

# Mjerenje suhe gustoće otpada Proctorovim pokusom

---

**Hegedušić, Andreja**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:537301>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-23**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

ANDREJA HEGEDUŠIĆ

**MJERENJE SUHE GUSTOĆE OTPADA PROCTOROVIM POKUSOM**

DIPLOMSKI RAD

VARAŽDIN, 2021.

Sazivam članove ispitnog povjerenstva  
za 15.07.2021. u 9 sa  
Obranu ovog rada kandidat će vršiti i pred  
ispitnim povjerenstvom u Varaždinu  
Varaždin, 01.07.2021.

Predsjednik  
ispitnog povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Sanja Kovač

### Članovi povjerenstva

- 1) Izv. prof. dr. sc. Igor Petrović
- 2) Izv. prof. dr. sc. Boris Kaurer
- 3) Doc. dr. sc. Manio Gazdek

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

ANDREJA HEGEDUŠIĆ

**MJERENJE SUHE GUSTOĆE OTPADA PROCTOROVIM POKUSOM**

DIPLOMSKI RAD

KANDIDAT:

Andreja Hegedušić

*Andreja Hegedušić*

MENTOR:

izv.prof.dr.sc. Igor Petrović

VARAŽDIN, 2021.



Sveučilište u Zagrebu  
Geotehnički fakultet



## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnica: ANDREJA HEGEDUŠIĆ  
Matični broj: 287 - 2019./2020.  
Smjer: GEOINŽENJERSTVO OKOLIŠA

### NASLOV DIPLOMSKOG RADA:

MJERENJE SUHE GUSTOĆE OTPADA PROCTOROVIM POKUSOM


Rad treba sadržati: 1. Uvod  
2. Opći dio  
3. Proctorov pokus  
4. Eksperimentalni dio  
5. Rezultati  
6. Zaključak

Pristupnica je dužna predati mentoru jedan uvezen primjerak diplomskog rada sa sažetkom. Vrijeme izrade diplomskog rada je od 45 do 90 dana.

Zadatak zadan: 08.03.2021.

Rok predaje: 01.07.2021.

Mentor:

  
Izv.prof.dr.sc. Igor Petrović



Predsjednik Odbora za nastavu:

  
Izv.prof.dr.sc. Sanja Kovač



## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom:

### **MJERENJE SUHE GUSTOĆE OTPADA PROCTOROVIM POKUSOM**

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom izv.prof.dr.sc. Igora Petrovića.

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 28.06.2021.

Andreja Hegedušić  
(Ime i prezime)

Andreja Hegedušić  
(Vlastoručni potpis)

## **IZJAVA MENTORA O POSTOTKU SLIČNOSTI DIPLOMSKOG RADA S VEĆ OBJAVLJENIM RADOVIMA**

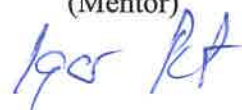
Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom:

### **MJERENJE SUHE GUSTOĆE OTPADA PROCTOROVIM POKUSOM**

pregledan anti-plagijat programskim paketom PlagScan te da postotak sličnosti cjelovitog diplomskog rada, s već objavljenim radovima, ne prelazi 20%, kao i da pojedinačni postotak sličnosti diplomskog rada sa svakom literaturnom referencom pojedinačno ne prelazi 5%.

U Varaždinu, 16. lipanj 2021.

izv.prof.dr.sc. Igor Petrović  
(Mentor)



## **Sažetak**

**Ime i prezime:** Andreja Hegedušić

**Naslov rada:** MJERENJE SUHE GUSTOĆE OTPADA PROCTOROVIM POKUSOM

U ovom radu predstavljeno je ispitivanje u Proctorovom uređaju te su izneseni dobiveni rezultati na temelju izvršenih ispitivanja. Ispitivanje je provedeno na uzorcima mehaničko – biološki (biosušenje) obrađenog miješanog komunalnog otpada koji su uzorkovani u ljetnom i zimskom periodu sa Marišćine - županijskog centra za gospodarenje otpadom. Maksimalna suha gustoća otpada koja se može postići važan je podatak za potrebe definiranja postupka ugradnje otpada u tijelo odlagališta, kao i procjenu vijeka trajanja odlagališta otpada s obzirom na njegov raspoloživi volumen.

Postoje dvije vrste Proctorovog pokusa, a to su standardni i modificirani Proctor. Za potrebe ovog rada izvršena su ispitivanja u modificiranom Proctorovom pokusu. Dobiveni rezultati usporedili su se s već otprije poznatim rezultatima zbijanja u standardnom Proctorovom pokusu dobivenima na istoj vrsti otpada.

Glavna razlika navedenih pokusa je u primijenjenoj energiji zbijanja koja je kod modificiranog Proctora znatno veća. Veća energija zbijanja u modificiranom Proctoru postiže se većom težinom bata, većem broju udaraca, većem broju slojeva i većoj visini pada bata.

Proctorovim pokusom dobiva se podatak o vlažnosti pri kojoj, u ovom slučaju otpad, ima najveću suhu gustoću. Provedeno je ispitivanje pri 20%, 40%, 60%, 80%, 100% i 120 % vlažnosti. Pokusom je utvrđeno da se za ispitivani otpad maksimalna suha gustoća od 0,79 g/cm<sup>3</sup> postiže pri optimalnoj vlažnosti od 55 %.

**Ključne riječi:** otpad, Proctor, zbijanje, vlažnost, suha gustoća



## **ABSTRACT**

**Name and surname:** Andreja Hegedušić

**Title:** MEASUREMENT OF DRY DENSITY WITH PROCTOR'S TEST

In this paper, a test in a Proctor device is presented as well as the obtained results based on the performed tests.. The test was performed on samples of mechanically - biologically (biodrying) treated mixed municipal waste that were collected in summer and winter from Mariščina, which is – a county center for waste management. The maximum dry waste density that can be achieved is an important piece of information for defining the procedure for installing waste in the body of a landfill, as well as for estimating the lifespan of a landfill regarding its volume.

There are two types of Proctor experiments and these are standard and modified Proctor. For the purposes of this paper, the tests were performed in a modified Proctor experiment. The obtained results were compared with the already known compaction results in a standard Proctor experiment and which were obtained on the same type of waste.

The main difference between these experiments lies in the applied compaction energy, which is significantly higher when a modified Proctor test is carried out. Higher compaction energy is achieved by using heavier piston weight, larger number of strokes, larger number of layers and heavier piston drop height.

Proctor's experiment provides data on humidity at which, in this case, the waste has the highest dry density. The test was performed at 20%, 40%, 60%, 80%, 100% and 120% humidity. The experiment showed that the maximum dry density of  $0.79 \text{ g/cm}^3$  for the tested waste is achieved at optimum humidity of 55%.

**Keywords:** waste, Proctor, compaction, humidity, dry density

# Sadržaj

1. Uvod .....	1
2. Opći dio .....	2
2.1. Otpad .....	2
2.1.1. Komunalni otpad.....	3
2.1.2. Svojstva komunalnog otpada .....	4
2.1.3. Gustoća .....	5
2.2. Gospodarenje otpadom.....	5
2.3. ŽCGO Mariščina .....	6
3. Proctorov pokus.....	8
3.1. Standardni Proctorov pokus .....	12
3.2. Modificirani Proctorov pokus .....	12
3.3. Izračuni, crtanje i izražavanje rezultata .....	13
4. Eksperimentalni dio .....	15
4.1. Uzorak.....	15
4.2. Način ispitivanja (modificirani Proctor) .....	18
5. Rezultati.....	27
5.1. Usporedba rezultata sa standardnim Proctorom.....	32
6. Zaključak .....	35
Zahvala .....	36
Literatura .....	37
Popis slika .....	39
Popis tablica.....	40

## 1. UVOD

Povećavanjem svijesti o zaštiti okoliša pojavile su se razne tehnike obrade otpada razvijene s ciljem smanjenja utjecaja i količine odloženog otpada u okoliš. Jedna od naširoko korištene tehnike, za već uspostavljena odlagališta koja sadrže neobrađeni komunalni otpad i nova odlagališta koja će primati mehaničko-biološki otpad, obrađen postupkom biosušenja su tzv. bioreaktorska odlagališta (Petrović i sur. 2014). Odlagalište Marišćina je jedno od takvih odlagališta s kojeg su uzeti uzorci za ovo ispitivanje.

U okviru ovog rada proveden je Proctorov pokus, točnije modificirani Proctorov pokus s uzorkom mehaničko - biološki obrađenog (MBO) miješanog komunalnog otpada te je napravljena usporedba s rezultatima iz standardnog Proctorovog pokusa provedenim na istoj vrsti uzoraka otpada. Proctorovim pokusom može se dokazati da postoji određena vlažnost, pri nekoj energiji zbijanja, koja daje najveću moguću suhu gustoću za određeni materijal koji se ispituje.

Proctorov pokus obično se izvodi za tlo, tj. zemljane materijale. Kada govorimo o izgradnji prometnica, nasipa, mostova, željeznica, brana ili bilo kojih drugih građevinskih objekata, jedan od najvažnijih laboratorijskih postupaka kojim ćemo dobiti relevantne parametre o načinima i svojstvima zbijanja tla pri različitim vlažnostima je Proctorov pokus. U ovom radu materijal koji se zbijao nije bilo tlo već otpad. Koristili smo MBO miješani komunalni otpad da bi odredili njegovu najveću suhu gustoću tj. vlažnost pri kojoj ta gustoća nastupa. Ovaj podatak bitan je operateru odlagališta kako bi mogao definirati optimalni postupak ugradnje otpada u tijelo odlagališta kako bi se postigla što veća zbijenost ugrađenog otpada, odnosno uštedio raspoloživi volumen odlagališta i produžio vijek trajanja odlagališta.

## 2. OPĆI DIO

### 2.1. OTPAD

Otpad znači da je nešto odbačeno, to je nešto što trenutnom vlasniku nije korisno, ali to želi odložiti ili zbrinuti na za to predviđena mjesta, odnosno prodati, ako je prerada otpada moguća. Pod otpadom se smatraju svi materijalni ostaci sirovina, poluproizvoda i proizvoda koji su za posjednika suvišni i beskorisni, ali koji još uvijek imaju određenu uporabnu vrijednost i teorijski i praktično se još mogu upotrijebiti (Herceg, 2013).

Otpad nastaje kao rezultat raznih ljudskih aktivnosti: u domaćinstvima, u raznim gospodarskim djelatnostima (poljoprivreda, turizam, promet i dr.) te posebno u industriji. Otpad je moguće podijeliti prema: mjestu nastanka i opasnosti po ljudsko zdravlje i okoliš.

Prema mjestu nastanka, otpad se dijeli na (Herceg, 2013):

- Komunalni otpad
- Tehnološki otpad
- Otpad biljnog i životinjskog porijekla
- Otpad mineralnog porijekla
- Otpad iz kemijskih procesa
- Radioaktivni otpad
- Otpad iz naselja

Prema značajkama po zdravlje ljudi i okoliša, otpad se dijeli na (Herceg, 2013):

- Inertni otpad – nije podložan fizičkim, kemijskim ili biološkim promjenama, ne ugrožava okoliš
- Opasni otpad – sadrži neke od sljedećih značajki: eksplozivnost, toksičnost, kancerogenost, korozivnost, zapaljivost i dr.

- Neopasni otpad – nema neku od značajki opasnog otpada, to je otpad iz poljodjelske, vrtlarske, lovačke, ribarske i primarne proizvodnje, vodenih kultura, pripremanja hrane i pića

### 2.1.1. Komunalni otpad

Komunalni otpad je prema definiciji, otpad koji je nastao u kućanstvu i otpad koji je po prirodi te sastavu sličan otpadu iz kućanstva. U komunalni otpad ne spada proizvodni otpad i otpad iz poljoprivrede i šumarstva. Uključuje krute ili polukrute materijale koje posjednik odbaci. Zakonom o održivom gospodarenjem otpadom (NN 94/13) određeno je kako gradovi i općine, odnosno jedinice lokalne samouprave, moraju osigurati provođenje gospodarenja komunalnim otpadom i svim propisanim mjerama.

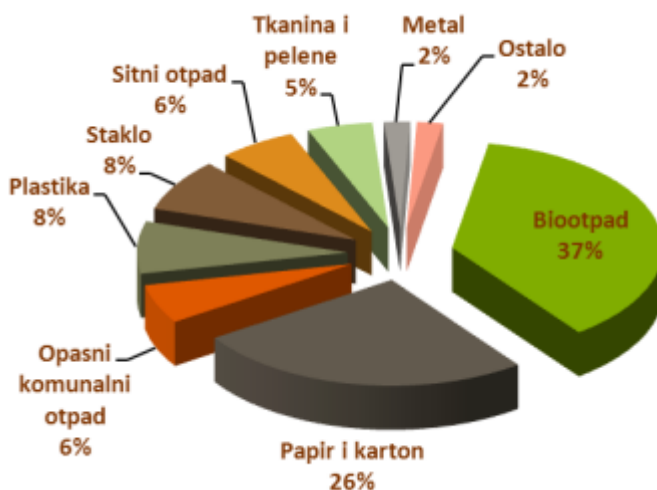
Komunalni se otpad označava brojevima kako bi se lakše razlikovao njegov sastav i to u katalogu otpada. Ključni broj za komunalni otpad je broj 20, a za nesortirani kućanski otpad, koji uglavnom i čini najveći dio komunalnog otpada, koristi se ključni broj 20 03 01 – miješani komunalni otpad. Međutim, otpad koji se koristio za potrebe ovog rada je obrađeni miješani komunalni otpad, obrađen je mehaničko – biološkom obradom te je ključni broj takvog otpada 19 12 12.

Vrste komunalnog otpada koje sadrže opasna svojstva u Katalogu otpada označene su oznakom „\*“ (zvjezdicom). Gospodarenje komunalnim otpadom u Republici Hrvatskoj uređeno je zakonodavnim okvirom koji je gotovo u cijelosti usklađen s europskom regulativom (Anić Vučinić, 2016).

Sastav sakupljenog komunalnog otpada ovisi o različitim čimbenicima kao npr. o tipu naselja, dostignutoj razini komunalne infrastrukture, standardu stanovništva, odnosno stupnju ekonomskog razvoja društva i slično.

Miješani komunalni otpad, kao što je vidljivo i na slici 1, redom čini (Anić Vučinić, 2016):

- biootpad (~ 37%),
- papir i karton (~ 26%),
- opasni komunalni otpad (~ 6%),
- plastika (~ 8%),
- staklo (~ 8%),
- sitni otpad (~ 6%),
- tkanina i pelene (~ 5%),
- metal (~ 2%) te
- ostalo (~ 2%).



Slika 1 - Sastav i udjeli (%) komponenata u miješanom komunalnom otpadu (Anić Vučinić, 2016)

### 2.1.2. Svojstva komunalnog otpada

Komunalni otpad je heterogen, male gustoće ( $0,1 - 0,2 \text{ g/cm}^3$ ), vlažnosti u prosjeku 20 – 40% i sa značajnom ogrjevnom vrijednosti (4 do 12 MJ/kg), najčešće 7,5 do 8,5 MJ/kg što je ekvivalentno 0,25 kg nafte, 1 kg lignita ili 0,5 kWh el. energije.

Tijekom prijevoza, ovisno o vrsti vozila, gustoća otpada iznosi 0,2 do 0,5  $\text{g/cm}^3$ , a zbijanjem se postiže gustoća od 0,4 do 0,9, pa i do 1,1  $\text{g/cm}^3$ . Veliki udio biološkog

otpada, vlažnost i poroznost omogućuju otpadu razvoj bakterija koje počinju njegovu razgradnju, a produkti razgradnje su plinovi i procjedne vode (Anić Vučinić, 2016).

### 2.1.3. Gustoća

Gustoća je masa materijala po jedinici volumena  $\text{g/cm}^3$ ,  $\text{kg/m}^3$  ili  $\text{t/m}^3$ . Potrebno ju je određivati na dovoljno velikom uzorku. Gustoća otpada ovisi o geografskoj lokaciji, godišnjem dobu i vremenu manipulacije (Perić, 2020).

Matematički izraz dan je sljedećom jednadžbom [1]:

$$\rho = \frac{m}{V} \left[ \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}, \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \frac{\text{t}}{\text{m}^3} \right] \quad [1]$$

gdje je:

$\rho$  – gustoća [ $\text{g/cm}^3$ ]

$m$  – masa uzorka [g]

$V$  – volumen uzorka [ $\text{cm}^3$ ]

## 2.2. GOSPODARENJE OTPADOM

Najvažniji zadatak gospodarenja otpadom je sprječavanje nastanka samog otpada. Drugi važni zadaci su i smanjivanje nastajanja velikih količina otpadnog materijala, sprječavanje štetnosti utjecaja tog otpada na okoliš i prirodu te oporaba, sakupljanje, prijevoz, zbrinjavanje i druge slične aktivnosti s otpadom. Također je važno i nadziranje tih navedenih djelatnosti te provjeravanje odlagališta koja su zatvorena.

Samo gospodarenje ne smije dovesti u opasnost zdravlje ljudi i životinja te se ne smiju koristiti postupci i zahvati koji bi mogli štetno djelovati na okoliš i prirodu. Mora se osigurati izbjegavanje rizika onečišćenja osnovnih sastavnica okoliša, a to su voda, tlo, more i zrak. Gospodarenje otpadom mora biti takvo da nema neugodnih

mirisa, nema pojave buke, nije štetno za područja estetskih, prirodnih i kulturno-povijesnih vrijednosti te ni u kojem slučaju ne smije doći do eksplozije i požara.

Postoji nekoliko ciljeva za gospodarenje otpadom (<https://www.fzoeu.hr/hr/gospodarenje-otpadom/1345>):

- smanjivanje i izbjegavanje nastajanja otpada te opasnih svojstava otpada, i to posebice sljedećim načinima:
  - – tehničkim razvojem i promoviranjem proizvoda koji ne pridonose ili, u najmanjoj mogućoj mjeri pridonose, povećanju štetnog utjecaja otpada i opasnosti onečišćenja,
    - razvojem čistih tehnologija koje koriste manje prirodnih izvora,
    - razvojem odgovarajućih metoda zbrinjavanja opasnih tvari sadržanih u otpadu namijenjenom uporabi,
- prije samog odlaganja otpada na odlagalište, otpad koji se može mora se reciklirati, ponovno upotrijebiti ili iskoristiti u energetske svrhe, tj. glavni cilj je da što manje otpada bude odloženo na samom odlagalištu
- otpad se mora zbrinuti na način koji je za to propisan,
- mora se izvršiti sanacija u onečišćenom okolišu

### 2.3. ŽCGO MARIŠĆINA

Za ispitivanje suhe gustoće Proctorovim pokusom, uzet je uzorak bioosušenog i mehanički obrađenog otpada s odlagališta Marišćina. Kapacitet odlagališta je 100.000 t/god. (Šarc i sur., 2018).

Marišćina, županijski centar za gospodarenje otpadom, središnji je dio integralnog sustava za gospodarenja otpadom koje se nalazi u Primorsko-goranskoj županiji.

Zaprimanje otpada obavlja se na vratima centra pomoću elektroničke vage, gdje se bilježi datum i vrijeme dolaska vozila, naziv i adresa tvrtke koja dostavlja otpad,



registracija vozila, telefonski broj i težina vozila. Nakon zaprimanja otpada, kamioni s miješanim komunalnim otpadom usmjeravaju se do prihvatne jame. Slijedi obrada prije biološke obrade i ona uključuje usitnjavanje primljenog otpada prije biološke obrade. Otpad se u drobilici usitnjava do 200 mm te usitnjeni otpad pada u privremeni bunker (Šarc i sur., 2018).

Ciljevi postrojenja za biološku obradu otpada (biosušenje):

- Stabilizacija i higijenizacija organskih tvari (uklanjanje neugodnog mirisa)
- Uklanjanje vode
- Povećanje kalorijske vrijednosti otpada

Navedeno postrojenje za biosušenje u Marišćini koristi dvanaest bioreaktora. Kad je biološko sušenje završeno, bioosušeni materijal svakog bioreaktora odlazi na valjkasti transporter koji je opremljen lijevkom za utovar. Na valjkastom transporteru dozira se otpad koji odlazi u odjeljak za daljnju mehaničku obradu.

U mehaničkom dijelu koristi se niz uređaja / strojeva za razdvajanje različitih frakcija otpada koji ulazi, kao što su otpadno gorivo, metali, plastika, teška frakcija i takozvana metanogena frakcija, pogodna za proizvodnju bioplina.

Osušeni miješani čvrsti komunalni otpad, koji je prošao postupak mehaničko biološke obrade u postrojenju, odlaže se u središte na odlagalištu predviđenom za odlaganje metanogene frakcije, tzv. bioreaktorsko odlagalište. U stabiliziranom obliku, ta se frakcija ugrađuje u tijelo bioreaktorskog odlagališta. Nakon što se odlagalište napuni i zatvori, u tijelo odlagališta se dodaje voda koja se recirkulira kako bi se ubrzala razgradnja metanogene frakcije i proizvodnja bioplina (Šarc i sur., 2018).

### 3. PROCTOROV POKUS

Pokus se temelji na određivanju zbijenosti i to u određenim uvjetima. Proctor je 1933. godine svojim istraživanjem uočio da zbijenost ovisi o dva faktora, o vlažnosti materijala i energiji zbijanja. Osim ta dva najvažnija faktora, shvatio je i da postoji točno određena vlažnost, pri nekoj energiji zbijanja, koja daje maksimalnu suhu gustoću materijala. To je također i najveća zbijenost. Tu je vlažnost Proctor nazvao „optimalna vlažnost“ -  $w_{opt}$ .

Suha gustoća otpada je mjera zbijenosti otpada te je ona ovisna o porozitetu. To je omjer mase čvrstih čestica otpada po jedinici volumena otpada. Ovisi o vrsti otpada, mjestu uzorkovanja i starosti otpada.

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} \left[ \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}, \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \frac{\text{t}}{\text{m}^3} \right] \quad [2]$$

gdje je:

$\rho_d$  – suha gustoća [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]

$m_s$  – masa suhog uzorka [g]

$V$  – volumen uzorka [ $\text{cm}^3$ ]

Predložio je uređaj (slika 2) za ispitivanje utjecaja tih dvaju parametara. Trebao je odrediti koja je to standardna energija zbijanja te je za tu energiju odabrao onu koju su početkom dvadesetog stoljeća građevinski valjci mogli prenijeti na tlo. Tom dobivenom energijom nastao je standardni Proctorov pokus.

Kasnijim razvojem tehnologije i industrije povećao se i broj strojeva za zbijanje i ugradnju na terenu i za tu moderniju tehnologiju uveden je modificirani Proctorov pokus. Uvelo ga je američko udruženje za ceste (AASHTO) 1950. godine, najviše za izgradnju autocesta. U tom pokusu, energija zbijanja povećana je približno 4,5 puta u odnosu na onu za standardni pokus. Za ovaj pokus nisu potrebni neporemećeni uzorci materijala koji se ispituje (Roje-Bonacci, 2012).

Za potrebe ovog rada, Proctorov pokus se izvodio po Europskoj normi, točnije – EN 13286-2. Tim se europskim standardom utvrđuju ispitne metode za određivanje odnosa između sadržaja vode i suhe gustoće hidraulički vezanih ili nevezanih smjesa nakon zbivanja pod određenim ispitnim uvjetima pomoću Proctorovog pokusa.



*Slika 2 Proctorov uređaj*

Zbivanje uzorka provodi se u cilindričnom ispitnom kalupu, čije su dimenzije u funkciji veličine čestica uzorka. Način pripreme uzoraka za ta ispitivanja i potrebna količina materijala ovise o veličini najvećih čestica. Za ispitivanje zbivanja pripremaju se zasebne serije uzoraka s različitim sadržajem vode. Svaka se serija zbija samo jednom (EN 13286-2).

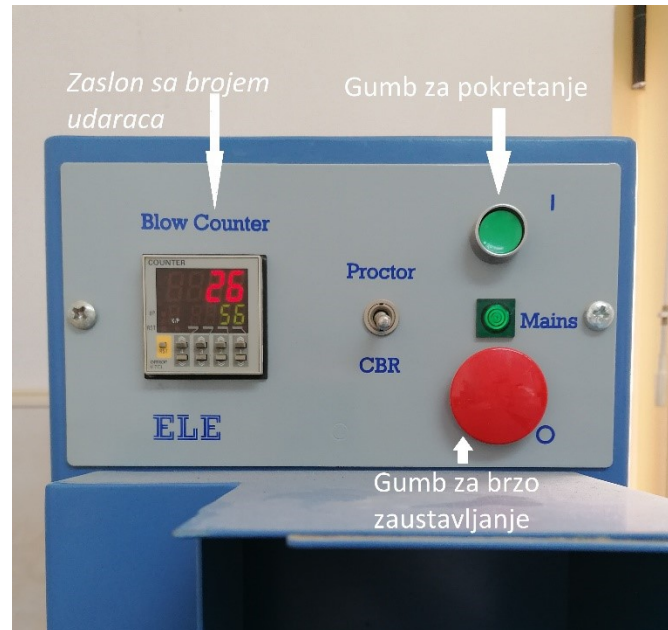
Tablica 1 Sažetak standardnog i modificiranog Proctorovog testa (EN 13286-2)

Vrsta testa	Karakteristike testa	Simbol	Dimenzija	Cilindar		
				A	B	C
<b>Standardni</b>	Masa bata	$m_b$	kg	2,5	2,5	15,0
<b>Proctor test</b>	Promjer bata	$d_b$	mm	50	50	125,0
	Visina pada	$h$	mm	305	305	600
	Broj slojeva			3	3	3
	Broj udaraca po sloju	$N$		25	56	22
<b>Modificirani</b>	Masa bata	$m_b$	kg	4,5	4,5	15,0
<b>Proctor test</b>	Promjer bata	$d_b$	mm	50	50	125,0
	Visina pada	$h$	mm	457	457	600
	Broj slojeva			5	5	3
	Broj udaraca po sloju	$N$		25	56	98

Prema navedenoj normi, postoje 3 vrste (veliĉine) cilindra, A, B i C. Osnovna razlika izmeĊu te tri vrste je u njihovim dimenzijama. Cilindar A je najmanji, zatim slijedi cilindar B koji se najĉešće koristi te najveći cilindar C. Za cilindar C je potrebno jako puno materijala te se on rijetko koristi. U tablici 2 prikazane su dimenzije navedenih cilindra. U ovom ispitivanju koristio se cilindar B. Koristila su se dva cilindra koji su proizvoljno oznaĉeni kao cilindar B i C2.

Tablica 2 Dimenzije cilindra za Proctorov uređaj

VRSTA CILINDRA	PROMJER $d_1$	VISINA $h_1$
<b>A</b>	100,0 ± 1,0 mm	120,0 ± 1,0 mm
<b>B</b>	150,0 ± 1,0 mm	120,0 ± 1,0 mm
<b>C</b>	250,0 ± 1,0 mm	200,0 ± 1,0 mm



Slika 3 Kontrolna ploča na Proctorovom uređaju

Osnovna razlika između standardnog i modificiranog Proctorovog pokusa je u energiji zbijanja ( $E$ ) koja se računa prema sljedećem izrazu [3]:

$$E = \frac{N \times h \times w}{V} \quad [3]$$

Gdje je (Kalinski, 2006):

$E$  – energija zbijanja [kJ/m<sup>3</sup>]

$N$  – ukupan broj udaraca bata [1]

$h$  – visina pada bata [m]

$w$  – težina bata [kN]

$V$  – volumen cilindra za zbijanje [m<sup>3</sup>]

### 3.1. STANDARDNI PROCTOROV POKUS

Laboratorijska referentna suha gustoća uzorka određuje se na osnovi odnosa suhe gustoće i sadržaja vode dobivena Proctorovim testom sa specifičnom energijom zbijanja koja približno iznosi  $0,6 \text{ MJ/m}^3$ .

Za standardni Proctorov pokus koristi se bat mase  $2,5 \text{ kg}$ , promjera  $50 \text{ mm}$  koji pada s visine od  $305 \text{ mm}$ . Ispitivanje se odvija u 3 sloja u određenom cilindru. Cilindar je potrebno izvagati s pričvršćenom osnovnom pločom te ako nije poznato potrebno je izmjeriti dimenzije cilindra.

Za jedan od pripremljenih uzoraka, količina vlažne smjese stavlja se u cilindar tako da kada se zbijе zauzima malo više od jedne trećine visine tijela cilindra. Nanosi se 25 udaraca. Jedna od metoda kojom se osigurava ravnomjerno nanošenje udaraca na površinu sloja jest nanošenje tri serije od osam udaraca dobro raspoređenih po površini, s posljednjim udarcem u sredini. Ponoviti postupak dva puta, tako da je upotrijebljena količina smjese dovoljna za punjenje cilindra. Prije nasipavanja trećeg sloja na cilindar se navojem pričvrsti pripadajući nastavak i uzorak se nasipa do vrha nastavka. Nastavak se ukloni i zbijena smjesa se poravna s visinom cilindra te se važe. Smjesa se iz cilindra izvadi i stavlja na metalni pladanj za određivanje sadržaja vode ( $w$ ).

Ispitivanje zbijanjem se provodi na svakom od ostalih pripremljenih uzoraka kako je prethodno opisano, da bi se dobilo ukupno pet mjerenja ili najmanje tri mjerenja, ako je uzorak dobro poznat tj. ako znamo sve bitne informacije o uzorku koje su nam potrebne za ispitivanje (gustoća, masa, vlažnost, granulometrijski sastav i sl.).

### 3.2. MODIFICIRANI PROCTOROV POKUS

Laboratorijska referentna suha gustoća uzorka određena se na osnovi odnosa suhe gustoće i sadržaja vode dobivena Proctorovim testom sa specifičnom energijom zbijanja koja iznosi približno  $2,7 \text{ MJ/m}^3$ .

Modificirani Proctorov pokus izvodi se sa batom mase 4,5 kg, s visinom pada od 457 mm te se broj zbijenih slojeva povećava s tri na pet slojeva. Cilindar se s pričvršćenom osnovnom pločom važe te ako dimenzije cilindra nisu poznate, one se moraju izmjeriti.

Za jedan od pripremljenih uzoraka stavlja se količina vlažne smjese u kalup tako da kad se zbije zauzima malo više od petine visine tijela cilindra. Nanosi se 25 udaraca koji moraju biti ravnomjerno nanoseni i mora se osigurati da bat uvijek slobodno pada. Postupak se ponavlja četiri puta, tako da je upotrijebljena količina smjese dovoljna za punjenje tijela cilindra. Prije nasipavanja trećeg sloja materijala, na cilindar je potrebno dodati nastavak.

Potrebno je kontrolirati ukupan volumen zbijene smjese, budući da je utvrđeno da ako je količina uklonjene smjese nakon uklanjanja smjese prevelika, rezultati ispitivanja bit će netočni. Smjesa se mora poravnati s rubom cilindra te se opet izvaže i izvadi iz cilindra te premješta na metalni pladanj s kojim ide na sušenje radi utvrđivanja sadržaja vode ( $w$ ).

Ispitivanje zbijanjem izvršava se na svakom od ostalih pripremljenih uzoraka, kako bi se dobilo ukupno (najmanje) pet određivanja ili barem tri određivanja ako je smjesa dobro poznata tj. ako znamo sve bitne informacije o uzorku koje su nam potrebne za ispitivanje (gustoća, masa, vlažnost, granulometrijski sastav i sl.).

### 3.3. IZRAČUNI, CRTANJE I IZRAŽAVANJE REZULTATA

Prije početka ispitivanja potrebno je izračunati volumen cilindra [4]. Volumen cilindra se izračunava tako da se izmjere sve potrebne dimenzije (visina i promjer).

$$V = \frac{D^2 \times \pi}{4} \cdot h \text{ [cm}^3\text{]} \quad [4]$$

Masa uzorka [5] se dobije tako da se izvaže masa praznog cilindra i masa cilindra s uzorkom te se te dvije mase oduzmu.

$$m_{uz} = m_{cl+uz} - m_{cil} \text{ [g]} \quad [5]$$

Gustoća [6] se dobiva iz mjera mase uzorka i volumena cilindra.

$$\rho = \frac{m_{uz}}{V_{cl}} \left[ \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right] \quad [6]$$

Vlažnost [7]:

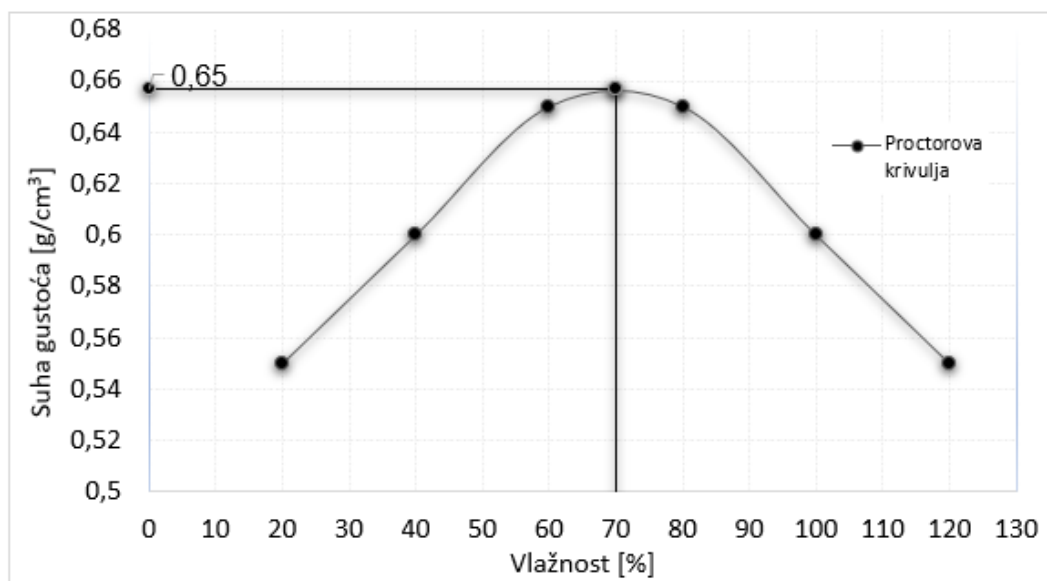
$$w = \frac{m_w}{m_s} \quad [7]$$

Suha gustoća [8]:

$$\rho_d = \frac{\rho}{1+w} \left[ \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right] \quad [8]$$

Prikaz rezultata:

Rezultati dobiveni Proctorovim pokusom prikazuju se grafički. Na ordinati se prikazuju vrijednosti suhe gustoće dok se na apscisi prikazuju vrijednosti vlažnosti. Primjer takvog grafa prikazan je na slici 4. Podaci prikazani na grafu uzeti su proizvoljno kako bi se prikazao uobičajeni „zvonoliki“ oblik krivulje. Ovakvim grafičkim prikazom vidljivo je gdje se nalazi maksimalna suha gustoća uzorkovanog materijala i koja je njegova vlažnost, tj. optimalna vlažnost uzorka (Nonweiller, 1979).



Slika 4 Grafički prikaz krivulje Proctorovog pokusa



## 4. EKSPERIMENTALNI DIO

Vidljivo iz samog naslova rada, mjerili smo suhu gustoću otpada Proctorovim pokusom. U daljnjem tekstu opisan je postupak modificiranog Proctora te je dana usporedba sa rezultatima utvrđenima standardnim Proctorom koji su utvrđeni ranije.

Proctorov pokus najčešće se koristi za zbijanje i ispitivanje tala te su sve norme i svi standardi vezani za tlo, međutim isti postupak se može primijeniti i na otpad što smo ovim putem i dokazali.

### 4.1. UZORAK

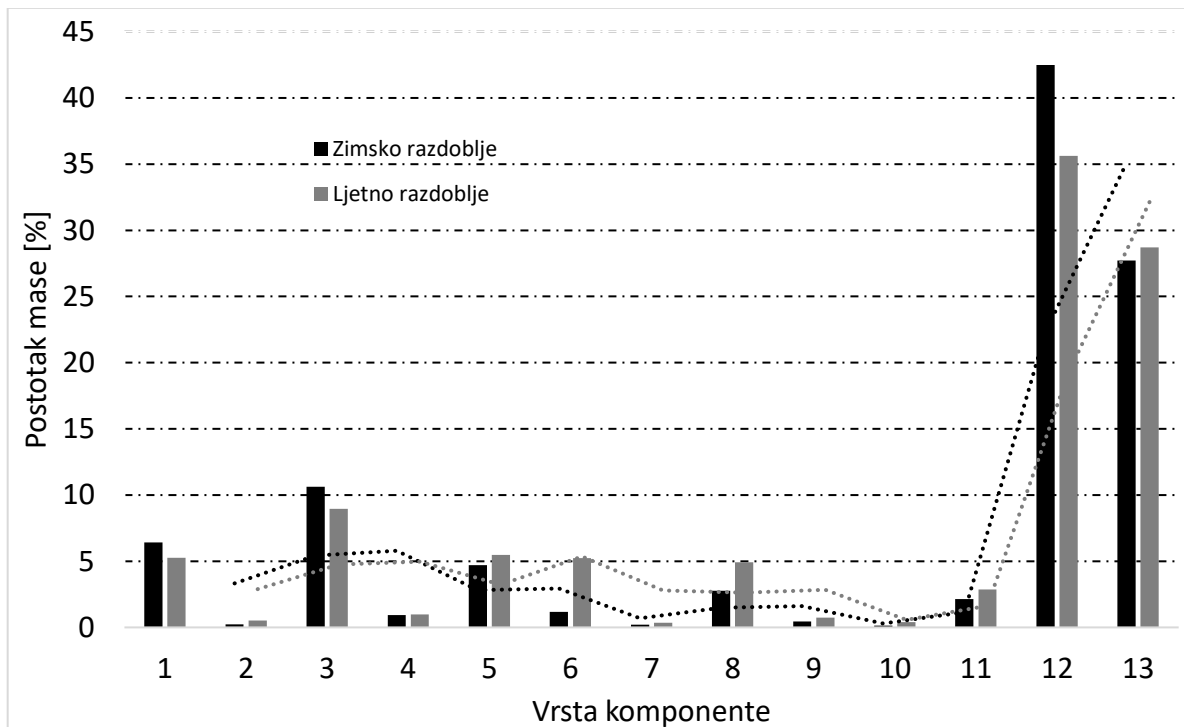
Za oba ispitivanja (standardni i modificirani Proctor) koristio se uzorak otpada sa županijskog centra za gospodarenje otpadom Marišćina. Razlika u uzorcima je ta da se za standardni Proctor koristio uzorak uzet u zimskom periodu dok se za modificirani Proctor uzeo uzorak u ljetnom periodu. Sastav oba otpada, u postocima, prikazan je u tablici 3.

*Tablica 3 Postotci masa sastava za metanogeni udio biosušenog otpada za zimsko i ljetno razdoblje (Kaniški i sur., 2020)*

<i>Broj komponente</i>	<i>Komponenta</i>	<i>Postotak mase [%] Zimsko razdoblje</i>	<i>Postotak mase [%] Ljetno razdoblje</i>
1	Plastika	6,43	5,25
2	Tekstil	0,22	0,53
3	Staklo	10,62	8,96
4	Metali	0,94	0,97
5	Papir/karton	4,71	5,47
6	Drvo	1,18	5,23
7	Kosti/koža	0,20	0,35
8	Stijene	2,76	4,92

9	Keramika	0,46	0,75
10	Guma	0,13	0,39
11	Kuhinjski otpad	2,15	2,87
12	Neidentificirano >2 mm	42,48	35,62
13	Neidentificirano <2 mm	27,72	28,7

Iz tablice 3 može se uočiti da su maseni udjeli pojedinih komponenata otpada iz zimskog i ljetnog perioda uglavnom podjednaki. Jedino veće odstupanje utvrđeno je kod drvene komponente. U zimskom periodu postotak drva bio je znatno manji nego u ljetnom uzorku. Na temelju podataka izrađen je grafički prikaz (slika 5) na kojem se vidi da crta trenda relativno dobro prati sve komponente osim drva.



*Slika 5 Grafički prikaz postotaka masa otpada za zimski i ljetni period*

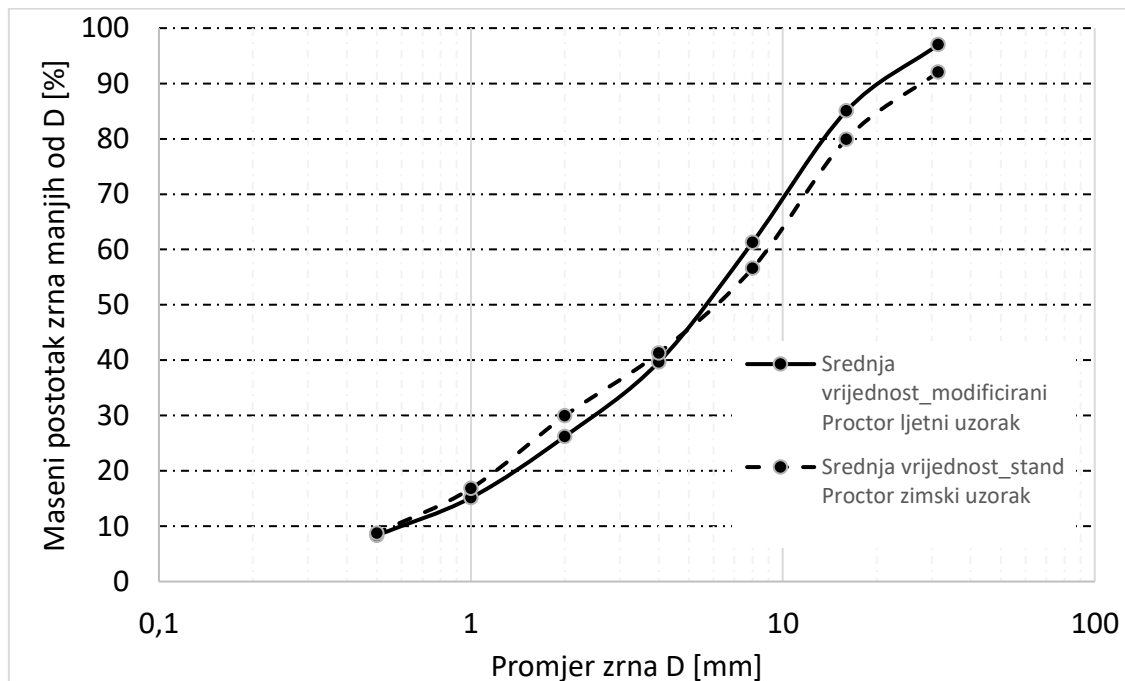
Navedeni sastav otpada dobiven je metodom četvrtanja. Otprilike 30 000 grama otpadnog materijala miješalo se i zatim podijelilo na četiri jednaka dijela. Dva dijagonalna dijela se uklanjaju i postupak se ponavljao dok se nije dobilo oko 1000

g reprezentativnog uzorka otpadnog materijala. Dobiveni uzorak je ručno sortiran i vagan kako bi se odredio navedeni sastav.

Bitna komponenta kod uzoraka je i sadržaj organske tvari koja se odredila na način da se pripremio reprezentativan uzorak od 50 g prema utvrđenim masenim postocima (tablica 3) pojedine vrste otpada. Takav uzorak stavljen je u keramičku posudu i spaljen u peći na 440°C. Dobiveno je da je udio organske tvari u uzorku uzetom u zimskom periodu 51,62 % dok je udio organske tvari u uzorku iz ljetnog perioda 55,62 % (Kaniški i sur., 2020).

Utvrđena je specifična gustoća čvrstih čestica otpada  $\rho_s$ , metodom plinskog piknometra. Gustoća zimskog uzorka iznosila je 1,88 g/cm<sup>3</sup>, dok je za ljetni uzorak iznosila 2,08 g/cm<sup>3</sup>. Dobivena razlika u gustoći uzoraka je zbog heterogenosti ispitano materijala. Heterogenost je stupanj u kojem je jedan sastojak neravnomjerno raspoređen u otpadu koji će se uzorkovati (MINGOR, 2005).

Za ove uzorke proveo se i postupak analize veličina čestica, tj. granulometrijski sastav. Analiza je provedena pomoću niza sita otvora 31,5, 16, 8, 4, 2, 1 i 0,5 mm (Kaniški i sur., 2020).



Slika 6 Granulometrijski sastav otpada

Iz grafa prikazanog na slici 6 može se vidjeti da krivulje dobro prate jedna drugu odnosno da je granulometrijski sastav otpada iz oba razdoblja (zimsko i ljetno) vrlo sličan.

#### 4.2. NAČIN ISPITIVANJA (MODIFICIRANI PROCTOR)

Prvi korak, prije samog pokusa, je određivanje postotka vlage koja će se ispitivati. Kako smo imali gotove rezultate za standardni Proctor s postocima vlage od 20, 40, 60, 80, 100 i 120% odlučeno je da će se i u modificiranom Proctoru ispitati uzorci pri istom postotku vlage kako bi dobili što bolju usporedbu rezultata na kraju izvođenja pokusa. Pri svakoj vlažnosti ispitana su po dva uzorka kako bi se utvrdila ponovljivost rezultata pokusa, odnosno utjecaj nehomogenosti uzorka na rasap rezultata.

Navedeni postoci vlage odabrani su proizvoljno vođenjem iskustvom ranije ispitivanih sličnih uzoraka otpada. Postotak vlažnosti bitan nam je kako bi izračunali suhu gustoću.

Kao što je ranije u radu navedeno, modificirani Proctor izvodi se pri energiji od 2,7 MJ/m<sup>3</sup>, batom mase 4,5 kg, s visine pada od 457 mm u pet slojeva.

Uzorke otpada (uzorkovan u srpnju 2020.) najprije smo stavljali na sušenje (slika 7) u sušionik na 60°C na 24 sata kako bi dobili potpuno suh uzorak. Nakon toga uzorak je spreman za vlaženje određenim postotkom vlage za ispitivanje u Proctoru.



*Slika 7 Stavljanje uzoraka na sušenje u sušionik*

Samo ispitivanje je trajalo 4 tjedna, od 29.03.2021. do 27.04.2021. zbog velike količine otpada koja je potrebna za svako ispitivanje te zbog sušenja svakog uzorka 24 sata.

*Tablica 4 Prikaz masa otpada i masa vode korištenih u ispitivanju*

<b>VLAGA</b>	<b>MASA OTPADA</b>	<b>MASA VODE</b>
<b>20 %</b>	4000 g	800 g
<b>40 %</b>	4000 g	1600 g
<b>60 %</b>	5000 g	3000 g
<b>80 %</b>	5000 g	4000 g
<b>100 %</b>	5500 g	5500 g
<b>120 %</b>	5318 g	6381 g

U tablici 4 prikazana je masa suhog otpada koja je bila potrebna za određeni postotak vlage, tu masu smo proizvoljno odredili na temelju iskustva prethodno provedenog standardnog Proctorovog pokusa. Masu vode smo izračunali pomoću poznatih podataka, pomoću izraza [9]:

$$w = \frac{m_w}{m_s} \quad [9]$$

Gdje je:

$w$  – vlažnost

$m_w$  – masa vode [g]

$m_s$  – masa čvrstih čestica [g]

Uređaji i oprema za izvođenje pokusa:

- Proctor uređaj
- Cilindar (B i C2) + nastavak za cilindar
- Lopatica za uzimanje uzorka i miješanje
- Laboratorijska vaga
- Metalne posude u kojima se uzorak suši
- Posuda za vodu
- Posuda za uzorak
- Nož (za poravnavanje uzorka)
- Dizalica (pomoć pri izvlačenju uzorka iz cilindra)
- Rukavice

Nakon što smo odredili kolika će nam masa uzorka i masa vode biti potrebna za pripremu uzorka ciljane vlažnosti, tu količinu vode promiješali smo s uzorkom (slika 8) i ostavili poklopljeno do drugog dana da bi se voda ravnomjerno rasporedila. Prije korištenja navlaženog uzorka, on se mora još jednom dobro promiješati zbog mogućnosti da se voda procijedila na dno posude.



*Slika 8 Miješanje suhog uzorka s vodom*

Uzorke za svaki postotak vlage pripremali smo na isti način. Tako pripremljeni uzorci spremni su za ispitivanje u Proctor uređaju.

Sljedeći korak je priprema uređaja. Na kontrolnoj ploči (slika 3) postavi se broj udaraca koji je potreban za određenu vrstu Proctora, u našem slučaju namjestili smo na 52 udaraca. Nakon svakog sloja broj udaraca se resetira. Koristili smo dva cilindra B, prethodno opisanog u radu prema Europskoj normi, proizvoljnih naziva (oznaka) B i C2 poznatih dimenzija i volumena. Određeni cilindar sa svojim postoljem pričvrsti se vijcima na uređaj te je spreman za punjenje (slika 9). Cilindar u svojoj unutrašnjosti ima oznake za slojeve kako bi lakše odredili koliko je materijala potrebno za svaki sloj.



*Slika 9 Postavljanje cilindra na uređaj*

Zbijanje se vrši u 5 slojeva pa je potrebna velika količina otpada. Nakon što smo promiješali navlaženi uzorak, on je spreman za zbijanje. Pomoću lopatice uzorak se stavlja u cilindar (slika 10) i pritiskom zelenog gumba na kontrolnoj ploči (slika 3) pokreće se zbijanje u 56 udaraca. Nakon drugog sloja, na cilindar se dodaje nastavak kako bi stala veća količina uzorka za zbijanje.





*Slika 10 Nasipavanje materijala u cilindar*

Kada je zbijanje završilo, vijci kojima je cilindar pričvršćen za uređaj se skidaju, skida se i nastavak na cilindru te se zbijeni uzorak pomoću noža ili nekog drugog alata poravnava sa rubom cilindra (slika 11). Tako pripremljen uzorak se zajedno s postoljem važe.



*Slika 11 Poravnavanje zbijenog uzorka sa rubom cilindra*

Kada je uzorak poravnat i izvagan, spreman je za vađenje iz cilindra. Vijci se otpuste kako bi se odvojilo postolje te se uzorak može izvaditi ručno ili pomoću hidrauličke preše ako je jako zbijen. U ovom slučaju, uzorak je bio jako zbijen te se za vađenje uzorka koristila ručna hidraulička preša dostupna u Geotehničkom laboratoriju. Postupak vađenja uzorka je prikazan na slici 12.



*Slika 12 Vađenje zbijenog uzorka iz cilindra pomoću hidrauličke preše*

Tako izvađeni uzorak stavi se u metalnu posudu poznate mase te se važe. Uzorak treba što bolje razmrviti i ravnomjerno rasporediti po posudi kako bi se ravnomjerno i što bolje osušio (slika 13). Suši se u sušioniku na 60°C, 24 sata, ako je potrebno i duže. Kada je uzorak osušen, opet se mora izvagati da bi mu mogli izračunati vlažnost i suhu gustoću te nacrtati krivulju.



*Slika 13 Vaganje zbijenog uzorka*

## 5. REZULTATI

Nakon što smo obavili ispitivanje za sve vlažnosti, dobili smo rezultate za 12 zbijenih uzoraka otpadnog materijala. Rezultati su prikazani u tablicama 5, 6 i 7.

Tablica 5 Prikaz rezultata 20% i 40% vlažnosti uzorka

	20%		40%	
	Cilindar B	Cilindar C2	Cilindar B	Cilindar C2
<b>Volumen</b> <sub>cilindra</sub> [cm <sup>3</sup> ]	2114	2120,58	2114	2120,58
<b>Masa</b> <sub>cilindra</sub> [g]	7308,3	8251,9	7308,3	8251,9
<b>Masa</b> <sub>cilindar+uzorak+vlažni</sub> [g]	9223,2	10122,2	9684,6	10663,4
<b>Masa</b> <sub>uzorka vlažnog</sub> [g]	1914,9	1870,3	2376,3	2411,5
	Sušenje u sušioniku na 60°C			
<b>Masa</b> <sub>tare (metalne posude)</sub> [g]	380,4	383,2	989,8	1131,8
<b>Masa</b> <sub>tara+uzorak+vlažni</sub> [g]	2003,0	2242,4	3361,7	3399,8
<b>Masa</b> <sub>tara+uzorak+suhi</sub> [g]	1720,7	1916,9	2625,4	2713,8
<b>Masa</b> <sub>vode</sub> [g]	282,3	325,5	736,3	686
<b>Masa</b> <sub>suhe tvari</sub> [g]	1340,3	1533,7	1635,6	1582
	Izračunati parametri			
<b>Vlažnost uzorka</b> [%]	21,06	21,22	45,02	43,36
<b>Ugrađena gustoća</b> [g/cm <sup>3</sup> ]	0,906	0,882	1,124	1,137
<b>Suha gustoća</b> [g/cm <sup>3</sup> ]	0,748	0,728	0,775	0,793

Tablica 6 Prikaz rezultata 60% i 80% vlažnosti uzorka

	60%		80%	
	Cilindar B	Cilindar B	Cilindar B	Cilindar B
<b>Volumen</b> <sub>cilindra</sub> [cm <sup>3</sup> ]	2114	2114	2114	2114
<b>Masa</b> <sub>cilindra</sub> [g]	7308,3	7308,3	7308,3	7308,3
<b>Masa</b> <sub>cilindar+uzorak+vlažni</sub> [g]	9920,8	10042,8	9917,3	9871,4
<b>Masa</b> <sub>uzorka vlažnog</sub> [g]	2612,5	2734,5	2609	2563,1



	Sušenje u sušioniku na 60°C			
<b>Masa</b> tare (metalne posude) [g]	380,7	383,3	380,4	383,6
<b>Masa</b> tara+uzorak+vlažni [g]	2984,1	3098,39	2978,5	2837,7
<b>Masa</b> tara+uzorak+suhi [g]	1994,2	2066,5	1806	1700
<b>Masa</b> vode [g]	989,9	1031,89	1172,5	1137,7
<b>Masa</b> suhe tvari [g]	1613,5	1683,2	1425,6	1316,4
	Izračunati parametri			
<b>Vlažnost uzorka [%]</b>	61,351	61,305	82,25	86,43
<b>Ugrađena gustoća [g/cm<sup>3</sup>]</b>	1,236	1,294	1,234	1,212
<b>Suha gustoća [g/cm<sup>3</sup>]</b>	0,766	0,802	0,677	0,650

Tablica 7 Prikaz rezultata 100% i 120% vlažnosti uzorka

	100%		120%	
	Cilindar B	Cilindar B	Cilindar B	Cilindar B
<b>Volumen</b> cilindra [cm <sup>3</sup> ]	2114	2114	2114	2114
<b>Masa</b> cilindra [g]	7308,3	7308,3	7308,3	7308,3
<b>Masa</b> cilindar+uzorak+vlažni [g]	9822,7	9915,6	9872,0	9860,8
<b>Masa</b> uzorka vlažnog [g]	2514,4	2607,3	2563,7	2552,5
	Sušenje u sušioniku na 60°C			
<b>Masa</b> tare (metalne posude) [g]	811,7	987	380,3	382,8
<b>Masa</b> tara+uzorak+vlažni [g]	3320,9	3590,5	2937,8	2929,7
<b>Masa</b> tara+uzorak+suhi [g]	2020,8	2312,8	1527,3	1526,4
<b>Masa</b> vode [g]	1300,1	1277,7	1410,5	1403,3
<b>Masa</b> suhe tvari [g]	1209,1	1325,8	1147	1143,6
	Izračunati parametri			
<b>Vlažnost uzorka [%]</b>	107,53	96,372	122,97	122,71
<b>Ugrađena gustoća [g/cm<sup>3</sup>]</b>	1,189	1,233	1,213	1,207
<b>Suha gustoća [g/cm<sup>3</sup>]</b>	0,573	0,628	0,544	0,542

Iz podataka prikazanih u prethodnim tablicama može se uočiti da pri vlažnostima od 20, 40 i 60 %, suha gustoća uzorka raste do svoje maksimalne vrijednosti te nakon toga na vlažnostima od 80, 100 i 120 % ta vrijednost opada .



*Slika 14 Zbijeni uzorak s 20% vlage (lijevo) i zbijeni uzorak s 40% vlage (desno)*



*Slika 15 Zbijeni uzorak s 60% vlage (lijevo) i zbijeni uzorak s 80% vlage (desno)*



*Slika 16 Zbijeni uzorak s 100% vlage (lijevo) i zbijeni uzorak s 120% vlage (desno)*



Grafički prikaz rezultata ispitivanja:

Tablica 8 Prikaz rezultata za izradu krivulje modificiranog Proctora

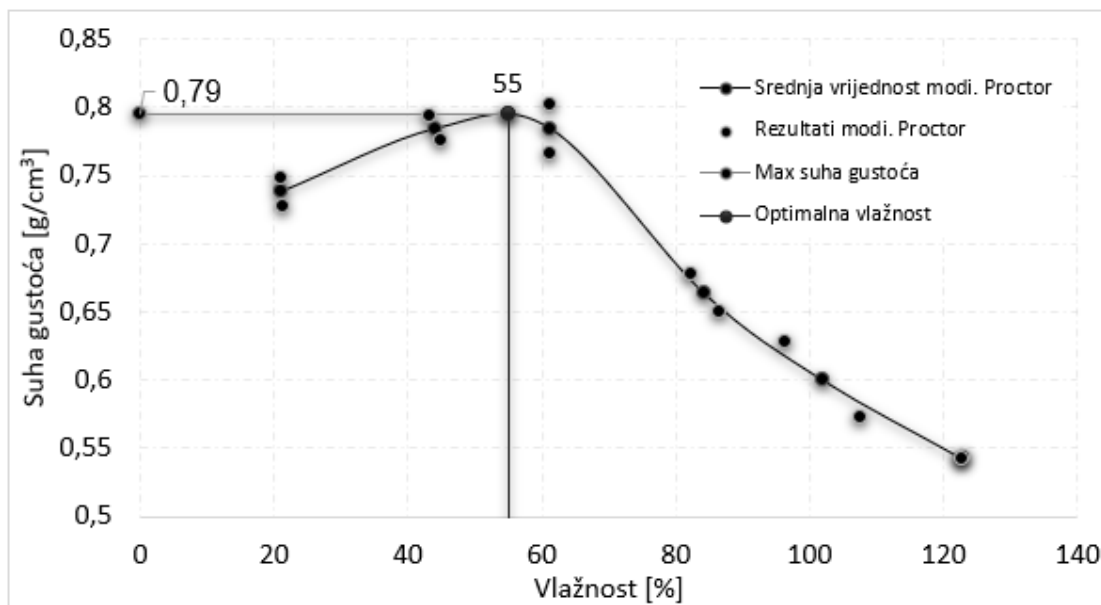
**MODIFICIRANI PROCTOROV POKUS**

<b>UTVRĐENA VLAŽNOST NA KRAJU POKUSA</b>	<b>Suha gustoća</b>
21,06 %	0,748 g/cm <sup>3</sup>
21,22 %	0,728 g/cm <sup>3</sup>
43,36 %	0,793 g/cm <sup>3</sup>
45,02 %	0,775 g/cm <sup>3</sup>
61,305 %	0,802 g/cm <sup>3</sup>
61,351 %	0,766 g/cm <sup>3</sup>
82,25 %	0,677 g/cm <sup>3</sup>
86,43 %	0,650 g/cm <sup>3</sup>
96,372 %	0,628 g/cm <sup>3</sup>
107,53 %	0,573 g/cm <sup>3</sup>
122,97 %	0,544 g/cm <sup>3</sup>
122,71 %	0,542 g/cm <sup>3</sup>

Tablica 9 Prikaz rezultata srednjih vrijednosti za izradu krivulje modificiranog Proctora

<b>SREDNJA VRIJEDNOST VLAŽNOSTI IZ DVA POKUSA</b>	<b>SREDNJA VRIJEDNOST SUHE GUSTOĆE IZ DVA POKUSA</b>
21,14 %	0,738 g/cm <sup>3</sup>
44,19 %	0,784 g/cm <sup>3</sup>
61,328 %	0,784 g/cm <sup>3</sup>
84,34 %	0,6635 g/cm <sup>3</sup>
101,951 %	0,6005 g/cm <sup>3</sup>
122,84 %	0,543 g/cm <sup>3</sup>

Pri ispitivanju modificiranog Proctorovog pokusa, najveća suha gustoća otpada iznosila je  $0,79 \text{ g/cm}^3$  pri vlažnosti od 55 %. Te podatke odredili smo pomoću krivulje koju smo dobili na temelju izračunatih podataka.



Slika 17 Grafički prikaz rezultata modificiranog Proctora

Na slici 17 prikazani su rezultati svih 12 podataka mjerenja. Za svaku vlažnost imali smo po dva uzorka te smo izračunali srednju vrijednost. Podatke srednjih vrijednosti vlažnosti i suhe gustoće spojili smo krivuljom kako bi mogli očitati optimalnu vlažnost i maksimalnu suhu gustoću otpada.

### 5.1. USPOREDBA REZULTATA SA STANDARDNIM PROCTOROM

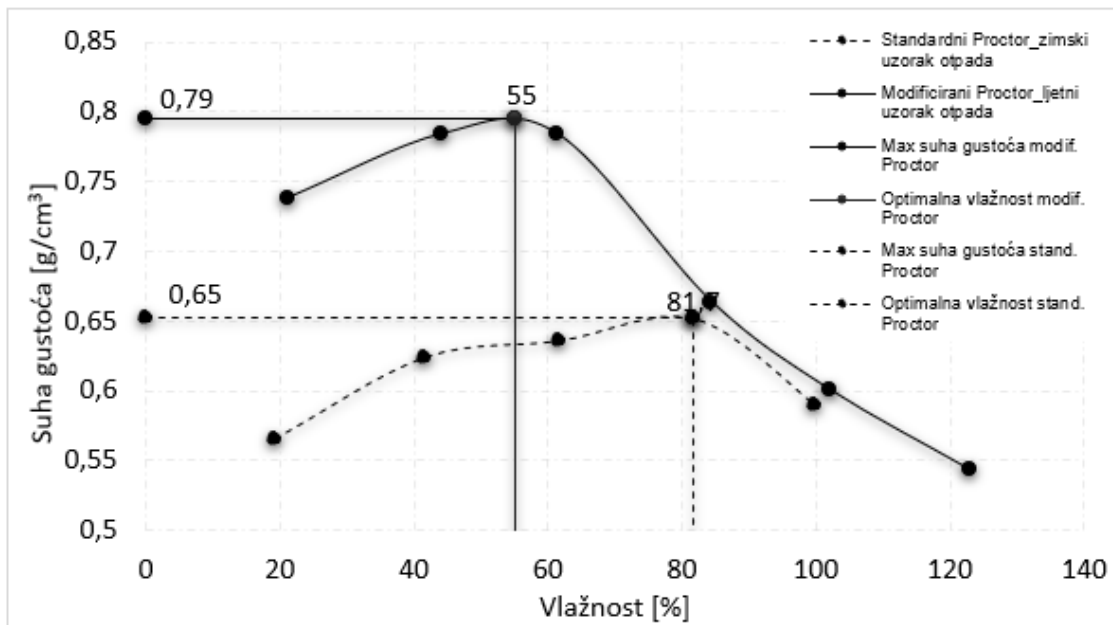
Tablica 10 Prikaz rezultata za izradu krivulje standardnog Proctora

STANDARDNI PROCTOROV POKUS	
VLAŽNOST	Suha gustoća
19,07 %	$0,565 \text{ g/cm}^3$
41,49 %	$0,624 \text{ g/cm}^3$
61,6 %	$0,636 \text{ g/cm}^3$

81,7 %  
99,63 %

0,652 g/cm<sup>3</sup>  
0,59 g/cm<sup>3</sup>

Pri ispitivanju standardnog Proctorovog pokusa, najveća suha gustoća otpada iznosila je 0,65 g/cm<sup>3</sup> pri vlažnosti od 81,7 %. Te podatke smo odredili pomoću krivulje.



Slika 18 Grafički prikaz usporedbe rezultata standardnog i modificiranog Proctora

Usporedbom rezultata vidljivo je da se kao i kod tla s povećanjem energije zbijanja smanjuje optimalna vlaga pri kojoj je moguće postići maksimalnu zbijenost. Također, pri većim vlažnostima rezultati pokusa pokazuju da se učinak veće energije zbijanja gubi te su se rezultati standardnog i modificiranog Proctorovog pokusa izjednačili.

Položenost krivulje:

Kod tla, zvonolik oblik krivulje je dosta izražen i raspon vlage unutar koje se može postići dobra zbijenost je relativno mali odnosno odstupanja od optimalne vlage su vrlo mala. Već se kod malih promjena vlažnosti ne može postići najveća gustoća. Tlo je jako osjetljivo na promjenu optimalne vlage.

U otpadu je ta krivulja položenija. Tolerancija na promjenu vlage je bitno veća nego kod tla. U otpadu možemo imati veća odstupanja vlage od optimalne, a da gustoća

u odnosu na maksimalnu bude još uvijek zadovoljavajuća. Vlaga može puno više varirati od optimalne, a da se još uvijek dobije dobra zbijenost.

## 6. ZAKLJUČAK

U ovom radu predstavljen je Proctorov uređaj te način ispitivanja u samom uređaju. Kako postoje dvije vrste pokusa, standardni i modificirani, napravljena je usporedba na temelju dobivenih rezultata.

Iz rezultata je vidljivo da je kod standardnog Proctora maksimalna suha gustoća postiže u rasponu vlažnosti od 70 do 90 % dok je kod modificiranog Proctor ispitivanja raspon vlage za optimalnu zbijenost nešto manjeg raspona te je maksimalna suha gustoća od  $0,79 \text{ g/cm}^3$  ostvarena pri vlažnosti od 55 %.

Na temelju dobivenih rezultata može se zaključiti da je dobivena „zvonolika“ krivulja koja je i specifična za Proctorov pokus. Pri većoj energiji zbijanja (modificirani Proctor) maksimalna suha gustoća je veća pri manjoj vlažnosti, dok je pri manjoj energiji zbijanja maksimalna suha gustoća manja pri većoj vlažnosti.

Dobivena razlika nastupila je zbog toga što je kod modificiranog Proctora energija zbijanja dosta veća, bat je teži, zbija se s više udaraca i u više slojeva te se otpadni materijal (uzorak) bolje sabio.

Bitna stavka je i način na koji je uzorak obrađen. U ovom slučaju, uzorak miješanog komunalnog otpada je prošao postupak mehaničko biološke obrade u postrojenju na odlagalištu Mariščina. Pomoći bioreaktora proveden je postupak biosušenja otpada u kojem se pri anaerobnim uvjetima, biološki razgradiva komponenta otpada djelomično stabilizira i suši.

Ovim rezultatima dokazano je da maksimalna suha gustoća otpada ovisi o istim parametrima (vlažnost i energija zbijanja), kao što je to slučaj i sa tlom.

## ZAHVALA

Ovaj rad je sufinancirala Hrvatska zaklada za znanost projektom UIP- 2017-05-5157.

Zahvaljujem mentoru izv.prof.dr.sc. Igoru Petroviću te asistentima Nikoli Kaniškome, mag.ing.amb. i Nikoli Hrnčiću, mag.ing.aedif., mag.ing.geoling. na pomoći, savjetima te vremenu kojeg su izdvojili u proteklim mjesecima tijekom izrade ovog diplomskog rada. Zahvaljujem se obitelji i prijateljima koji su mi uvijek bili podrška tokom studiranja.

## LITERATURA

Anić Vučinić, A. (2016) *Količine i podjela otpada - skripta za studente, Geotehnički fakultet, Srce*. (Pristupljeno: 7 Travnja 2021).

*Gospodarenje otpadom / Fond za zaštitu okoliša i energetska učinkovitost.*

Dostupno na: <https://www.fzoeu.hr/hr/gospodarenje-otpdom/1345> (Pristupljeno: 4. Svibnja 2021).

Herceg, N. (2013) *Okoliš i održivi razvoj*. Zagreb.

HZN, H. zavod za norme- (2020) *Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 2: Test methods for laboratory dry density and water content - Proctor compaction (EN 13286-2:2020)*.

Nonweiller Ervin (1979) *Mehanika tla i temeljenje građevina*. Školska knjige, Zagreb.

Kalinski, M. (2006) *Soil mechanics lab manual*.

Kaniški Nikola, Hrnčić Nikola, Petrović Igor. (2020) 'Applicability of the Large pycnometer method for determination of specific gravity of mechanically and biologically treated waste', *Recent Trends in Geotechnical and Geo-Environmental Engineering and Education*.

Perić, Š. (2020) 'Utjecaj amplitude na određivanje maksimalne suhe gustoće MBO otpada vibro pločom', *Geotehnički fakultet*.

Petrović, I., Štuhec, D. and Kovačić, D. (2014) 'Large oedometer for measuring stiffness of MBT waste', *Geotechnical Testing Journal*, 37(2). doi: 10.1520/GTJ20130015.

Šarc Renato, Petrović Klara, Relić Irena, L. K. (2018) 'Mechanical-Biological Waste Treatment Plants in Croatia', *Waste Management*, pp. 315–336.

Tanja Roje-Bonacci (2012) 'Zemljani radovi'. Dostupno na: [https://bib.irb.hr/datoteka/602466.gotovi\\_tekst\\_za\\_tiskaru\\_.pdf](https://bib.irb.hr/datoteka/602466.gotovi_tekst_za_tiskaru_.pdf) (Pristupljeno 23

Travnja 2021).

*Uzorkovanje i kemijska analiza otpada* | MINGOR (2005). Dostupno na:  
<http://www.haop.hr/hr/uzorkovanje-i-kemijska-analiza-otpada/uzorkovanje-i-kemijska-analiza-otpada> (Pristupljeno: 22 Travnja 2021).



## POPIS SLIKA

Slika 1 - Sastav i udjeli (%) komponenata u miješanom komunalnom otpadu (Anić Vučinić, 2016) .....	4
Slika 2 Proctorov uređaj .....	9
Slika 3 Kontrolna ploča na Proctorovom uređaju .....	11
Slika 4 Grafički prikaz krivulje Proctorovog pokusa .....	14
Slika 5 Grafički prikaz postotaka masa otpada za zimski i ljetni period .....	16
Slika 6 Granulometrijski sastav otpada .....	17
Slika 7 Stavljanje uzoraka na sušenje u sušionik .....	19
Slika 8 Miješanje suhog uzorka s vodom .....	21
Slika 9 Postavljanje cilindra na uređaj .....	22
Slika 10 Nasipavanje materijala u cilindar .....	23
Slika 11 Poravnavanje zbijenog uzorka sa rubom cilindra .....	24
Slika 12 Vađenje zbijenog uzorka iz cilindra pomoću hidrauličke preše .....	25
Slika 13 Vaganje zbijenog uzorka .....	26
Slika 14 Zbijeni uzorak s 20% vlage (lijevo) i zbijeni uzorak s 40% vlage (desno) .....	29
Slika 15 Zbijeni uzorak s 60% vlage (lijevo) i zbijeni uzorak s 80% vlage (desno) .....	30
Slika 16 Zbijeni uzorak s 100% vlage (lijevo) i zbijeni uzorak s 120% vlage (desno) .....	30
Slika 17 Grafički prikaz rezultata modificiranog Proctora .....	32
Slika 18 Grafički prikaz usporedbe rezultata standardnog i modificiranog Proctora .....	33

## POPIS TABLICA

Tablica 1 Sažetak standardnog i modificiranog Proctorovog testa (EN 13286-2) .	10
Tablica 2 Dimenzije cilindra za Proctorov uređaj.....	11
Tablica 3 Postotci masa sastava za metanogeni udio biosušenog otpada za zimsko i ljetno razdoblje (Kaniški i sur., 2020).....	15
Tablica 4 Prikaz masa otpada i masa vode korištenih u ispitivanju.....	19
Tablica 5 Prikaz rezultata 20% i 40% vlažnosti uzorka .....	27
Tablica 6 Prikaz rezultata 60% i 80% vlažnosti uzorka .....	27
Tablica 7 Prikaz rezultata 100% i 120% vlažnosti uzorka .....	28
Tablica 8 Prikaz rezultata za izradu krivulje modificiranog Proctora.....	31
Tablica 9 Prikaz rezultata srednjih vrijednosti za izradu krivulje modificiranog Proctora .....	31
Tablica 10 Prikaz rezultata za izradu krivulje standardnog Proctora .....	32