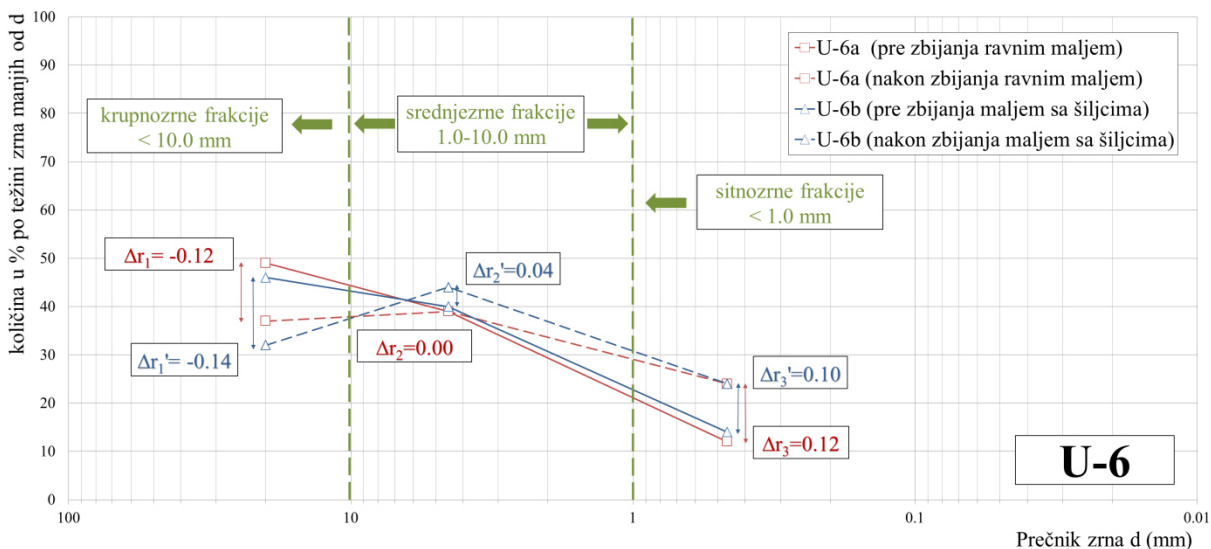
Kod uzorka U-6 je maksimalna suva zapreminska težina prilikom korišćenja malja sa šiljcima za oko 2% veća u odnosu na izvođenje opita klasičnim maljem. Oblik Proktorovih krivi dosta odstupa od zvonastog, ali bez obzira na to izražena je tačka sa maksimalnom suvom zapreminskom težinom. Optimalna vlažnost je veća za oko 1.5% kod malja sa šiljcima (u predhodna dva uzorka je manja). Ova „anomalija“ u vidu manjeg povećanja optimalne vlažnosti pripisuje se prethodno objašnjenom uticaju plastičnih kesa na zbijanje komunalnog otpada, što je bilo jasno i tokom samog izvođenja opita.

Međutim, bez obzira na sve gore navedeno, destrukcija materijala uz pomoć malja sa šiljcima je bila jasno uočljiva, što je i pokazano i analizom granulometrijskog sastava (Slika 6.6).



Slika 6.6: Kumulativne krive za uzorak U-7a i U-7b

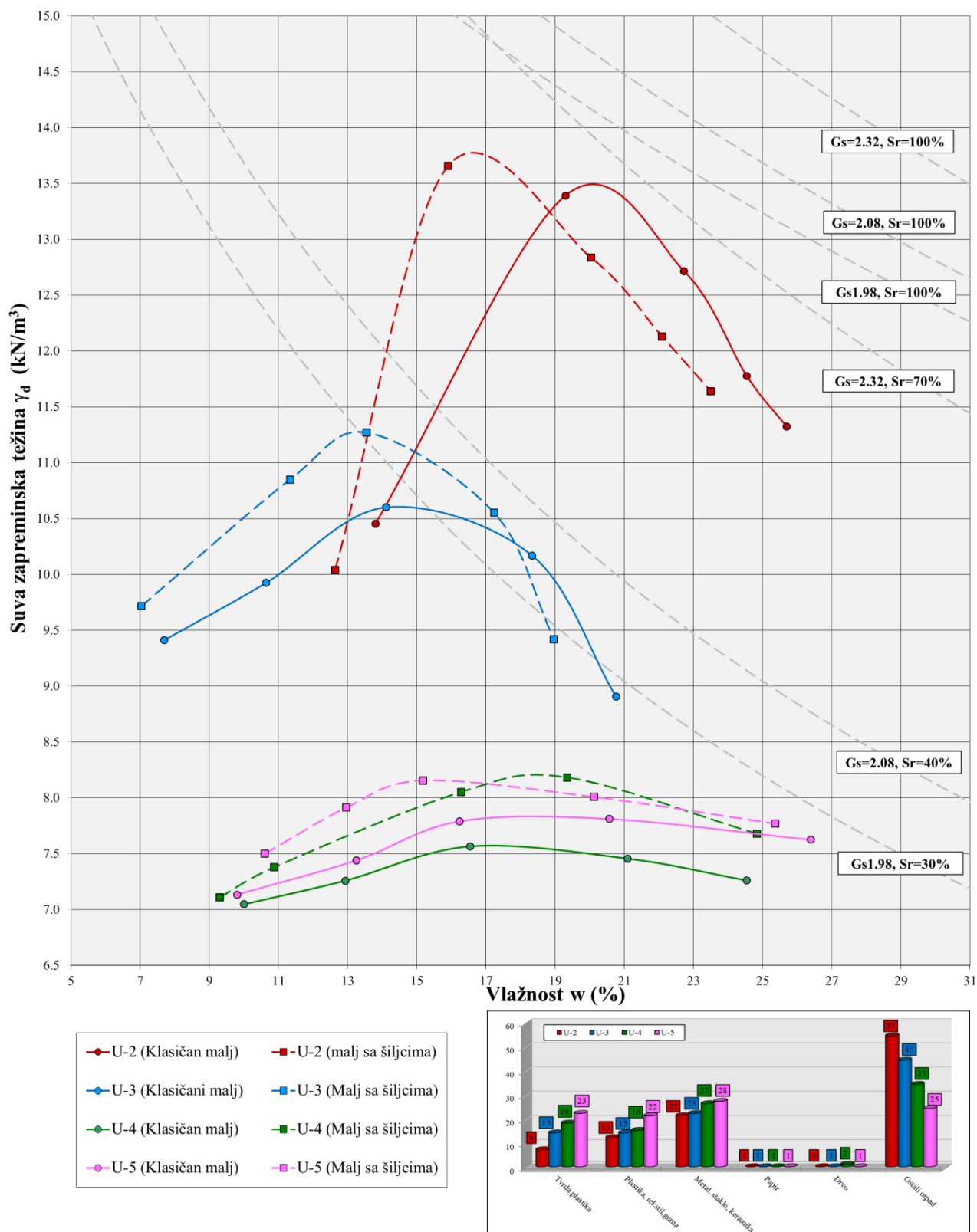
Vrednosti koeficijenta razaranja za uzorak U-6 prikazane su na Slici 6.7. Najviše vrednosti koeficijenta razaranja uočavaju se kod krupnozrnih i sitnozrnih komponenti.



Slika 6.7: Prikaz promene koeficijenta razaranja za uzorak U-6

6.2. Analiza rezultata- deponija Plandište

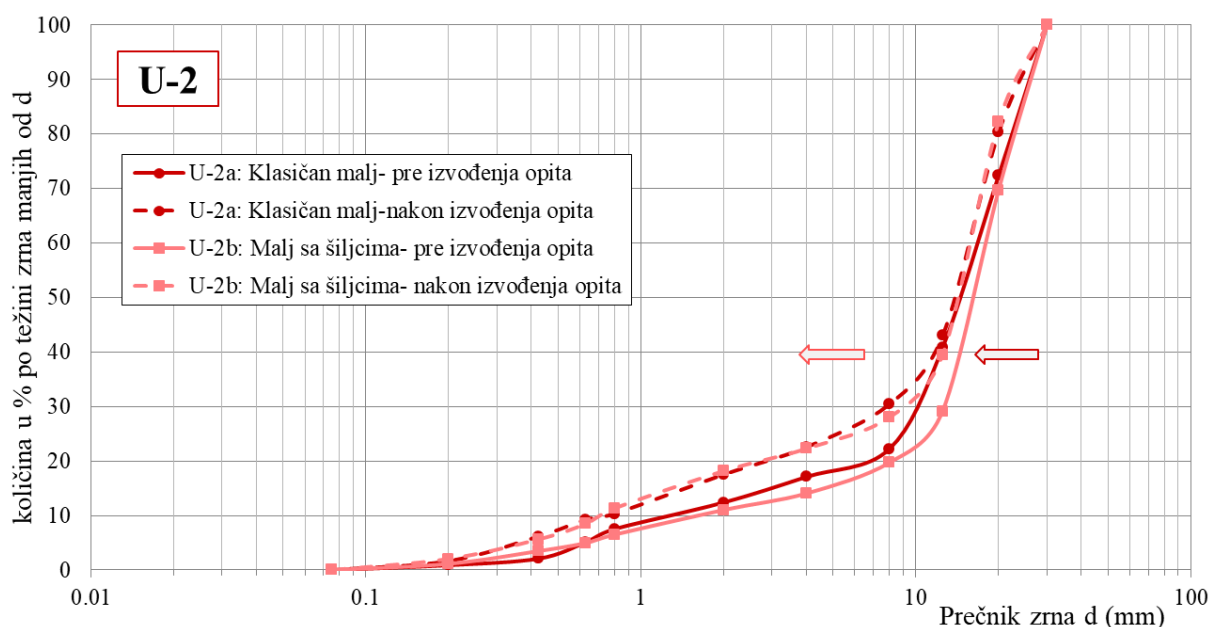
Od komunalnog otpada sa deponije Plandište formirane su četiri serije sa po dva uzorka, vodeći računa da je svaka serija imala različit sastav.



Slika 6.8: Rezultati Proktorovog opita (klasičan i malj sa šiljcima) na uzorcima komunalnog otpada sa deponije Plandište

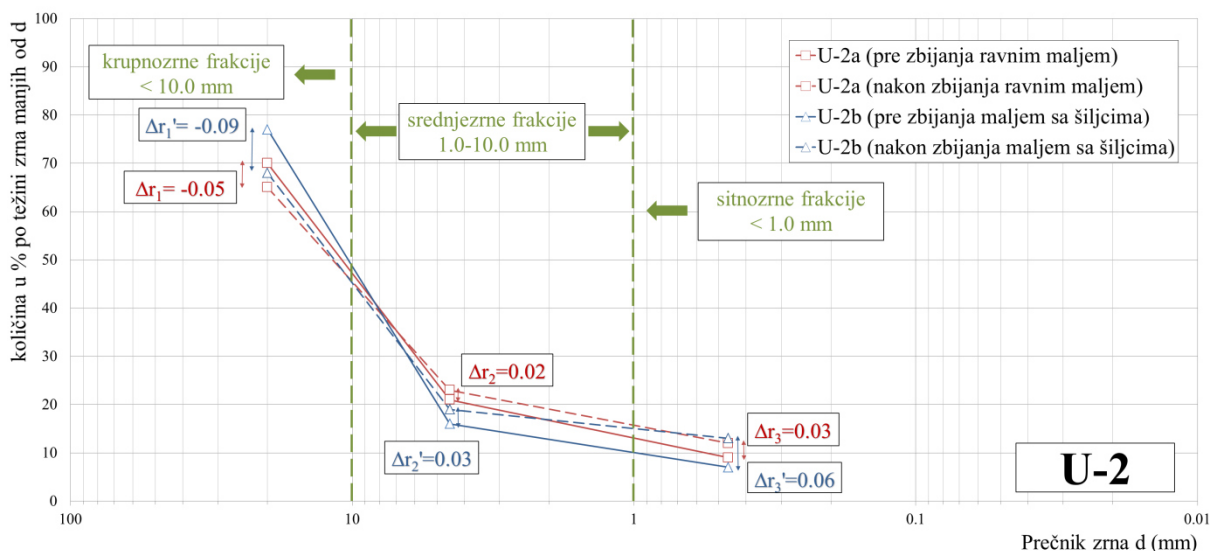
Zbirni rezultati ispitivanja prikazani su na Slici 6.8. Kao i u slučaju komunalnog otpada sa deponije Ada Huja i ovde se uočavaju sličnosti i razlike. Analizom je obuhvaćen uticaj standardne i modifikovane opreme na promenu granulometrijskog sastava otpada i parametre zbijanja: optimalnu vlažnost (w_{opt}) i maksimalnu suhu zapreminsku težinu (γ_{dmax}). Kod sva četiri sastava dobijena je viša maksimalna suva zapreminska težina kod inovativnog malja sa šiljcima.

Sa dijagrama se uočava da su krive zbijanja kod uzorka U-2 sličnog oblika (Slika 6.8), a da je značajnija razlika iskazana smanjenjem optimalne vlažnosti za preko 3%, u slučaju zbijanja materijala korišćenjem inovativnog malja sa šiljcima. Međutim, kada je u pitanju promena maksimalne suve zapreminske težine, nije postignuta značajnija razlika u odnosu na rezultate dobijene korišćenjem klasičnog malja. Ovakvi rezultati su donekle i očekivani s obzirom da u sastavu uzorka U-2 pretežno dominira "ostali otpad" koji sadrži oko 55% materijala čije se ponašanje može porediti sa tlom, pa je samim tim i maksimalna suva zapreminska težina veća nego što je to slučaj kod ostalih uzoraka, sa smanjenim sadržajem komponente "ostali otpad". Analizom granulometrijskih krivi komunalnog otpada (Slika 6.9) koji je zbijan standardnim i maljem sa šiljcima, može se utvrditi da veći sadržaj zemljastog materijala nije uticao na usitnjavanje otpada, koje bi dovelo do boljeg pakovanja različitih frakcija, a time i do značajnijeg povećanja suve zapreminske težine.



Slika 6.9: Kumulativne krive za uzorak U-2a i U-2b

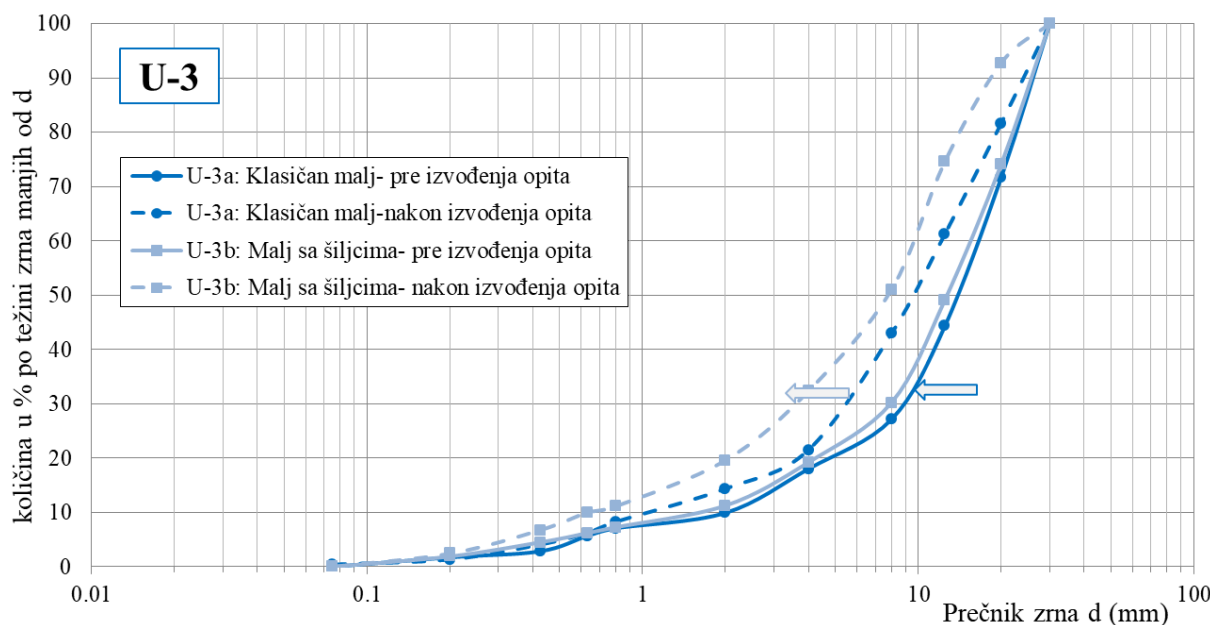
Na Slici 6.10 prikazana je promena koeficijenta razaranja za uzorak U-2. U odnosu na uzorke sa deponije Ada Huja, ovde se uočavaju dosta niži koeficijenti razaranja. Međutim, bez obzira na to, najviši koeficijenti su i dalje karakteristični za krupnozrne frakcije.



Slika 6.10: Prikaz promene koeficijenta razaranja za uzorak U-2

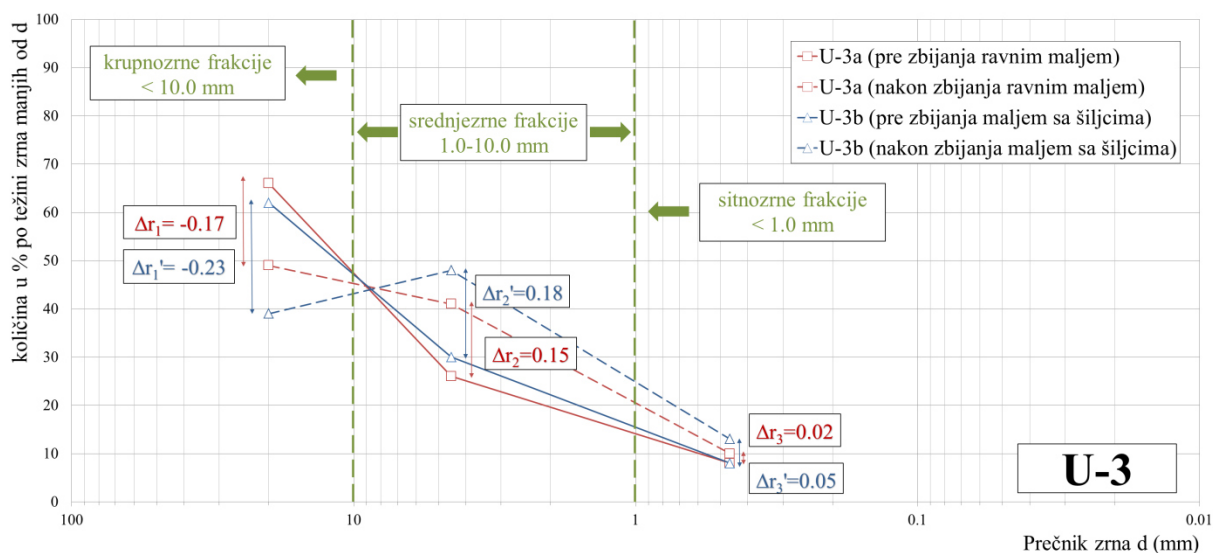
Uzorak U-3 (a i b) sadrži nešto veće učešće komponenti tvrde plastike i (meke) plastike-gumetkstilna, što je rezultiralo manjom maksimalnom suvom zapreminskom težinom i manjom optimalnom vlažnošću u odnosu na uzorak U-2. Kao što se vidi na dijagramu prikazanom na Slici 6.8, uočava se veća promena maksimalne suve zapreminske težine (preko 6%) kod opita u kom je korišćen malj sa šiljcima.

Na granulometrijskim krivama prikazanim na Slici 6.11 vidi se nešto veća destrukcija komunalnog otpada u odnosu na uzorak U-2, što se pripisuje povećanjem učešća veštačkih komponenti. Međutim, i dalje je prisutan veliki uticaj komponente „ostali otpad“ koji ide i do 45%, pa ta razlika nije značajna.



Slika 6.11: Kumulativne krive za uzorak U-3a i U-3b

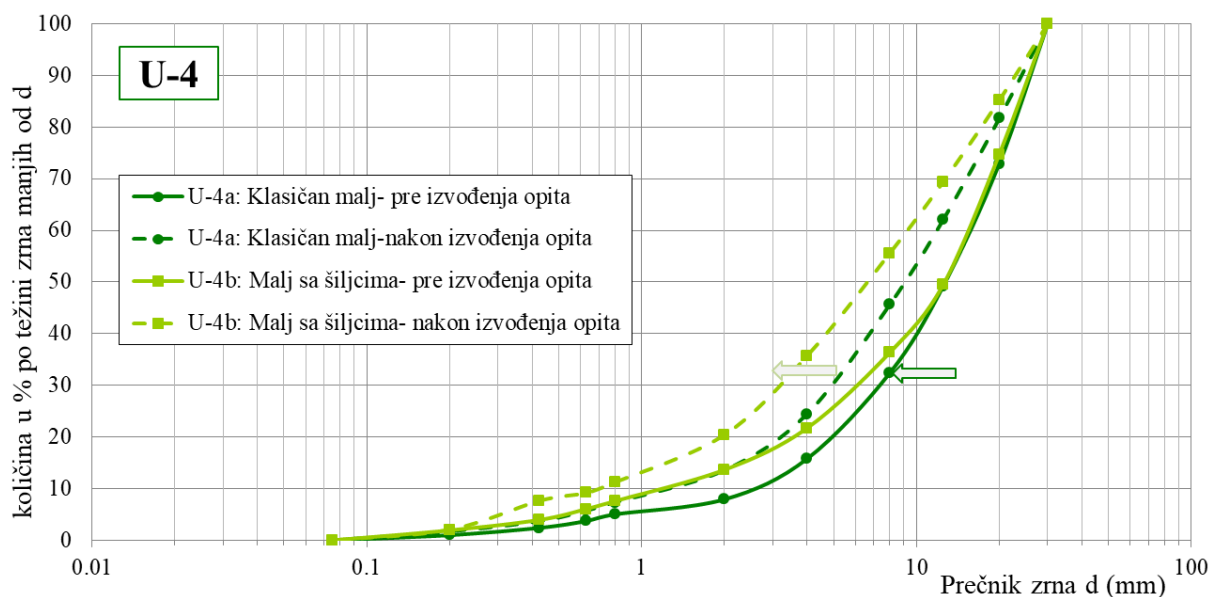
Promena koeficijenta razaranja za uzorak U-3 je prikazana na Slici 6.12. na ovom uzorku uočavaju se dosta visoke vrednosti koeficijenta razaranja kod srednjezrnih i krupnozrnih komponenti. Ovakve vrednosti se objašnjavaju povećanjem sadržaja komponenti „metal, staklo keramika“, koje se dobro razaraju zbijanjem.



Slika 6.12: Prikaz promene koeficijenta razaranja za uzorak U-3

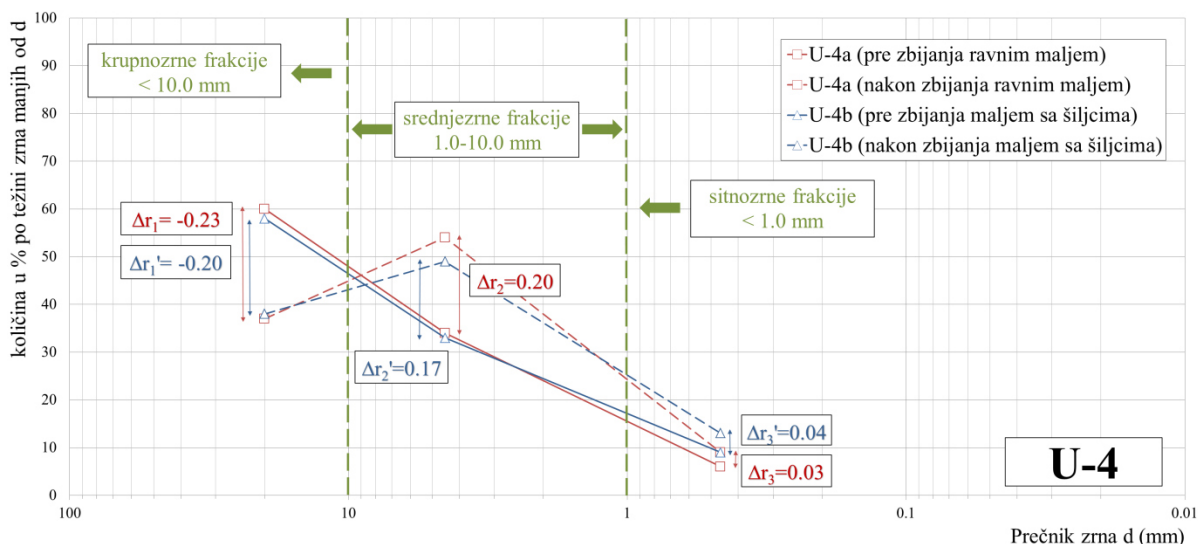
Na uzorku U-4 maksimalna suva zapreminska težina dobijena maljem sa šiljcima je za oko 8% veća u odnosu na standardni malj, pri istoj energiji zbijanja. Proktorove krive za uzorak U-4 nemaju zvonasti oblik, pa samim tim vlažnost nema značajniji uticaj na promenu suve zapreminske težine. Ovako ponašanje se može pripisati dosta većem učešću veštačkih komponenti. Pored toga, može se zaključiti da je prisutan veći sadržaj komponenti koje su sklone razaranja, što je konstatovano i na granulometrijskim krivama uzorka (Slika 6.11).

Ovu seriju uzoraka karakteriše odstupanje od standardnog ponašanja u odnosu na ostale tri serije sa deponije Plandište zbog povećanja optimalne vlažnosti prilikom korišćenja malja sa šiljcima. Ovakav slučaj konstatovan je i na jednom uzorku kod deponije Ada Huja. U tom slučaju povećanje optimalne vlažnosti je pripisano povećanom učešću plastike, što se može konstatovati i na ovom uzorku. Međutim, uzorak U-5 sadrži još veći procenat plastike, a tokom zbijanja nije odreakovao na takav način.



Slika 6.13: Kumulativne krive za uzorak U-4a i U-4b

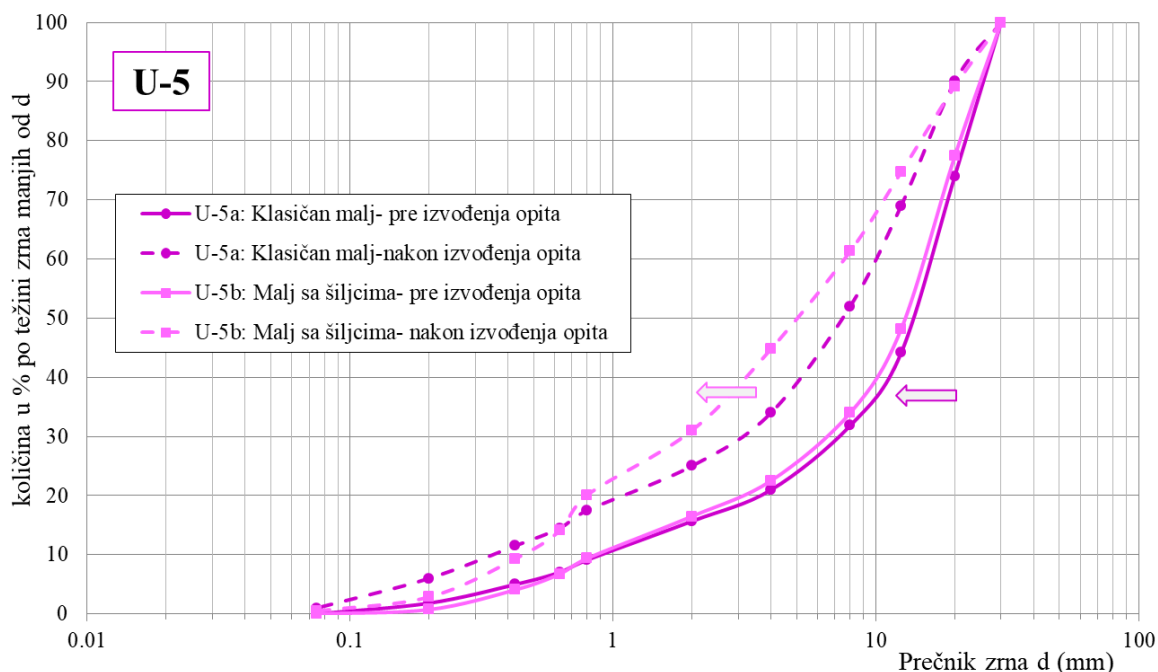
Promena koeficijenta razaranja za uzorak U-4 prikazana je na Slici 6.14. Ovaj uzorak ima slične promene usled razaranja kao i prethodni, pa obzirom na to srednjezrne i krupnozrne frakcije imaju najveće vrednosti koeficijenta razaranja.



Slika 6.14: Prikaz promene koeficijenta razaranja za uzorak U-4

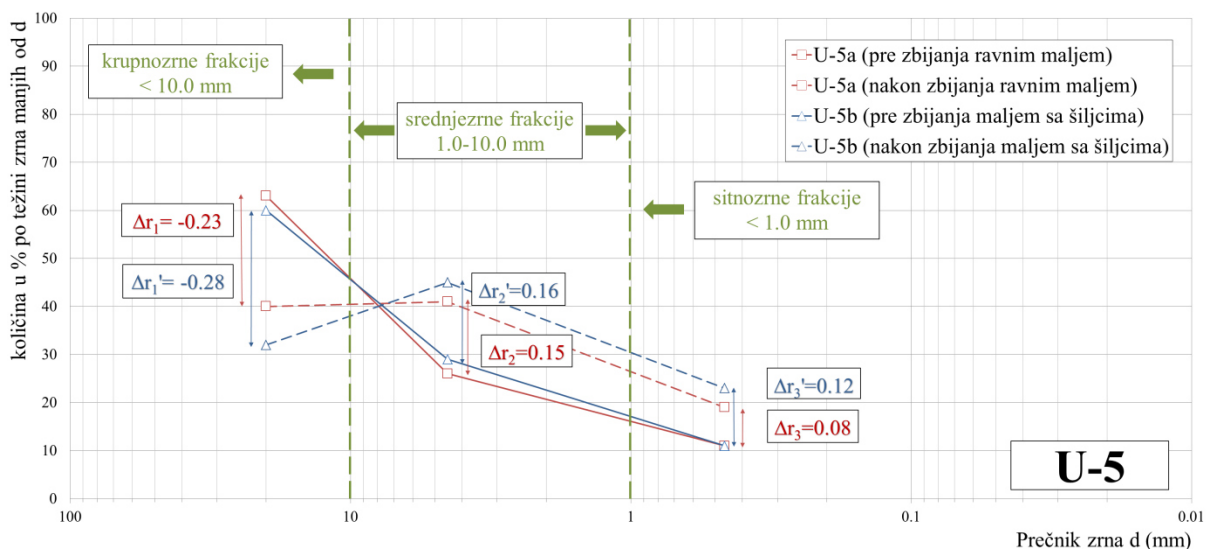
Analizom rezultata uzorka U-5 dolazi se do zaključka da Proktorove krive imaju slično „ponašanje“ kao i kod uzorka U-4, uz smanjenje optimalne vlažnosti prilikom korišćenja malja sa šiljcima, oko 2.8% (Slika 6.8). Maksimalna suva zapreminska težina je povećana za oko 4%.

Na granulometrijskim krivama (Slika 6.15) ovog uzorka uočava se najveće usitnjavanje komponenti, što je posledica minimalnog učešća komponente „ostali otpad“, od 25%.



Slika 6.15: Kumulativne krive za uzorak U-5a i U-5b

Promena koeficijenta razaranja data je na Slici 6.16. Na uzorku U-5 uočavaju se najviše vrednosti koeficijenta razaranja u odnosu na sve ostale uzorke, kako sa deponije Plandište, tako i sa deponije Ada Huja. Razlog za to je najveće učešće veštačkih komponenti u sastavu, koje se dobro razaraju zbijanjem.



Slika 6.16: Prikaz promene koeficijenta razaranja za uzorak U-5

Detaljnijom analizom rezultata dobijenih na uzorcima formiranih od komunalnog otpada sa obe deponije može se zaključiti sledeće:

- Na svim uzorcima koji su zbijani maljem sa šiljcima došlo je do povećanja suve zapremine težine u odnosu na klasičan malj;
- Kod svih uzoraka uočavaju se najviše vrednosti koeficijenta razaranja kod krupnozrnih frakcija. Tokom izvođenja opita, komponenta „metal, staklo, keramika“ pokazala je bolju sklonost na razaranje zbijanjem u odnosu na komponentu „plastika, tekstil, guma“;
- S obzirom da su granulometrijske krive (sejanje pre izvođenja opita) za uzorke U-1, U-6, U-3 i U-5 gotovo paralelne u oba slučaja izvođenja Proktorovog opita (klasičnim i maljem sa šiljcima), možemo doći do zaključka da se komunalni otpad bolje razara maljem sa šiljcima;
- Generalni trend je da se uzorci u čijem je sastavu veći procenat sitnozrne frakcije („ostali otpad“) bolje zbijaju, dok se krupnozrne frakcije koje su karakteristične za veštačke materijale dobro razaraju zbijanjem.

6.3. Međusobno poređenje dobijenih rezultata

Tokom laboratorijskih opita uočeno je slično ponašanje tokom zbijanja kod nekih uzoraka. Osnovna pretpostavka sa kojom se krenulo u ispitivanje je da će rezultati Proktorovog opita direktno biti u vezi sa starošću materijala od kog su uzorci, bez obzira što su veštački formirani. Ovo je sa jedne strane dokazano kao tačno, međutim, prisutan je i određen broj odstupanja. U nastavku teksta biće međusobno poređeni rezultati standardnog Proktorovog opita koji je izvođen klasičnim maljem. Standardni Proktorov opit koji je izvođen maljem sa šiljcima neće biti posebno analiziran zbog činjenice da su krive uglavnom paralelne sa onim dobijenim zbijanjem klasičnim maljem, kao i zbog toga što najveći uticaj na parametre ima sastav koji je isti za date uzorke.

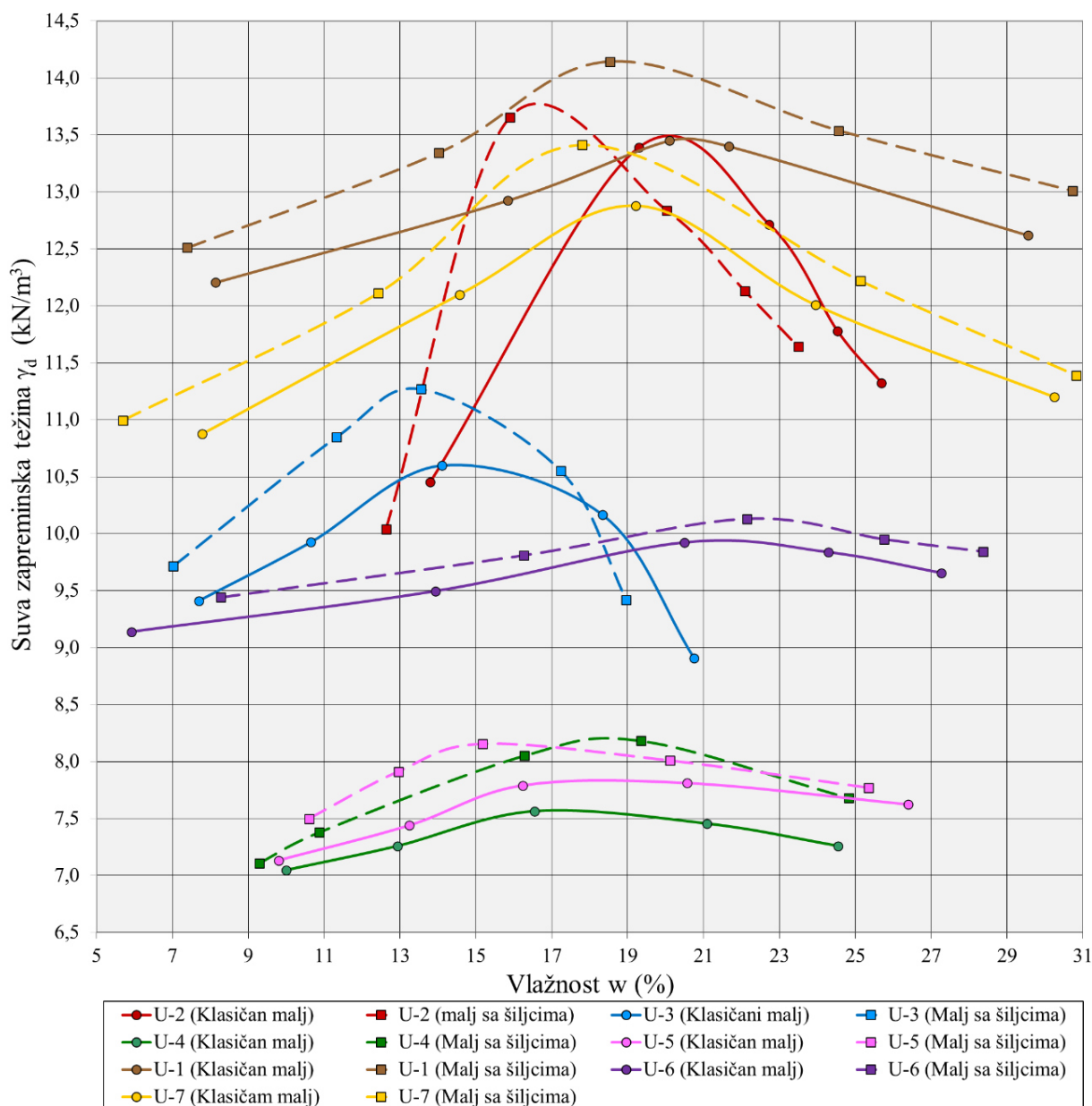
Kao što je ranije naglašeno, osnovnu varijaciju koja prati formiranje svih uzoraka je učešće komponente „ostali otpad“. Njen procenat je veći kod uzoraka formiranih od komunalnog otpada sa deponije Ada Huja pre svega zbog starosti i ponovnog korišćenja materijala. Međutim, pored povećanog učešća veštačkih komponenti koja karakteriše uzorke formirane od komunalnog otpada sa deponije Plandište, izdvojen materijal „ostali otpad“ i ovde ima značajnu ulogu.

Ako uporedimo parametre dobijene kod uzorka U-1 i U-2, možemo doći do zaključka da su dobijene krive nešto drugačijeg oblika ali da su optimalna vlažnost (w_{opt}) i maksimalna suva zapreminska (γ_{dmax}) gotovo identične u slučaju izvođenja standardnog Proktorovog opita sa

klasičnim maljem (Slika 6.17). Sastavi i starosti ova dva uzorka se razlikuju, pa je ovakav rezultat neophodno prokomentarisati. Naime, u uzorku sa deponije Plandište, pored komponente „ostali otpad“ sa učešćem od 55% dodat je i veći procenat komponente „metal, staklo, keramika“ od 22%. Ono što je bilo jasno tokom izvođenja opita je da se upravo na tu komponentu vršila najveća destrukcija. Sem metala, koji je bio u manjem procentu, staklo i keramika su tokom pada malja pretvoreni gotovo u prah, što je sa povećanjem vlažnosti dovelo do sličnog ponašanja kao i uzorak U-1, koji sadrži procenat od 70% komponente „ostali otpad“. Poznato je da sitnozrne komponente postižu veću zapreminsku težinu u odnosu na veštačke materijale poput plastike, što je zajedno sa svim faktorima dovelo do najviše vrednosti maksimalne suve zapreminske težine i optimalne vlažnosti, kako kod deponije Plandište, tako i kod deponije Ada Huja. Parametri zbijanja koji su dobijeni za krive U-7 svojim sastavom su približni uzorku U-2, pa se time objašnjava sličnost ovih krivi sa prethodno navedenim.

Sledeće poređenje se odnosi na uzorke U-3 i U-6. Kao što se vidi na Slici 6.17, maksimalne suve zapreminske težine su približno slične. Međutim, isto tako se uočava i razlika u optimalnoj vlažnosti. U pitanju su veštački formirani uzorci komunalnog otpada sa dve različite deponije. Naime, optimalna vlažnost komunalnog otpada kod uzorka U-6 je slična kao i kod ostalih uzoraka formiranih od otpada sa deponije Ada Huja. Iz ovoga se može zaključiti da povećano učešće komponente „ostali otpad“ daje značajno veću optimalnu vlažnost, nego što je to slučaj sa uzorcima koji imaju nešto više veštačkih komponenti u sastavu. Na ovom primeru se jasno vidi važnost poznavanja sastava otpada prilikom zbijanja, kao i da je za postizanje iste maksimalne suve zapreminske težine na deponiji potrebno dodavati različitu količinu vode, u skladu sa ranije određenim laboratorijskim ispitivanjima.

Kompletnim poređenjem svih rezultata najveću sličnost u vrednostima maksimalne suve zapreminske težine i optimalne vlažnosti uočavamo kod poslednja dva analizirana uzorka sa deponije Plandište (U-4 i U-5). Ova dva veštački formirana uzorka imala su za cilj da pokažu kako su minimalne korekcije u sastavu uticala na zbijanje. Iz priloženog se vidi da je maksimalna suva zapreminska težina gotovo identična, sa minimalnom varijacijom optimalne vlažnosti, što doprinosi zaključku da se komponente isto ponašaju prilikom svakog izvođenja opita.



Slika 6.17: Prikaz rezultata standardnog Proktorovog opita (klasičan i malj sa šiljcima)

Generalni trend ponašanja svih krivi tokom analize standardnog Proktorovog opita jeste da je zvonast oblik izraženiji kod onih koji imaju manji procenat plastike („tvrda plastika“ i „plastika, tekstil, guma“).

Kompletnom međusobnom analizom, potvrđena je osnovna pretpostavka da stariji otpad ima veću maksimalnu suhu zapreminsku težinu, što je u direktnoj vezi sa komponentom „ostali otpad“. Pozitivan efekat na povećanje maksimalne suve zareminske težine ima i komponenta „metal, staklo, keramika“. Razlog za to je usitnjavanje tokom zbijanja do praškaste strukture, gde se sa dodatkom vode jednostavno vezuje (lepi) za komponentu „ostali otpad“. Komponenta „metal, staklo, keramika“ je pokazala i najbolje osobine razaranja u odnosu na druge veštačke materijale.

Pored toga, uzorci sa povećanim učešćem komponente „tvrda plastika“ i „plastika tekstil, guma“ imaju manje zapreminske težine u odnosu na one koje imaju povećan sadržaj „ostalog otpada“. Obzirom da se uzorci sa povećanim učešćem komponente „ostali otpad“ uglavnom vezuju za stari otpad sa deponije Ada Huja, ovim ispitivanjem se potvrđuje pretpostavka većine autora da star

otpad ima višu maksimalnu suhu zapreminsku težinu u odnosu na mlađi, a u čemu će posebno biti komentara u narednom poglavlju.

Na Slici 6.18. prikazan je izgled uzoraka nakon što su izvađeni iz kalupa za standardni Proktorov opit.



Slika 6.18: Izgled uzoraka komunalnog otpada nakon što su izvađeni iz Proktorovog kalupa

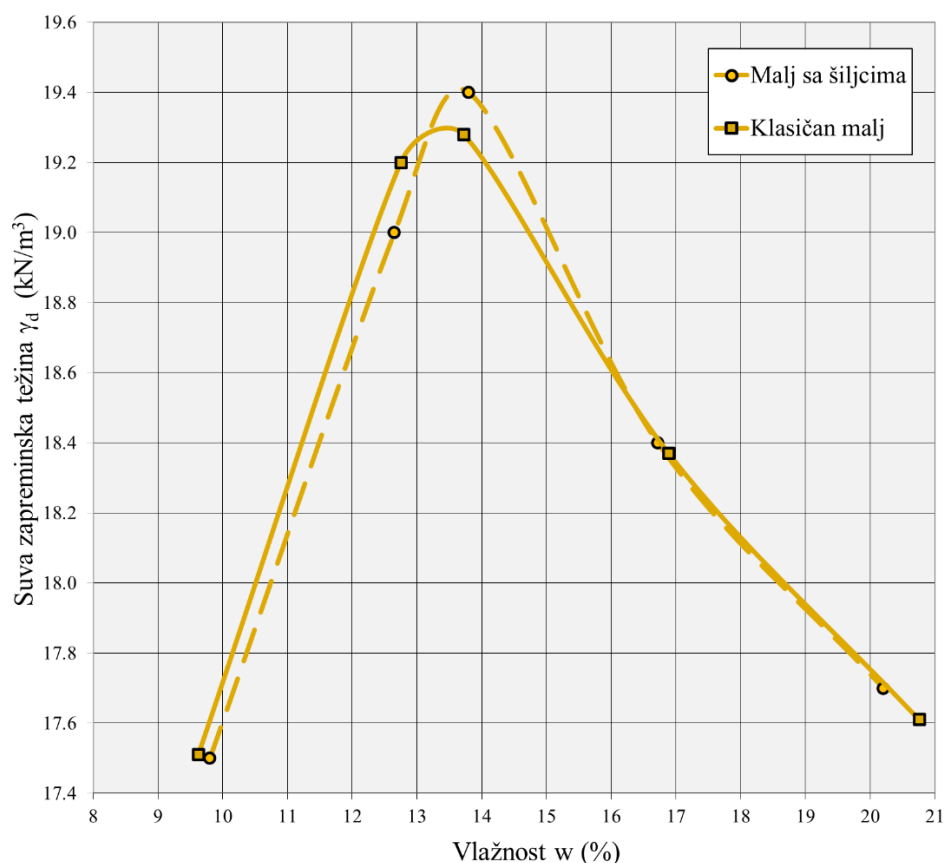
6.4. Uticaj nestandardne opreme na tlo

Tokom laboratorijskih istraživanja urađen je i Proktorov opit za jedan uzorak tla klasičnim ravnim i maljem sa šiljcima. Cilj izvođenja ovakvog opita bio je da se vidi da li šiljci vrše destrukciju na tlo, kao što je slučaj sa otpadom i na taj način povećavaju suhu zapreminsku težinu.

Za ispitivanje se koristio uzorak izmenjenog lesa koji je karakterističan u području Zemuna. Prema granulometrijskom sastavu uzorak pripada prašinstim glinama. Proktorov opit je rađen sa identičnom opremom koja je korišćena za uzorke komunalnog otpada u doktorskoj disertaciji.

Za Proktorov opit koji je izvođen klasičnim maljem dobijena je maksimalna suva zapreminska težina (γ_{dmax}) od 19.3 kN/m^3 pri optimalnoj vlažnosti (w_{opt}) od 13.50%. Za Proktorov opit koji je vršen maljem sa šiljcima, dobijena vrednost za maksimalnu suhu zapreminsku težinu je (γ_{dmax}) 19.4 kN/m^3 pri skoro identičnoj optimalnoj vlažnosti (w_{opt}) u odnosu na klasični malj od 13.55%.

Kao što se vidi na Slici 6.19, Proktorove krive za ispitivani uzorak tla se gotovo poklapaju. Obzirom na sve to moguće je izvesti nekoliko zaključaka, koji između ostalog potvrđuju važnost korišćenja ispravne opreme prilikom laboratorijskog i terenskog zbijanja komunalnog otpada.



Slika 6.19: Prikaz rezultata ispitivanja za uzorak lesa (klasičan ravan i malj sa šiljcima)

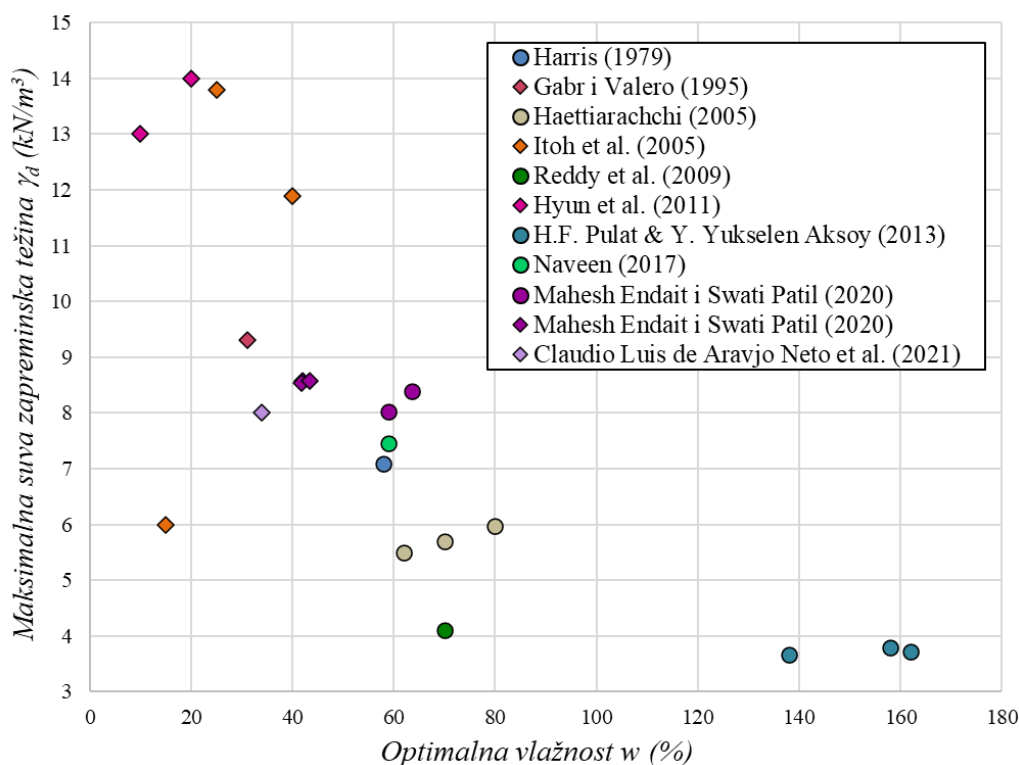
Dok na zbijanje tla šiljci na malju ne pokazuju poseban uticaj (Slika 6.19), tokom zbijanja komunalnog otpada konstatovana su značajna odstupanja. Sve ovo ukazuje na specifičnost materijala kao što je komunalni otpad tokom zbijanja.

Ovakvi rezultati jasno označavaju zbog čega se na deponijama umesto klasičnih kompaktora za nasipe koriste tzv. ježevi, odnosno pokazuju uticaj šiljaka na materijale poput plastike, tekstila, gume i sl. Pored toga, ukazuje i na potrebu za prilagođavanje laboratorijske opreme za ispitivanje komunalnog otpada.

7. POREĐENJE REZULTATA DOBIJENIH LABORATORIJSKIM ISPITIVANJIMA SA LITERATUROM

Prethodno prikazan postupak laboratorijskog ispitivanja zbijanja komunalnog otpada (standardni Proktorov opit izveden klasičnim i maljem sa šiljcima) je prvi put rađen u Republici Srbiji. Međutim, u svetskoj literaturi i praksi izvođenje standardnog Proktorovog opita prisutno je već dugi niz godina. Štaviše, kroz vreme, vršeno je određeno prilagođavanje laboratorijskih ispitivanja komunalnom otpadu kroz povećanje energije, promenu dimenzija kalupa i sl. Rezultati i postupak ispitivanja su dati u poglavlju „Pregled literature o zbijanju komunalnog otpada“. Navedeni su dostupni literaturni podaci dobijeni sa deponija širom sveta, uz korišćenje otpada različite starosti i sastava. Zahvaljujući svemu ovome moguće je uraditi verifikaciju dobijenih rezultata standardnog Proktorovog opita koji je izvođen klasičnim maljem.

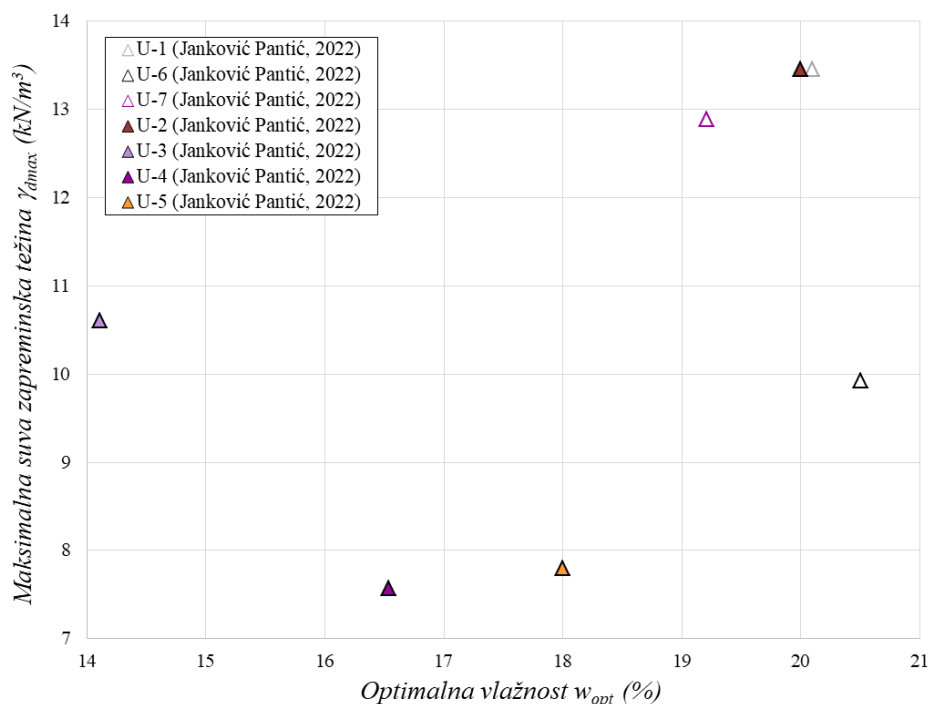
Komunalni otpad je heterogeni materijal i njegovo zbijanje zavisi od velikog broja faktora. Upravo iz ovog razloga, mora se posebno voditi računa o njegovim fizičkim osobinama, kao i načinu zbijanja. Energija zbijanja predstavlja samo jedan od faktora koji utiču na krajnje parametre. Na Slici 7.1. šematski su prikazani rezultati svih literaturnih podataka koji su obrađeni u doktorskoj disertaciji, a vezani su za standardni Proktorov opit.



Slika 7.1: Parametri zbijanja dobijeni standardnim Proktorovim opitom (energija zbijanja oko 600 kJ/m³) iz literature

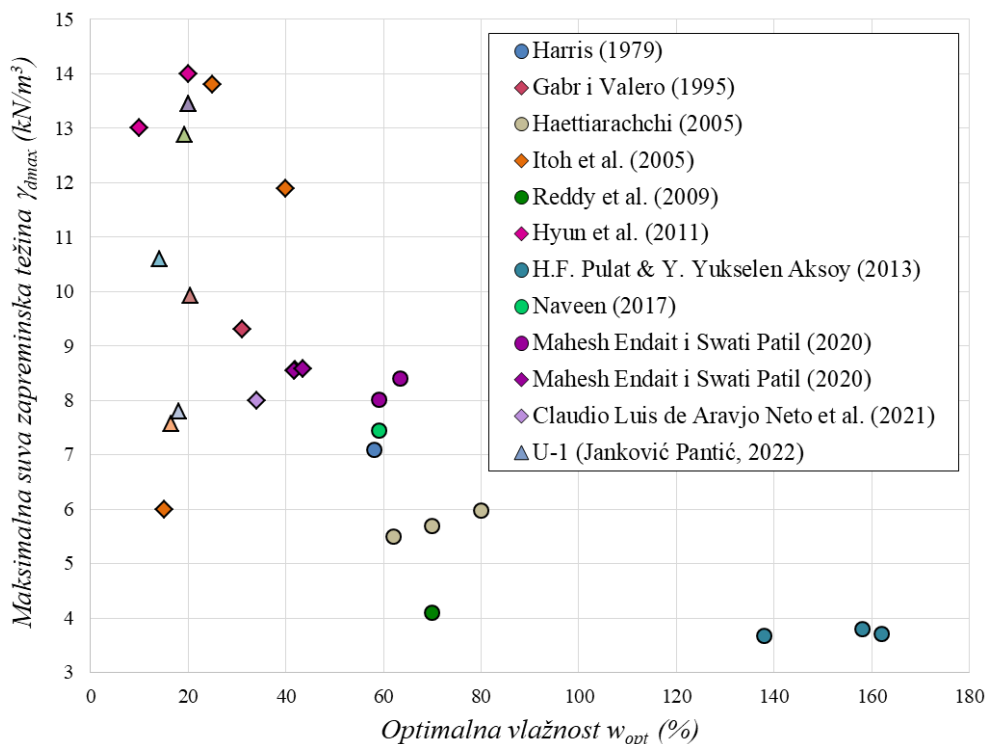
Uprkos istoj energiji zbijanja dolazi do rasipanja rezultata, što se može videti na Slici 7.1. Razlozi za ovo su višestruki, a uglavnom se vezuju za starost i sastav otpada. Sa dijagrama se može uočiti da svež otpad (kružne oznake na dijagramu) ima dosta višu vlažnost u odnosu na stariji otpad (kvadratne oznake na dijagramu). Autori *H.F. Pulat i Y. Yukselen Aksoy (2013)* su za svež otpad dobili izrazito visoke vlažnosti pri malim maksimalnim suvim zapreminskim težinama. Kroz dostupnu studiju, dodatnom analizom ovo se može objasniti kroz visok sadržaj organske materije kao što je hrana, baštenski otpad i tlo.

U nastavku, na Slici 7.2. su na isti način grafički prikazani rezultati laboratorijskih opita koji su dobijeni za potrebe ove doktorske disertacije.



Slika 7.2: Šematski prikaz parametara zbijanja komunalnog otpada dobijenih standardnim Proktorovim opitom

Ovakvim grafičkim prikazom dolazimo do zaključka da se parametri zbijanja dobijeni za potrebe ovog rada u velikoj meri poklapaju sa literaturnim podacima dobijenim za stari komunalni otpad, kao i da sastavi sa više veštačkih komponenti imaju manje maksimalne suve zapreminske težine, što takođe odgovara literaturnim podacima. Zbirni prikaz parametara zbijanja komunalnog otpada je prikazan na Slici 7.3.



Slika 7.3: Zbirni prikaz parametara zbijanja komunalnog otpada

Uz sve prethodno navedeno, zaključuje se da je pristup prilikom izvođenja standardnog Proktorovog opita bio ispravan, kao i da su dobijeni podaci pogodni za poređenje. Podrazumeva se da svaka međusobna analiza, pre svega uzme u obzir sastav i starost otpada.

Malj sa šiljcima predstavlja potpuno inovativno rešenje, koje bi u praksi tek trebalo da nađe svoj razvojni put. Rezultati dobijeni Proktorovim opitom sa ovim maljem trenutno su jedinstveni i ne mogu se porediti sa nekim drugim rezultatima primenom iste opreme.

8. ZAKLJUČAK I PREDLOG DALJIH ISTRAŽIVANJA

8.1. Zaključna razmatranja

Zbijanje komunalnog otpada predstavlja jedan od osnovnih procesa skladištenja na deponijama. Međutim, bez obzira na to, u Srbiji se nije uvek obraćala adekvatna pažnja na to. Zbijanje na deponijama (kad je izvođeno) se uglavnom sprovodilo haotično sa neadekvatnom opremom.

U dosadašnjoj skromnoj praksi domaća naučna i stručna javnost se uglavnom oslanjala na korišćenje svetske literature. Međutim, načini odlaganja i sastav komunalnog otpada varira unutar svake države, kao i između njih. Zbog svega navedenog, a i činjenice da je zbijanje komunalnog otpada jedan od najjeftinijih načina tretiranja komunalnog otpada na deponijama, pojavila se potreba za racionalnijim planiranjem i korišćenjem podataka koji su u vezi sa ovim postupkom. Iako se u svetu komunalni otpad u jako malom procentu odlaže na deponije, u Srbiji će i u narednoj deceniji biti osnovni način zbrinjavanja. Pored toga, a i obzirom na trenutno stanje u državi po pitanju nesavesnog odlaganja komunalnog otpada, jasna je pretpostavka da će sva neuređena smetilišta uskoro morati da se „prepakuju“, usled čega će rezultati i zaključci iz ove doktorske disertacije dati svoj praktični doprinos. Istraživanja izvedena za potrebe ove doktorske disertacije su prva na ovu temu, kako u Srbiji, tako i u regionu.

U okviru disertacije detaljno je objašnjen značaj zbijanja komunalnog otpada, kao i terenska i laboratorijska istraživanja koja bi trebalo da mu prethode. Naime, zbijanje komunalnog otpada bi po pravilu trebalo da se vrši prelazima kompaktora (tzv. „ježeva“) preko jednakih slojeva doveženog komunalnog otpada dok se ne postigne njegova maksimalna gustina. Kako bi se potpomoglo tome, čest je slučaj da se na površinu komunalnog otpada rasprašuje voda sve do postizanja optimalne vlažnosti koja omogućava maksimalnu obradivost otpada.

Laboratorijsko ispitivanje koje odgovara ovakvom načinu izvođenja zbijanja na terenu je Proktorov opit koji se koristi u mehanici tla. Proktorovi opiti (standardni i modifikovani) se u svetu već dugi niz godina izvode na komunalnom otpadu i većina autora smatra da su za to u potpunosti primenjivi (*Harris, 1979; Gabr i Valero, 1995; Hettiarachchi, 2005; Itoh i sar., 2005; Reddy i sar., 2009; Hyun i sar., 2011; H.F. Pulat i Y. YukselenAksoy, 2013; Naveen, 2017 itd.*) Međutim, određeni broj autora (*Wong, 2009; Hanson i sar., 2010; Mahesh, E. & Swati, P., 2020, Janković Pantić, J., 2022*) smatra da bi Proktorov aparat, malj i energiju zbijanja trebalo prilagoditi komunalnom otpadu.

U literaturi se može naći svega nekoliko referenci sa predlozima prilagođavanja Proktorovog opita ispitivanju otpada, povećanjem energije zbijanja i broja udaraca, uz već postojeću standardnu opremu. Razlog za ovakvu promenu su teži kompaktori koji se koriste na deponijama komunalnog otpada u odnosu na one za zemljane nasipe. Pored toga, sprovodila se i modifikacija dimenzija Proktorovog kalupa, kako bi bio omogućen što veći prečnik komponenti komunalnog otpada. Svako prilagođavanje Proktorovog opita nastalo je kao rezultat simulacije uslova na deponiji i komunalnom otpadu kao materijalu za zbijanje.

Međutim, do ove doktorske disertacije različita mehanizacija za izvođenje zbijanja na deponijama je uzeta u obzir kroz povećanje energije zbijanja i promena dimenzija kalupa, dok se šiljci koji se nalaze na kompaktorima u funkciji razaranja otpada nigde ne razmatraju. Zbog toga su, kao simulacija tzv. „ježeva“, na Proktorov malj dodati šiljci koji bi pri svakom padu vršili razaranja otpada, kao što je to slučaj prilikom korišćenja odgovarajuće opreme tokom zbijanja na deponijama.

U okviru disertacije su u cilju izvođenja laboratorijskih opita korišćeni uzorci formirani od komunalnog otpada sa dve deponije u Srbiji. Proktorov opit je rađen na dva načina, klasičnim i maljem sa šiljcima (pri istoj energiji zbijanja). Pre i nakon svakog izvođenja Proktorovog opita

izvršeno je sejanje komunalnog otpada, kako bi se definisao uticaj razaranja na komponente zbijanjem.

Formirano je sedam serija uzoraka različitih sastava i starosti (tri sa deponije Ada Huja i četiri sa deponije Plandište). Tokom analize izvedeni su sledeći zaključci:

- Na svim uzorcima Proktorovim opitom koji je izvođen maljem sa šiljcima postignute su veće suve zapreminske težine između 2- 8% (u odnosu na klasičan malj). Na velikom prostoru, kao što je deponija, ovakva povećanja maksimalne suve zapreminske težine bi dovele do značajnih finansijskih ušteda prilikom planiranja kontrolisanog zbijanja. Optimalna vlažnost je u većini slučajeva bila niža u odnosu na izvođenje Proktorovog opita klasičnim maljem, sa izuzetkom dva slučaja (koja se pripisuju nešto većem sadržaju plastike).
- Analizom Proktorovog opita došlo se do zaključka da sastav otpada igra ključnu ulogu u ponašanju uzoraka tokom zbijanja. Komponente slične tlu, poput one koja je prilikom izdvajanja u ovom slučaju nazvana „ostali otpad“ daju više vrednosti maksimalne suve zapreminske težine. Uz to, konstatovano je da veći sadržaj komponente „metal, staklo, keramika“ povoljno utiče na parametre zbijanja. Iz svega ovoga sledi da je poznavanje sastava od velike važnosti prilikom dovoženja otpada na komunalne deponije, što ukazuje na još jedan od tekućih problema u Srbiji.
- Kod serije uzoraka koje su formirane od starijeg otpada sa deponije Ada Huja konstatovane su više suve zapreminske težine u odnosu na uzorke formirane sa deponije Plandište. Obzirom na to, zaključak je da se stariji komunalni otpad bolje zbija u odnosu na mlađi.
- Prilikom izvođenja laboratorijskih istraživanja za ovu doktorsku disertaciju došlo se do opažanja da se materijal koji je u ovom slučaju nazvan „plastika, tekstil, guma“ loše zbija. Ovo je potvrđeno i kroz dva uzorka koja nisu prikazana u okviru doktorske disertacije (zbog nemogućnosti izvođenja opita), a koji su imali više od 40% pomenute komponente i bilo ih je nemoguće zbijati, pre svega zbog velike zapremine koju zauzimaju. Do sličnog zaključka su došli i *Okonta i sar. (2018)*. S tim u vezi, kao krajnja vrednost za učešće ove komponente prilikom izvođenja Proktorovog opita autor ove doktorske disertacije predlaže 25%.
- Izvođenje standardnog Proktorovog opita sa obe vrste malja vršena su i na uzorcima tla. Rezultati ovih ispitivanja su pokazali da šiljci nisu doprineli većoj promeni maksimalne suve zapreminske težine i optimalne vlažnosti, što govori u prilog osnovnoj pretpostavki da je ova inovacija vezana isključivo za komunalni otpad, i da je kao takva u potpunosti neprimenjiva u mehanici tla.
- Još jedan od zaključaka koji je izveden na osnovu standardnog Proktorovog opita za obe vrste malja je oblik kriva. Autori (*Hanson i sar., 2010*) su već ranije naglašavali da Proktorove krive za komunalni otpad nemaju toliko izražen zvonast oblik kao što je slučaj kod tla. Međutim, kao dodatni doprinos na već izveden zaključak, autor doktorske disertacije direktno povezuje učešće komponente „plastika, guma, tekstil“ i „tvrda plastika“ na oblik krive. Naime, u svim slučajevima gde je prisutan povećan sadržaj ove komponente, došlo je do značajnog zaravnjenja Proktorove krive.
- Kako bi se pratilo razaranja otpada zbijanjem (Proktorovim opitom), vršeno je sejanje materijala pre i nakon njegovog izvođenja. Pomoću granuometrijskih krivi konstatovano je da se destrukcija otpada bolje izvodi pomoću malja sa šiljcima, što odgovara osnovnoj ideji doktorske disertacije (da se simuliraju kompaktori „ježevi“). Kao kvantativni pokazatelj,

uveden je koeficijent razaranja (Δr), što je direktno doprinelo zaključku da se uzorci sa povećanim sadržajem veštačke komponente (koja je u ovom slučaju svrstana u krupnozrnu), bolje razaraju.

Jedan od osnovnih ciljeva ove doktorske disertacije jeste ukazivanje na racionalno korišćenje laboratorijskih opita u svrhu pravilnog upravljanja otpadom. Iako su terenski radovi uglavnom pouzdaniji, njihova cena često isključuje mogućnost izvođenja istih. Ukoliko bi naučna i stručna zajednica prepoznala značaj izvođenja geomehaničkih laboratorijskih opita prilikom ispitivanja komunalnog otpada pre i tokom njegovog odlaganja na deponije, upravljanje otpadom bi postalo dosta jednostavnije i ekonomski isplativije.

Doktorska disertacija je dala niz naučnih doprinosa, pre svega na regionalnom nivou obzirom da ništa slično osim toga, do sada nije rađeno. Nakon toga, konstruisanje novog malja sa šiljcima moglo bi da probudi veliko interesovanje svih koji se bave otpadom. Malj sa šiljcima koji doprionose razaranja i boljem zbijanju uzoraka otpada, pri izvođenju Proktorovog opita, predstavlja novo tehničko rešenje kako na našem, tako i na svetskom tržištu.

8.2. Preporuka za dalja istraživanja

U nastavku teksta biće date preporuke za dopunu i nastavak istraživanja koja su obrađena u doktorskoj disertaciji:

- Određivanje sastava komunalnog otpada na teritoriji cele Srbije kako bi se njegovo zbijanje prilikom daljeg odlaganja vršilo racionalnije, uz maksimalno iskorišćavanje kapaciteta deponija;
- Upoznavanje domaće stručne javnosti o značaju zbijanja komunalnog opada, kao i o mogućnostima koje ono daje prilikom prepakivanja i rekultivacije neuređenih deponija i smetilišta;
- Formiranje probnog polja na deponiji na kom bi se vršilo zbijanje komunalnog otpada (sa dodavanjem vode) u jednakim slojevima mehanizacijom sa ravnim valjcima i takozvanim „ježevima“, uz praćenje svih fizičko mehaničkih karakteristika, kako bi se dokazala praktična primena inovativnog malja sa šiljcima pri izvođenju Proktorovog opita;
- Dodavanje šiljaka na malj koji se koristi prilikom modifikovanog Proktorovog opita. Utvrditi da li prilikom veće energije zbijanja daje ista poboljšanja kao i tokom izvođenja standardnog Proktorovog opita;
- Konstruisanje nekoliko maljeva, sa različitim brojem šiljaka ili nekih drugih dodataka kojim bi se vršila destrukcija otpada. Poređenje rezultata, kako ovih dobijenih za potrebe doktorske disertacije, tako i ostalih međusobno, a sve u cilju dobijanja najboljeg rešenja za izvođenje opita;
- Predimenzionisati kompletan Proktorov aparat za zbijanje komunalnog otpada i to povećavanjem dimenzija kalupa i konstruisanjem malja sa šiljcima koji je teži od postojećih maljeva. Na taj način bi se, manjim brojem udaraca postizala veća energija zbijanja;
- Uvođenje domaćih i međunarodnih standarda za laboratorijska ispitivanja zbijanja komunalnog otpada.

LITERATURA

ABNT (2016), *Soil compaction test*. NBR 7182, Brazilian Association of Technical Standards (ABNT). Rio de Janeiro, RJ, Brazil (in Portuguese).

ASTM D1557-12 (2021), *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (2,700 kN-m/m³)*, ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM D698-12 (2021), *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (600 kN-m/m³)*, ASTM International, West Conshohocken, PA.

Cláudio Luis de Araújo Neto, Renan Ítalo Leite Gurjão, Amanda Paiva Farias, Márcio Camargo de Melo, Veruschka Escarião Dessoles Monteiro. (2021), *Environmental Science and Pollution Research*.

Coumoulos, D.G., Koryalos, T.P., Metaxas, I.L., & Gioka, D.A. (1995), *Geotechnical Investigation at the Main Landfill of Athens*, Proceedings of the 5th International Landfill Symposium, Sardinia '95, S. Margherita di Pula, CISA, Italy, pp. 885-895.

Cox, J. T., Yesiller, N., Hanson J. (2015), *Implications of variable waste placement conditions for MSW landfills*, Waste Management Symposium, pp. 46:338–51.

Cox, J. T. (2013), *Effects of Waste Placement Practices on the Engineering Response of Municipal Solid Waste*, MSc. Thesis, California Polytechnic State University, San Luis Obispo, California.

Cox, J. T., Hanson, J., Yesiller, N., Clarin, J. & Noce, D. E. (2014), *Optimization of Compaction Procedures and Waste Placement Operations at MSW Landfills*, Global Waste Management Symposium, Orlando, Florida.

De Haan, E.J. (1997), *An overview of the mechanical behavior of peats and organic soils and some appropriate construction techniques*, Proceedings of Conference on Recent Advances in Soft Soil Engineering, Huat & Bahia, Sarawak, pp. 17-20.

Departman za inženjerstvo zaštite Životne sredine, (2009), *Projekat: Utvrđivanje sastava otpada i procene količine u cilju definisanja strategije upravljanja sekundarnim sirovinama u sklopu održivog razvoja Republike Srbije*. Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu, Srbija.

Dixon, N. & Jones, R.D.V. (2005). *Engineering properties of municipal solid waste*, Geotextiles and Geomembranes, Vol. 23, 205 – 233.

Endait, M., Patil, S. (2020) *Laboratory investigation of compaction characteristics of fresh and degraded municipal solid waste*, Waste Disposal & Sustainable Energy, pp. 305-312.

Fahker, A. (2006), *Experimental Study on the Compaction of Waste*, Proceedings of the 5th International Conference of Environmental Geotechnics, ISSMGE, London, UK, 445-452.

Fassett, J.B., Leonards, G.A., Repetto, P.C. (1994), *Geotechnical Properties of Municipal Solid Waste and Their Use in Landfill Design*, WasteTech '94 - Landfill Technology Conference, Charleston, South Carolina, USA, pp. 1-32.

Gabr, M.A., Valero, S.N. (1995), *Geotechnical Properties of Municipal Solid Waste*, Geotechnical Testing Journal, ASTM, 18 (2), pp. 241-251.

Hanson, J.L., Yesiller., N., Von Stockhausen, S.A. and Wong, W. W. (2010), *Compaction Characteristics of Municipal Solid Waste*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 136, No.8., USA, pp. 1095-1102.

Harris, M. R. R. (1979), *Geotechnical characteristics of landfilled domestic refuse, the engineering behaviour of industrial and urban fill*, Proceeding of the symposium held at the University of Birmingham, Midland Geotechnical Society, University of Birmingham, Birmingham, England, pp B1–B10.

Hettiarachchi, C.H. (2005), *Mechanics of Biocell landfill settlements*, Ph.D Dissertation, New Jersey Institute of Technology, Newark, NY.

Huat, B.K. (2004), *Organic and Peat Soils Engineering*, Serdang: University Putra Malaysia Press, 146.

Hyun, H P., Borinara, P., Hong, K.D. (2011) *Geotechnical Considerations for End-Use of Old Municipal Solid Waste Landfills*, Int. J. Environ. Res.,5(3), pp. 573-584.

Itoh, T., Toehata, I, Kawano, Y., Kameda, M., Fukvi, S., Koelsch, F., and Yonai, Y. (2005) *Mechanical Properties of Municipal Waste Deposits and Ground Improvement*, Proceedings of the Sixteenth International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Volume 4, Millpress Science Publishers, Rotterdam, the Netherlands, pp. 2273-2276.

Janković Pantić, J., Rakić, D., Basarić Ikodinović, I., Đurić, T., Bogdanović S. (2020), *Parametri zbijanja komunalnog otpada određeni različitim laboratorijskim metodama*, Građevinski kalendar, Savez inženjera i tehničara Srbije, Beograd, Srbija, str.16-33.

Janković Pantić, J., Rakić, D., Basarić Ikodinović, I., Đurić, T., Hadži- Niković, G. (2022), *Geotechnical effects of municipal solid waste destruction with different compaction methods*, Comptes rendus de l'Académie bulgare des Sciences, Tome 75, No 1, pp. 110-120.

Janković, J., Rakić, D. & Basarić, I. (2015), *Compaction of municipal waste*, X International Symposium on Recycling Technologies and Sustainable Development, Bor, Serbia.

Janković, J., Rakić, D., Basarić Ikodinović, I, Đurić, T. (2021), *Određivanje zbijenosti starog komunalnog otpada*, Konferencija „Otpadne vode, komunalni čvrst otpad i opasan otpad, Beograd, Srbija, str. 180-184.

Janković, J., Rakić, D., Basarić Ikodinović, I., Đurić, T., Čaki, L. (2019), *Značaj izvođenja Proktorovog opita na komunalnom otpadu*, Zbornik radova osmog naučno- stručnog međunarodnog savetovanja „Geotehnički aspekti građevinarstva“, Vrnjačka Banja, Srbija, str. 439-444.

Kaniraj, S.R., Joseph, R.R. (1996), *Geotechnical behavior of organic soils of North Sarawak*, 4th International Conference on Soft Soil Engineering, Vancouver, Canada.

König, D., Jessberger, H.L. (1997). *Waste Mechanics*, Report of the ISSMGE Technical Committee TC5 on Environmental Geotechnics, Bochum, Germany, pp. 35-76.

Langer, U. (2005), *Shear and Compression Behaviour of Undegraded Municipal Solid Waste*, Ph.D. Thesis, Loughborough University, UK.

Maksimović, M. (2014), *Mehanika tla*, peto izdanje, AGM knjiga.532.

Manassero, M., Van Impe, W.F. & Bouazza, A. (1997), *Waste Disposal and containment*, Proceedings, 2nd International Congress on Environmental Geotechnics, Osaka, Japan, Balkema, Rotterdam, Vol.2, pp. 1425-1474.

Marques, A.C.M. (2001), *Compaction and compressibility of municipal solid waste*, Ph.D Dissertation, Sao Paulo University, Sao Carlos, Brazil.

Najdanović, N., Obradović, R. (1999), *Mehanika tla u inženjerskoj praksi*, Rudarski institut Beograd, 550.

Naveen, BP (2017), *Geotechnical Properties of Fresh Municipal Solid Waste Landfill in India*, 7th International Conference on "Experiments/Process/System/Modeling/Simulation /Optimization, Athens, Greece.

Okonta FN, Ngcobo N, Mtsweni M, i sar. (2018), *Compaction properties of municipal solid waste. Contemporary Issues in Geoenvironmental Engineering*, GeoMEast 2017. Sustainable Civil Infrastructures. Springer, Cham.

Oweis, I.S. & Khera, R.P. (1998). *Geotechnology of waste management*, 2nd PWS Publishing company, Boston, 472.

Pulat, H.F., Yukselen- Aksoy, Y. (2013), *Compaction behavior of synthetic and natural MSW samples in different compositions*, Waste Management & Research 31(12), pp. 1-7.

Pulat, H.F., Yukselen- Aksoy, Y. (2013), *Composition and degradation effects on the compaction characteristics of municipal solid wastes*, Proceedings of the International Symposium, Coupled Phenomena in Environmental Geotechnic, pp. 341-346.

Rakić, D. (2013), *Konstitutivne zavisnosti komunalnog otpada sa deponija u Srbiji*, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet.

Rakić, D., Basarić Ikodinović, I., Janković, J., Đurić, T. (2021), *Phase relations and physical indicators of municipal waste from old landfills in Serbia*, Third International Symposium on Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics, Kyoto University, Japan, pp. 105-110.

Rakić, D., Basarić, I., Čaki, L., Čorić, S. (2017), *Contribution to municipal waste geotechnical classification*, Proceedings of the 2nd Symposium - Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics (CPEG2), CRC Press, Taylor & Francis Group, Leeds, UK.

Rakić, D., Basarić I., Čaki, L., Čorić, S. (2020), *Contribution to the geotechnical classification of municipal waste landfills in Serbia*, Environmental Geotechnics, Vol. 7, Issue pp. 501-511.

Reddy, K.R., Hettiarachi, H., Gangathulasi, J., Bogner, J., Lagier, T. (2009a), *Geotechnical properties of synthetic municipal solid waste*, International Journal of Geotechnical Engineering, 3 (3), pp. 429-438.

Reddy, K.R., Hettiarachi, H., Parakalla, N.S., Gangathulasi, J., Bogner, J. (2009b), *Geotechnical properties of fresh municipal solid waste at Orchard Hills landfill, USA*, Waste Management, 29 (2), pp. 952-959.

Službeni Glasnik RS. (2018). *Zakon o upravljanju otpadom*, Br. 95.

- Skempton, A.W. & Petley, J. (1970), *Ignition loss and other properties of peats and clays from Avonmouth, King's Lynn, and Cranberry Moss*, *Geotechnique*, 20 (4), pp. 343-356.
- SRPS EN 13286-2, (2012), *Metode ispitivanja za laboratorijsku referentnu zapreminsku masu i sadržaj vode- Zbijanje po Proktoru*, Institut za standardizaciju Srbije.
- Taufiq, T. (2010), *Characteristics of Fresh Municipal Solid Waste*, MSc. Thesis, The University of Texas at Arlington, USA.
- Turer, D. i Turer, A. (2011), *A simplified approach for slope stability analysis of uncontrolled waste dumps*, *Waste Management & Research*, 29(2), pp. 146–156.
- United States Environmental Protection Agency, (2008), *Municipal Solid Waste*, Wastes. US EPA.
- Von Stockhausen, S. (2007), *Optimization of Waste Compaction Practices for Landfills*, MSc. Thesis, California Polytechnic State University, San Luis Obispo, San Luis Obispo, CA.
- Wong, W.W. (2009), *Investigation of the geotechnical properties of municipal solid waste as a function of placement conditions*, MSc. thesis, California Polytechnic State University, San Luis Obispo, USA.
- Zekkos, D. (2005), *Evaluation of static and dynamic properties of municipal solid waste*, PhD thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley.
- Zekkos, D., Kabalan, M. , Flanagan, M. (2013), *Lessons learned from Case Histories of Dynamic compaction of Municipal Solid Waste Sites*, *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 139, pp.738-752.
- Zekkos, D.P., Bray, J.D., Kavazanjian, E., Matasovic, N., Rathje, E.M., Riemer, M.F., Stokoe, K.H. (2006), *Unit weight of municipal solid waste*, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 132(10), pp. 250-1261.
- Zornberg, J.G., Jernigan, B.L., Sanglerat, T.R., Cooley, B.H. (1999), *Retention of free liquids in landfills undergoing vertical expansion*, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 7, pp. 583-594.

BIOGRAFIJA

Jovana Janković Pantić rođena je 03.06.1988. godine u Beogradu, Republika Srbija. Osnovnu i srednju školu (Arhitektonska tehnička škola) završila je u Beogradu. Nakon toga je školske 2007/2008 godine upisala Osnovne akademske studije na Rudarsko- geološkom fakultetu (Studijski program Geotehnika) gde je četiri godine kasnije diplomirala sa prosečnom ocenom 8.10. Diplomске akademske studije na istom studijskom programu upisuje školske 2011/2012 godine, gde godinu dana kasnije stiče zvanje master inženjera geologije sa prosečnom ocenom 9.00.

Doktorske studije na Rudarsko- geološkom fakultetu Univerziteta u Beogradu (Studijski program Geotehnika) upisuje školske 2013/2014. godine. Položila je sve ispite sa prosečnom ocenom 9.73.

Od 2015. godine je zaposlena kao istraživač na Rudarsko- geološkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, pri Departmanu za Geotehniku u okviru projekta Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja (TR 36014) pod nazivom "Geotehnički aspekti istraživanja i razvoja savremenih tehnologija građenja i sanacija deponija komunalnog otpada".

Učesnik je brojnih naučnih i stručnih skupova iz oblasti geotehničkog inženjerstva. Kao autor ili koautor objavila je dvadesetak naučnih i stručnih radova u međunarodnim i nacionalnim časopisima. Kao član organizacionog odbora učestvovala je na nekoliko naučnih konferencija.

Pored naučnoistraživačkog rada, bavi se i stručnim radom u rešavanju različitih problema iz oblasti geotehničkog inženjerstva (geotehnička istraživanja i ispitivanje tla, laboratorijska geomehanička ispitivanja, deponije komunalnog otpada, zaštita životne sredine itd.). Udata je i živi u Beogradu.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Јована М. Јанковић Пантић

Број индекса Г 803/13

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Геотехнички ефекти разарања комуналног отпада различитим поступцима збијања

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, децембар 2022.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора: Јована М. Јанковић Пантић
Број индекса: Г 803/13
Студијски програм: Геотехника
Наслов рада: **Геотехнички ефекти разарања комуналног отпада различитим поступцима збијања**
Ментор: др Драгослав Ракић, ванредни професор,
Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањена у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива 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 аутора

У Београду, децембар 2022.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Геотехнички ефекти разарања комуналног отпада различитим поступцима збијања

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)

2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)

3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)

5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)

6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.
Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, децембар 2022.

1. **Ауторство.** Дозвољаваате 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.** Дозвољаваате 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 прерада.** Дозвољаваате 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.** Дозвољаваате 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 прерада.** Дозвољаваате 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.** Дозвољаваате 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.