

**SAVEZ GRAĐEVINSKIH INŽENJERA SRBIJE**

UDK: 624(059)      ISSN 0352-2733  
COBISS.SR – ID 43031

**GRAĐEVINSKI  
KALENDAR  
2020**

Građevinski kalendar, Vol. 52  
Beograd, mart 2021, p. I-IX, 1-67

Jovana Janković Pantić, dipl. inž. geol.<sup>1</sup>  
Prof. dr Dragoslav Rakić, dipl. inž. geol.<sup>2</sup>  
Irena Basarić Ikodinović, dipl. inž. građ.<sup>3</sup>  
Tina Đurić, dipl. inž. geol.<sup>4</sup>  
Snežana Bogdanović, dipl. inž. geol.<sup>5</sup>

## PARAMETRI ZBIJANJA KOMUNALNOG OTPADA ODREĐENI RAZLIČITIM LABORATORIJSKIM METODAMA

0352-2733, 52 (2020), p. 16-33

UDK: 628.468  
ORIGINALNI NAUČNI RAD

### Rezime

Zbijanje komunalnog otpada predstavlja jednu od osnovnih faza korišćenja komunalne deponije. Zbog toga je kao i kod drugih nasutih građevina, veoma korisno odrediti parametre zbijanja: maksimalnu suhu zapreminsku težinu ( $\gamma_{dmax}$ ) i optimalnu vlažnost ( $w_{opt}$ ). Dobijeni rezultati mogu da posluže prilikom projektovanja kapaciteta deponije kao i prilikom definisanja obradivosti otpada.

U dosadašnjoj praksi najčešći način određivanja parametra zbijanja je standardna metoda (Proktorov opit) koja se koristi u mehanici tla, uz eventualnu redukciju energije zbijanja. Međutim, različiti tretmani komunalnog otpada na samoj deponiji (uključujući i predobradu), ukazuju na potrebu za promenom ovog klasičnog pristupa. Osnovni razlog za to je simulacija rada kompaktora (ježeva) na deponiji. Zbog toga se prilikom straživanja uvode različita inovativna rešenja, kao što je promena klasičnog ravnog Proktorovog malja dodavanjem šiljaka, čija je funkcija pored zbijanja, razaranje i usitnjavanje komunalnog otpada.

U radu je prikazano ponašanje komunalnog otpada na dva veštački pripremljena uzorka različitog sastava (deponija Plandište). Uzorci su spitani u standardnom Proktorovom aparatu pri istoj energiji zbijanja,

Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, Srbija,  
[jovana.jankovic@rgf.bg.ac.rs](mailto:jovana.jankovic@rgf.bg.ac.rs)

Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, Srbija,  
[dragoslav.rakic@rgf.bg.ac.rs](mailto:dragoslav.rakic@rgf.bg.ac.rs)

Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, Srbija,  
[irena.basaric@rgf.bg.ac.rs](mailto:irena.basaric@rgf.bg.ac.rs)

Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, Srbija,  
[tina.djuric@rgf.bg.ac.rs](mailto:tina.djuric@rgf.bg.ac.rs)

Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, Srbija,  
[snezana.zecevic@rgf.bg.ac.rs](mailto:snezana.zecevic@rgf.bg.ac.rs)

korišćenjem različitih maljeva: standardnog ravnog malja i malja sa ugrađenim šiljcima. Na ovaj način omogućeno je poređenje rezultata dobijenih različitim postupcima zbijanja, i utvrđen je značaj sastava otpada na uslove zbijanja.

**Ključne reči:** deponija komunalnog otpada, zbijanje, Proktorov opit, malj sa šiljcima

## COMPACTION OF MUNICIPAL WASTE BY DIFFERENT LABORATORY METHODS

### Abstract

The compaction of municipal waste is one of the main phase in operating life of the landfill. Therefore, as with other embankment structures, it is very usefull to determine compaction parameters, maximum dry unit weight ( $\gamma_{dmax}$ ) and optimal moisture content ( $w_{opt}$ ). The obtained results can be used in designing the capacity of the landfill as well as when defining the workability of waste.

In current practice, the most common method of determination compaction parameters is by standard method (Proctor compaction test) used in soil mechanics, with eventual reduction of compaction energy. Although this methodology is accepted in some younger scientific discipline "waste mechanics", different treatments of municipal waste at the landfill itself (including pretreatment), indicate the need to change this classical approach. The main reason for that is the simulation of the operation of compactors (hedgehogs) at the landfill. Therefore, during the research, various innovative solutions are introduced, such as changing the classic flat Proctor hammer, by adding spikes, whose function is, in addition to compaction, destruction and shredding of municipal waste.

The paper presents the behavior of municipal waste for two synthetic waste samples with different waste composition (Plandište landfill). The samples were tested in standard Proctor apparatus at the same compaction energy, but with two different hammers: standard flat hammer and hammer with spikes. In this way, it is possible to compare the results obtained by different compaction procedures, and effect of the waste composition on compaction conditions is determined.

**Key words:** municipal waste landfill, compaction, Proctor compaction test, hammer with spikes

## 1. UVOD

Odlaganje komunalnog otpada na deponije predstavlja jedan od velikih izazova današnjice sa ekološkog aspekta. Počevši od izbora lokacije, njenog životnog veka, pa preko sigurnog zatvaranja, deponija komunalnog otpada mora ispuniti tehničke uslove za izgradnju. Obzirom na izrazitu heterogenost u sastavu i veličini komponenti, svaki od procesa skladištenja mora se posebno pripremati i pratiti. Zbijanje komunalnog otpada svakako predstavlja jednu od najvažnijih aktivnosti na deponiji. Paralelno sa njim, menjaju se fizičko-mehaničke karakteristike otpada (čvrstoća na smicanje, deformabilnost, vodopropustljivost). Dodavanje optimalnog sadržaja vode tokom zbijanja otpada rezultira povećanjem obradivosti, uslova zbijanja, promenom zapreminske težine i količine otpada koju je moguće odložiti (povećanja kapaciteta deponije), uz smanjenje vremena zbijanja [3].

Kako bi se zbijanje komunalnog otpada sprovelo ekonomično, neophodno je predhodno laboratorijski odrediti parametre zbijanja, maksimalnu suhu zapreminsku težinu ( $\gamma_{dmax}$ ) pri određenoj optimalnoj vlažnosti ( $w_{opt}$ ). Podaci o ovakvim laboratorijskim istraživanjima sve češće se pominju u svetskoj literaturi (Gabr & Valero, 1995; Itoh i dr., 2005; Hettiarachchi, 2005; Wong, 2009; Reddy i dr., 2010; Hanson, 2010; Pulat & Yasiller, 2013; Naveen, 2017; Endait, 2020. Autori su pretežno koristili konvencionalne metode kao u mehanici tla, uz eventualnu redukciju energije zbijanja. Dobro zbijeni komunalni otpad zauzima manju zapreminu i omogućuje znatno sigurnije skladištenje. Bez obzira na to, u Srbiji nema dovoljno podataka o načinu i kontroli zbijanja komunalnog otpada. Razlog je najčešće nekontrolisano odlaganje bez predhodno odrađene analize.

Poseban problem predstavlja i način zbijanja komunalnog otpada jer se na deponijama koriste drugačiji uređaji i tehnologije u odnosu na tlo, pa se samim tim postavlja i pitanje ispravnosti primene standardnih laboratorijskih metoda.

U radu je prikazan novi način izvođenja Proktorovog opita koji je prilagođen komunalnom otpadu, sa ciljem da se izvrši simulacija uslova rada na deponiji. Dobijeni rezultati primenom ovog novog postupka, treba da predstavljaju polaznu osnovu za buduću praksu, kako u fazi projektovanja tako i prilikom organizacije i izgradnje savremenih deponija.

Analize su urađene sa komunalnim otpadom koji je uzet sa neuredene deponije u Plandištu. Izvršeno je razvrstavanje otpada, a nakon toga su

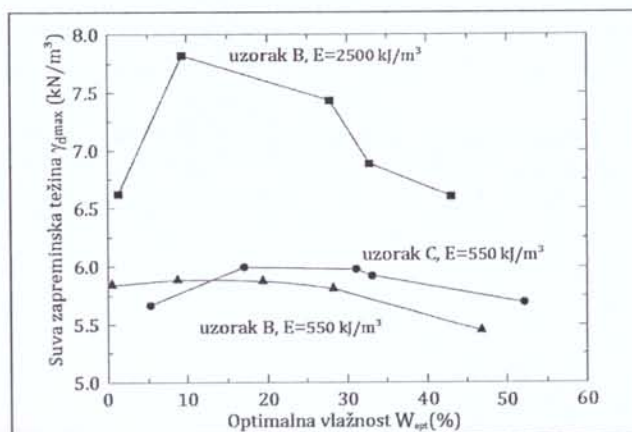
formirana dva uzorka različitog sastava, na kojima su izvedeni Proktorovi opiti korišćenjem standardnog i nestandardnog malja sa šiljcima.

## 2. OSVRT NA DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA ZBIJANJA KOMUNALNOG OTPADA

Laboratorijsko ispitivanje zbijanja komunalnog otpada, slično je kao i kod ispitivanja zbijenosti tla, gde su uslovi propisani odgovarajućim standardima (SRPS EN 13286-2, ASTM D 1557). Ispitivanjima se određuje optimalna vlažnost ( $w_{opt}$ ) pri kojoj se postiže najveći učinak zbijanja, izražen suvom zapreminskom težinom  $\gamma_d$  ( $kN/m^3$ ). Pri tome se koristi tzv. Proktorov opit (standardni i modifikovan).

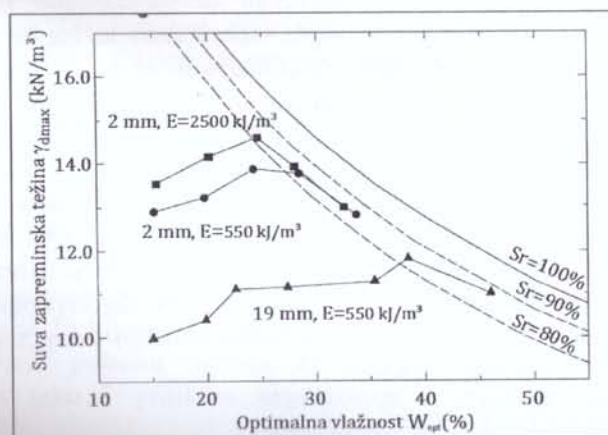
Međutim, zbog specifičnosti komunalnog otpada, pre svega u pogledu izražene heterogenosti, postupak ispitivanja se često prilagođava njegovim karakteristikama. Iz ovog razloga, a kako bi se na neki način izvršila simulacija zbijanja na terenu, u dosadašnjoj praksi često su vršeni modifikovani opiti sa povećanjem energije zbijanja i do 4 puta [3,9,14]. To se postiže zbijanjem otpada pomoću malja veće mase ili povećanjem broja udaraca. Pojedini autori su u svojim radovima menjali pristupe, uključujući i one standardizovane, a neki od najčešće citiranih navedeni su u nastavku teksta.

Gabr i Valero (1995) određivali su osnovna inženjerska svojstva komunalnog otpada sa deponije na koju se otpad odlaže još od 1940 godine. Koristili su otpad starosti od 15 do 30 godina koji je uzet istražnim bušenjem. Parametre zbijanja određivali su standardnim Proktorovim opitom i dobijena je maksimalna suva zapreminska težina od  $\gamma_{dmax} = 9.3$   $kN/m^3$  koja je postignuta pri optimalnoj vlažnosti od  $w_{opt} = 31\%$  [1]. Usled sve većeg problema sa deponijama komunalnog otpada u Japanu, a uz činjenicu da se postojeće lokacije zatvorenih deponija u blizini gradova koriste samo kao parkovi ili golf tereni, Itoh i dr. (2005) su odredili parametre zbijanja za tri grupe uzoraka koje su pripremljene u različitim sastavima. Proktorov opit je izveden sa različitim energijama, od  $E_1 = 550$   $kJ/m^3$  i  $E_2 = 2500$   $kJ/m^3$ . Na slici 1 prikazane su dve serije uzoraka koje su formirane od nesagorivog komunalnog otpada. Nesagorivi otpad imao je optimalnu vlažnost  $w_{opt} = 10-20\%$  pri maksimalnoj suvoj zapreminskoj težini od  $\gamma_{dmax} = 6$   $kN/m^3$  -  $8$   $kN/m^3$ .



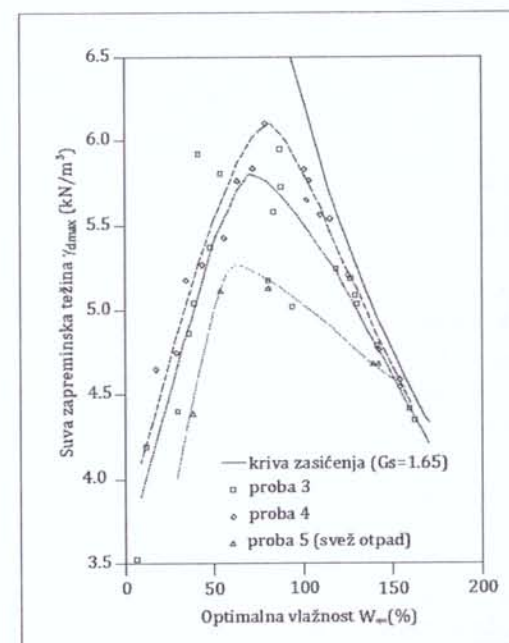
Slika 1. Prikaz rezultata Proktorovog opita za nesagoriv komunalni otpad (Itoh i dr. 2005) [2]

U slučaju sagorivog komunalnog otpada na uzorku čija veličina zrna ne prelazi 2 mm (slika 2), optimalna vlažnost iznosi  $w_{opt} = 25\%$  pri maksimalnoj suvoj zapremskoj težini od  $\gamma_{dmax} = 14.5 \text{ kN/m}^3$ . Kod čestica sa maksimalnom veličinom frakcija od 19 mm, optimalna vlažnost iznosi  $W_{opt}=40\%$ , a postignuta je pri maksimalnoj suvoj zapremskoj težini od  $12 \text{ kN/m}^3$ . Opšti zaključak na osnovu analiziranih podataka je da maksimalna suva zapreminska težina raste uz prisustvo sitnozrnije komponente u otpadu (sagorivi otpad) [2].



Slika 2. Prikaz rezultata Proktorovog opita za sagoriv komunalni otpad (Itoh i dr. 2005) [2]

Hettiarachchi (2005) je u svojoj doktorskoj disertaciji takođe analizirao parametre zbijanja komunalnog otpada. Sastav komunalnog otpada za urađene uzorke je usklađen sa standardima Američke agencije za zaštitu živote sredine - USEPA. Ispitivanja su izvedena u standardnom Proktorovom aparatu (energija zbijanja  $600 \text{ kJ/m}^3$ ), sa malo izmenjenim pristupom po pitanju korišćenja materijala. Urađena su tri opita, s tim da je za dva upotrebljen otpad koji je više puta zbijan, dok je za jedan korišćen svež otpad. Rezultati opita su prikazani na slici 3.



Slika 3. Krive zbijanja za korišćen otpad (Hettiarachchi, 2005) [4]

Iz prikazanih rezultata se može jasno videti značaj izbora uzorka i njegove prethodne pripreme, koja može da simulira predobradu otpada pre konačnog odlaganja (Tabela 1). Ponovna upotreba komunalnog otpada uticala je na povećanje maksimalne suve zapremske težine i optimalne vlažnosti, odnosno da je vlažni deo Proktorove krive za više puta zbijani komunalni otpad, znatno bliži liniji (krivi) zasićenja [4].

**Tabela 1.** Parametri zbijanja komunalnog otpada u zavisnosti od načina pripreme uzorka (Hettiarchchi, 2005)

Proba br.	Uzorak	Maksimalna suva zapreminska težina $\gamma_{dmax}$ (kN/m <sup>3</sup> )	Optimalna vlažnost $w_{opt}$ (%)
3	23 puta korišćen	5.80	70
4	43 puta korišćen	6.10	80
5	Svež otpad	5.25	52

Reddy et al. (2008) su, takođe, izveli standardni Proktorov opit na uzorcima čija je maksimalna veličina čestica 40 mm. Pri optimalnoj vlažnosti od  $w_{opt} = 70\%$  dobijena je maksimalna suva zapreminska težina od  $\gamma_{dmax} = 4.2 \text{ kN/m}^3$  [13].

Wong (2009) je izvršio modifikovan Proktorov opit sa energijom zbijanja od  $E = 2700 \text{ kJ/m}^3$ , korišćenjem otpada sa maksimalnom veličinom čestica od 25 mm u cilindru prečnika 152 mm. Maksimalna suva zapreminska težina od  $\gamma_{dmax} = 5.1 \text{ kN/m}^3$  postignuta je pri optimalnoj vlažnosti od  $w_{opt} = 66\%$ . Nakon toga je četiri puta povećao energiju zbijanja na  $E = 10\ 800 \text{ kJ/m}^3$ , tako da je dobijena maksimalna suva zapreminska težina od  $\gamma_{dmax} = 5.9 \text{ kN/m}^3$ , pri optimalnoj vlažnosti od  $w_{opt} = 56\%$  [14].

Hanson i dr. (2010) su ispitivanja vršili na veštački formiranim uzorcima koji su uzeti sa deponije u Mičigenu. Za razliku od ranijih autora, koji su ispitivanja obavljali isključivo korišćenjem različite energije zbijanja ( $E = 600, 2700, 10800 \text{ kJ/m}^3$ ), oni su uz to u obzir uzeli i sezonske efekte. Za energiju zbijanja koja odgovara standardnoj energiji za modifikovani Proktorov opit ( $E = 2700 \text{ kJ/m}^3$ ) bez analize sezonskih efekata, dobijena je maksimalna suva zapreminska težina od  $\gamma_{dmax} = 5.2 \text{ kN/m}^3$  pri optimalnoj vlažnosti od  $w_{opt} = 65\%$ , dok je za četiri puta veću energiju zbijanja maksimalna suva zapreminska težina iznosila  $\gamma_{dmax} = 6 \text{ kN/m}^3$  postignuta pri optimalnoj vlažnosti od  $w_{opt} = 56\%$ . Za hladne vremenske uslove, maksimalna suva zapreminska težina je  $\gamma_{dmax} = 8.2 \text{ kN/m}^3$  koja je postignuta pri optimalnoj vlažnosti  $w_{opt} = 79.5\%$ . U toplim vremenskim uslovima, dobijene su nešto niže vrednosti, pa je za maksimalnu suhu zapreminsku težinu od  $\gamma_{dmax} = 6.1 \text{ kN/m}^3$  ostvarena optimalna vlažnost  $w_{opt} = 70.5\%$  [3].

Pulat i dr. (2013) su na isti način kao i predhodni autori došli do rezultata, ali sa tri različita sastava otpada koja su karakteristična za

određene regione (Turska, Evropa i SAD). Ovakav pristup su autori odabrali zbog izraženih razlika u ekonomskom i industrijskom smislu, što se ogleda u različitim procentualnim učešćima komponenti. Za energiju zbijanja koja odgovara modifikovanom Proktorovom opitu, raspon maksimalne suve zapreminske težine je  $\gamma_{dmax} = 3.37 \text{ kN/m}^3 - 3.80 \text{ kN/m}^3$  a interval vlažnosti  $w_{opt} = 138\% - 162\%$ . Za četiri puta povećanu energiju zbijanja, maksimalna suva zapreminska težina se kreće u intervalu  $\gamma_{dmax} = 4.84 \text{ kN/m}^3 - 4.96 \text{ kN/m}^3$ , a optimalna vlažnost  $w_{opt} = 73\% - 111\%$ . Kao i u slučaju prethodno opisanih rezultata, i ovi rezultati pokazuju da se sa povećanjem energije zbijanja, povećava maksimalna suva zapreminska težina, a smanjuje optimalna vlažnost. Visoke vrednosti optimalne vlažnosti mogu se pripisati povećanim učešćem organske komponente [9].

Endiat i dr. (2020) određivali su karakteristike zbijanja za svež i star otpad sa aktivne deponije u Indiji. Ispitivanja su rađena sa energijom zbijanja za standardni Proktorov opit i dobijene su vrednosti za maksimalnu suhu zapreminsku težinu  $\gamma_{dmax} = 8.4 \text{ kN/m}^3 - 8.58 \text{ kN/m}^3$ , pri optimalnoj vlažnosti  $w_{opt} = 42\% - 58\%$  [2].

Analizom dosadašnjih istraživanja koja su objavljena u svetskoj literaturi, dolazimo do zaključka da su laboratorijske metode koje se koriste u mehanici tla prihvaćene i u slučaju "mehanike komunalnog otpada" [3, 6, 7]. Međutim, heterogenost materijala i druge karakteristike otpada (sastav, starost, veličina frakcija, temperaturni uslovi i dr.) značajno se razlikuju od tla, pa se standardni pristupi koji se koriste u mehanici tla mogu izmeniti kako bi se uslovi zbijanja otpada prilagodili uslovima na terenu (deponiji) [6, 7]. Iz tih razloga se sve više zagovara uvođenje nove naučne discipline "mehanike komunalnog otpada" koja se u suštini zasniva na opštim principima mehanike tla, s tim da standardizovane metode ispitivanja tla, treba inovirati, uskladiti i prilagoditi materijalima koji su zastupljeni na deponijama komunalnog otpada [10].

### 3. POSTUPAK ODREĐIVANJA PARAMETARA ZBIJANJA KORIŠĆENJEM NESTANDARDNE OPREME

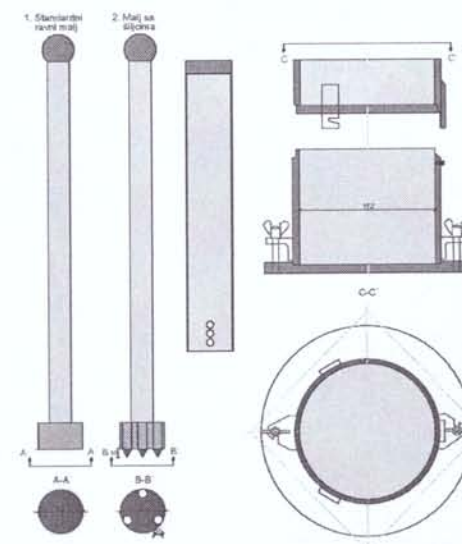
Zbijanje komunalnog otpada na deponijama predstavlja jedan od svakodnevnih procesa rada tokom njegovog odlaganja. Za samo izvođenje na terenu koristi se drugačija oprema u odnosu na onu koja se primenjuje tokom zbijanja tla. Najčešće su to kompaktori sa ježevima koji služe za zbijanje i usitnjavanje otpada (slika 4). Zbijanje se vrši u slojevima, sa nekoliko prelaza preko komunalnog otpada.



Slika 4. Kompaktor za zbijanje komunalnog otpada

Kako bi se demonstrirao rad komapktora na terenu/ deponiji u okviru ovog rada, pored standardne opreme za izvođenje Proktorovog opita, korišćena je i inovativna, nestandardna oprema koja je podrazumevala ugradnju šiljaka na ravnoj površini malja za zbijanje (slika 5). Zbijanje je izvršeno u standardizovanom Proktorovom cilindru većih dimenzija, prečnika 152 mm, koji omogućuje korišćenje frakcija prečnika 40 mm (maksimalna procentualna zastupljenost frakcija preko 40 mm, nije prelazila 20% ukupne mase materijala sa kojima su izvedeni opiti).

Osnovna uloga šiljaka jeste da sa svakim padom malja na otpad izvrše destrukciju različitih frakcija otpada mehaničkim razaranjem, odnosno izvrše usitnjavanje otpada kako bi se postigli bolji uslovi zbijanja. 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. Prilikom izvodjenja opita primenjena je energija zbijanja od  $E = 600 \text{ kJ/m}^3$  kao kod standardnog Proktorovog opita.



Slika 5. Oprema korišćena za nestandardni Proktorov opit  
Standardni ravni malj 2. Malj sa šiljcima

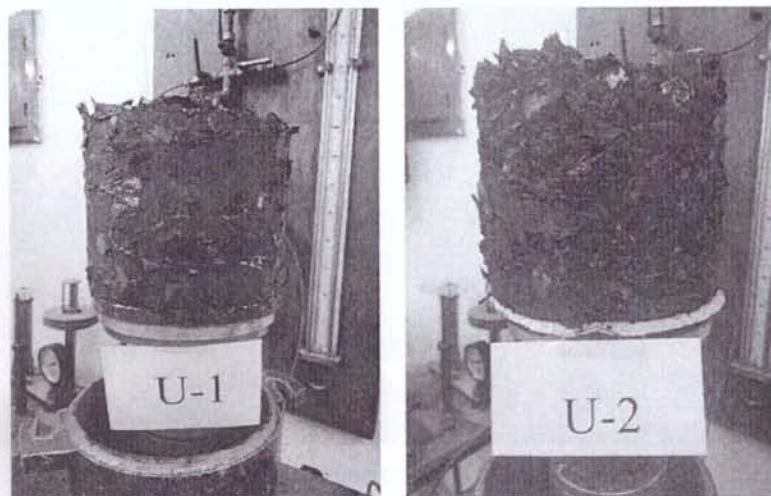
#### 4. SASTAV I PRIPREMA UZORKA

Za potrebe izvođenja laboratorijskih opita korišćen je otpad starosti oko 10 godina, koji je uzet istražnim bušenjem sa neuredene deponije u Plandištu (slika 6). Ispitivanja su urađena na prethodno razvrstanim i pripremljenim materijalima koji su iskorišćeni za formiranje dva uzorka različitog sastava (slika 8).



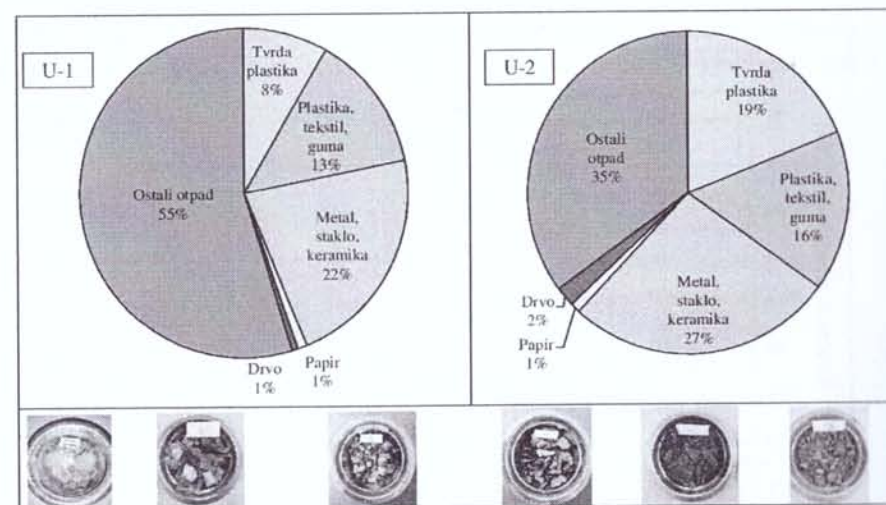
Slika 6. Izvođenje istražnog bušenja na deponiji komunalnog otpada - Plandište

Prilikom pripreme materijala vodilo se računa o preporukama koje su vezane za poštovanje odnosa dimenzija čestica u uzorku i kalupa u kom se opit izvodi.



Slika 7. Izgled uzoraka nakon izvedenog Proktorovog opita

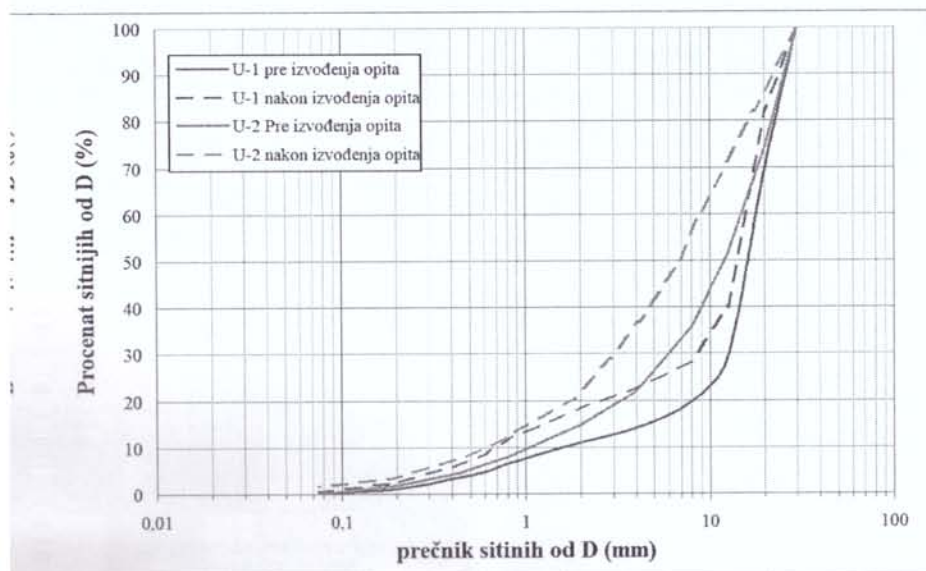
Izdvojene komponente su: tvrda plastika (flaše, posude i sl.), plastika (plastične kese, ambalaža od hrane i sl.) – tekstil - guma, metal - staklo - keramika, papir, drvo i ostali otpad (slika 8). Pod „ostalim otpadom“ podrazumeva se sav otpad koji prilikom sortiranja nije mogao da se izdvoji u neku od predhodno pomenutih grupa [12]. Karakteriše ga veliko učešće „zemljaste“ komponente, za koju se predpostavilo da će imati različito ponašanje u odnosu na veštačke materijale, a koja je često u ulozi dnevnih prekrivki na deponijama. Sastav komunalnog otpada za ispitivane uzorke prikazan je na slici 8.



Slika 8. Sastav otpada korišćenog za laboratorijske analize

Nakon sortiranja komunalnog otpada, pristupilo se pripremi uzorka koja uključuje homogenizaciju, mešanje i usitnjavanje svih komponenti [10,12]. Maksimalna veličina komponenta u uzorku je iznosila 40 mm, kako bi se dobio odgovarajući odnos granulometrijskoj sastava otpada i dimenzija kalupa u kojima je izvođen Proktorov opit. Obzirom na specifičnost materijala, usvojena je maksimalna dimenzija čestica u odnosu na prečnik kalupa 25 %.

Granulometrijske krive komunalnog otpada pre izvođenja opita i nakon zbijanja komunalnog otpada maljem sa šiljcima prikazane su na slici 9.



Slika 9. Granulometrijske krive pre i nakon izvođenja Proktorovog opita (malj sa šiljcima)

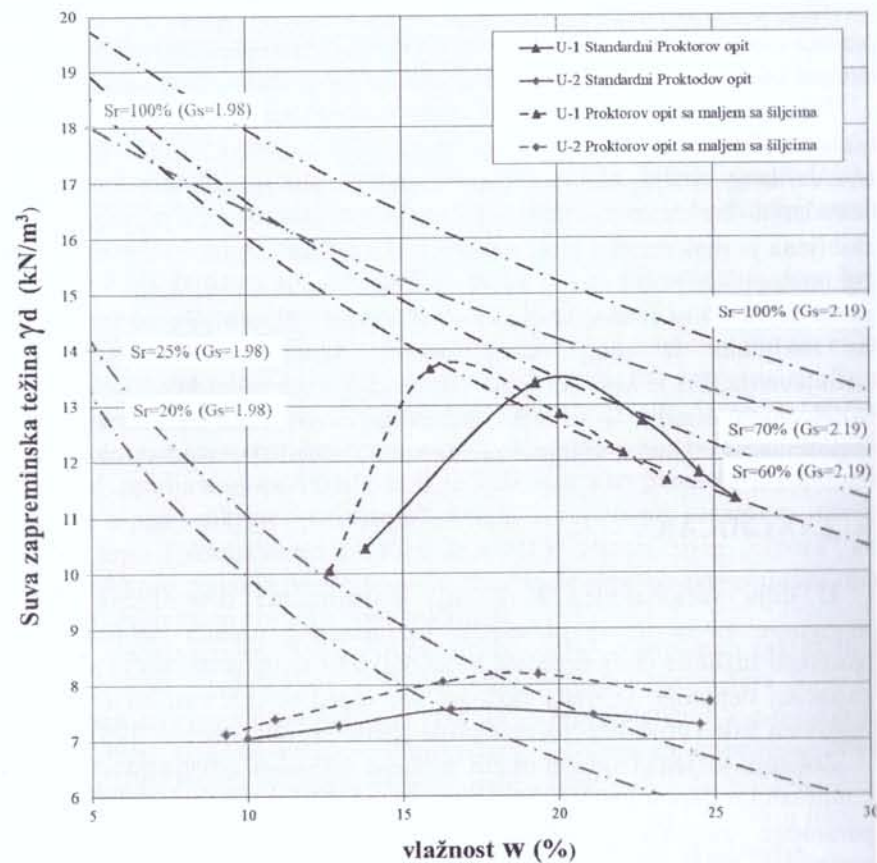
## 5. REZULTATI I DISKUSIJA

Kako bi se ukazalo na razlike u pristupu za korišćene metodologije koje su prikazane u radu, analiziran je standardni i nestandardni način izvođenja Proktorovog opita. Jedna od vidljivih razlika primene nestandardnog malja sa šiljcima, jeste promena granulometrijskog sastava otpada. Jasno se može videti da sastav otpada, tj. procentualna zastupljenost veštačkih materijala ima značajniji uticaj na usitnjavanje u odnosu na uzorak sa većim sadržajem nerazvrstanog – zemljastog otpada. Pored toga značajni efekat na usitnjavanje materijala imalo je i korišćenje modifikovane opreme – malja sa šiljcima.

Kao što su uočljive razlike u promeni granulometrijskog sastava, tako se jasno mogu uočiti i razlike vezane za definisanje parametara zbijanja (slika 10).

Na uzorku U-1, sa većim učešćem nerazvrstanog otpada (“ostali otpad”) dobijena je maksimalna suva zapreminska težina  $\gamma_{dmax}=13.39$  kN/m<sup>3</sup>, pri optimalnoj vlažnosti  $w_{opt}=19.30$  % u slučaju korišćenja standardne opreme tokom izvođenja Proktorovog opita. Kada su u pitanju rezultati dobijeni korišćenjem inovativnog malja sa šiljcima, na istom

uzorku U-1, dobijena je nešto veća vrednost maksimalne suve zapreminske težine  $\gamma_{dmax}=13.66$  kN/m<sup>3</sup> pri optimalnoj vlažnosti od  $w_{opt}=15.90$  %.



Slika 10. Prikaz rezultata istraživanja Proktorovog opita (standardni malj i malj sa šiljcima)

Sa dijagrama se uočava da su krive zbijanja sličnog oblika, 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 standardne opreme. Ovakvi rezultati su donekle i očekivani s obzirom da u sastavu uzorka U-1 pretežno dominira “ostali otpad” koji

sadrži oko 55% zemljaste komponente koja se može porediti sa tlom, pa je samim tim i maksimalna suva zapreminska težina veća nego što je to slučaj kod uzorka U-2, gde je sadržaj ove komponente dosta manji. Analizom granulometrijske krive komunalnog otpada uzorka U-1 može se utvrditi da veći sadržaj zemljastog materijala nije uticao na značajnije usitnjavanje otpada, koje bi dovelo do boljeg pakovanja različitih frakcija, a time i do povećanja suve zapreminske težine.

Na uzorku U-2 dobijena je maksimalna suva zapreminska težina  $\gamma_{dmax}=7.57 \text{ kN/m}^3$  i optimalna vlažnost  $w_{opt}=16.54 \%$  primenom standardnog malja za Proktorov opit. U slučaju nekonvencionalnog izvođenja Proktorovog opita, pomoću inovativnog malja sa šiljcima, dobijena je maksimalna suva zapreminska težina je  $\gamma_{dmax}=8.18 \text{ kN/m}^3$ , pri optimalnoj vlažnosti  $w_{opt} = 18.10 \%$ . Kod uzorka U-2 uočava se sličan oblik kriva ali sa značajno manjim zvonastim oblikom. Pored toga, može se zaključiti da zbog većeg sadržaja komponenti koje su sklone usitnjavanju, što je konstatovano i na granulometrijskoj krivi uzorka U-2, korišćenjem malja sa šiljcima dobija se nešto veća maksimalna suva zapreminska težina sa manjom promenom optimalne vlažnosti, oko 1,5%.

## 6. ZAKLJUČAK

U cilju racionalnijeg korišćenja prostora na deponijama koji u mnogome zavisi i od ponašanja komunalnog otpada neophodno je sprovesti različite laboratorijske opite, kako bi se na pravi način definisao kapacitet deponije. Iz ovog razloga, sve češće se u svetu, ali i kod nas, zagovara jedna nova naučna disciplina „geomehanika otpada“ [10].

Zbijanje je jedan od osnovnih procesa prilikom odlaganja otpada na komunalnim deponijama i zbog toga je neophodno laboratorijski odrediti parametre zbijanja (maksimalnu suhu zapreminsku težinu  $\gamma_{dmax}$ , i optimalnu vlažnost  $w_{opt}$ ), kako bi se prostor na deponiji racionalno iskoristio.

Prilikom laboratorijskih ispitivanja koristi se standardna laboratorijska oprema (Proktorov aparat). Međutim, Proktorov aparat je prvi put primenjen 1933. god. prilikom izgradnje zemljane brane, i predstavlja osnovu prema kojoj je urađen standardni aparat namenjen za definisanje uslova zbijanja tla, prilikom izgradnje zemljanih nasipa, brana i drugih nasutih objekata. Kod deponija komunalnog otpada se koristi nešto drugačija tehnologija zbijanja, tzv. kompaktori sa ježevima, a često i sa rešetkama, koji prelaze preko otpada i na taj način ih razaraju i zbijaju.

Zbog svega prethodno navedenog, pojavljuje se potreba za inovacijom postojećih standarda i opreme koja se koristi prilikom laboratorijskih ispitivanja, u ovom slučaju Proktorovog opita. Iz tih razloga su na postojeći malj dodati šiljci koji vrše destrukciju i usitnjavanje otpada i na taj način simuliraju rad kompaktora na deponijama. Pored toga, ispitivanja su urađena i korišćenjem standardnog Proktorovog aparata, čime je omogućeno poređenje rezultata obavljenih ispitivanja, na osnovu kojih su izvedeni određeni zaključci.

Ispitivanja su obavljena za dva različita sastava otpada, i to sa većim sadržajem zemljastog materijala – kategorisan kao „ostali otpad“ (U-1) i sa manjim sadržajem zemljastog materijala (U-2), pa je i sadržaj ostalih komponenti srazmerno manjan.

Rezultati Proktorovog opita ukazuju na određene promene ponašanja komunalnog otpada prilikom zbijanja korišćenjem nestandardnog – inovativnog malja sa šiljcima. Međutim, kako bi se tehnologija usavršila i doradila, neophodno je izvesti više istraživanja. Uz sve to, analizom dobijenih rezultata, naročito granulometrijskih krivih, jasno se uočava uticaj sastava na samu obradivost otpada tj. usitnjavanje prilikom zbijanja. Sadržaj zemljastog materijala koji je izdvojen kao posebna komponenta „ostali otpad“ diktira „ponašanje“ drugih komponenti u samom uzorku. Pored toga i komponenta plastike ima veliki značaj zbog „otpora“ koji daje prilikom zbijanja pomoću malja zbog male gustine-zapreminske mase i velike zapremine koju zauzima u kalupu.

Na osnovu analize dobijenih rezultata, može se uopšteno zaključiti da su primenom nove opreme, dobijeni nešto drugačiji parametara zbijenosti u odnosu na standardnu opremu, ali i da je broj izvedenih ispitivanja bio nedovoljan, da bi se došlo do eventualnog predloga za definisanje novog standarda koji bi se primenio na komunalni otpad.

Ovakav način pristupa je nov kako u domaćoj, tako i svetskoj naučnoj javnosti, i predpostavlja se da je njegov razvojni put tek pred nama.

## ZAHVALNOST

*Ovaj rad je realizovan u okviru projekta broj TR 36014 koji se finansira od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije.*

## 7. LITERATURA

- [1] Gabr M., Valero S.: *Geotechnical Properties of Municipal Solid Waste*, Geotechnical Testing Journal 18, No. 2, 1995, pp. 241-251.
- [2] Endait M., Patil S.: *Laboratory investigation of compaction characteristics of fresh and degraded municipal solid waste*, Waste Disposal & Sustainable Energy, 2020.
- [3] Hanson J.L., Yesiller N., Von Stockhausen S.A., Wong W. W.: *Compaction Characteristics of Municipal Solid Waste*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 136, No. 8., 2010, pp. 1095-1102.
- [4] Hettiarachchi C.H.: *Mechanics of Biocell landfill settlements*, Ph.D Dissertation, New Jersey Institute of Technology, Newark, NY, 2005.
- [5] Itoh T., Toehata I., Kawano Y., Kameda M., Fukvi S., Koelsch F., and Yonai, Y.: *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, 2005, pp. 2273-2276.
- [6] Janković J., Rakić D., Basarić I.: *Compaction of municipal waste*, X International Symposium on Recycling Technologies and Sustainable Development, Bor, Serbia, 2015, pp. 139-146.
- [7] Janković J., Rakić D., Basarić Ikodinović I., Đurić T., Čaki L.: *Značaj izvođenja Proktorovog opita na komunalnom otpadu*, Osmo međunarodno naučno - stručno savetovanje „Geotehnički aspekti građevinarstva“, Vrnjačka Banja, Srbija, 2019, str.439-444.
- [8] Naveen, B.P.: *Geotechnical Properties of Fresh Municipal Solid Waste Landfill in India*, 7th International Conference on "Experiments/Process/System/Modeling/Simulation /Optimization, Athens, Greece Vol. 2017.
- [9] Pulat H.F., Yukselen-Aksoy Y.: *Compaction behavior of synthetic and natural MSW samples in different compositions*, Waste Management & Research 31(12), 2013, pp.1-7.
- [10] Rakić, D. : *Konstitutivne zavisnosti komunalnog otpada sa deponija u Srbiji*. Doktorska disertacija, Rudarsko- geološki fakultet Univerziteta u Beogradu, Srbija, 2013.
- [11] Rakić D., Čorić S., Basarić I., Janković J.: *Geotehnički aspekti istraživanja i osmatranja deponija komunalnog otpada*, Građevinski kalendar, Savez građevinskih inženjera Srbije, Vol. 49, 2017, str. 196-231.
- [12] Rakić D., Basarić I., Čaki L., Čorić, S.: *Contribution to the geotechnical classification of municipal waste landfills in Serbia*, Environmental Geotechnics, Vol. 7, Issue 7, 2020, pp. 501-511.
- [13] Reddy K.P., Hettiarachch H., Naveen P., Janardhanan G., Jean B., Thomas L.: *Hydraulic Conductivity of MSW in Landfills*, Journal of Environmental Engineering 135(8), 2009, pp. 677-683.
- [14] Wong W.W.: *Investigation of the geotechnical properties of municipal solid waste as a function of placement conditions*. MSc. thesis, California Polytechnic State Univ. San Luis Obispo, USA, 2009.