Mjerenje parametara čvrstoće MBO otpada u triaksijalnom uređaju

Kolarek, Miljenka

Master's thesis / Diplomski rad

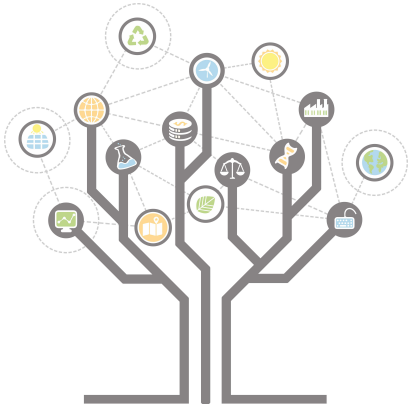
2019

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:458030

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

MILJENKA KOLAREK

MJERENJE PARAMETARA ČVRSTOĆE MBO OTPADA U TRIAKSIJALNOM UREĐAJU

DIPLOMSKI RAD

VARAŽDIN, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

DIPLOMSKI RAD

MJERENJE PARAMETARA ČVRSTOĆE MBO OTPADA U TRIAKSIJALNOM UREĐAJU

KANDIDAT:

MILJENKA KOLAREK

MENTOR:

izv. prof. dr.sc. Igor Petrović

VARAŽDIN, 2019.

Sveučilište u Zagrebu
Geotehnički fakultet

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnica: MILJENKA KOLAREK

Matični broj: 185 - 2017./2018.

Smjer: GEOINŽENJERSTVO OKOLIŠA

NASLOV DIPLOMSKOG RADA:

MJERENJE PARAMETARA ČVRSTOĆE MBO OTPADA U TRIAKSIJALNOM UREĐAJU

Rad treba sadržati:
1. Uvod
2. Posmična čvrstoća
3. Triaksijalni pokus
4. Ispitivanje uzorka u triaksijalnom uređaju
5. Zaključak
6. Literatura
7. Popis slika
8. Popis tablica

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

Zadatak zadan: 04.04.2019.

Rok predaje: 05.09.2019.

Mentor:
Izv.prof.dr.sc. Igor Petrović

Predsjednik Odbora za nastavu:
Izv.prof.dr.sc. Igor Petrović

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom

Mjerenje parametara čvrstoće MBO otpada u triaksijalnom uređaju

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, 10.06.2019.

Miljenka Kolarek

(Ime i prezime)

Miljenka Kolarek

(Vlastoručni potpis)

Sažetak:

Miljenka Kolarek, Mjerenje parametara čvrstoće MBO otpada u triaksijalnom uređaju

Jedan od mehaničkih parametara otpada je posmična čvrstoća koja se opisuje kohezijom i kutem trenja. Ovi parametri služe u proračunima za projektiranje odlagališta. S obzirom da otpad nije homogen i mijenja svoja svojstva ovisno o starosti, dubini i lokaciji, ne postoji standardizirani postupak niti standardna oprema za određivanje mehaničkih parametara otpada. Stoga je određivanje i mjerenje kohezije i kuta trenja laboratorijskim metodama iznimno složen postupak.

Posmična čvrstoća otpada u laboratoriju može se odrediti triaksijalnim pokusom i izravnim posmikom. Triaksijalan pokus sastoji se od 3 faze: zasićivanja, konsolidacije i smicanja. Ovisno o tome da li je ventil otvoren ili zatvoren, definira se vrsta pokusa (drenirano i nedrenirano stanje).

U ovom radu ispitivao se mehaničko-biološki obrađen uzorak otpada iz centra za gospodarenje otpadom Marišćina u triaksijalnom uređaju. Pokus koji se izvodio bio je konsolidirano nedreniran. Ispitivao se samo jedan uzorak s ciljem da se demonstrira osnovni princip mjerenja u troosnom uređaju. S obzirom da se to ispitivanje standardizirano provodi na uzorcima tla, cilj ovog rada je prikazati razlike i specifičnosti u istom opitu ali na uzorku otpada. Da bi se utvrdili parametri čvrstoće, potrebno je ispitati minimalno 3 uzorka pri različitim vrijednostima ćelijskog pritiska.

Ključne riječi: mehaničko-biološki obrađen otpad, parametri čvrstoće, kohezija, kut trenja, triaksijalni uređaj, CU pokus

Sadržaj

1. UVOD 1
2. POSMIČNA ČVRSTOĆA 2
2.1.1. KOHEZIJA 4
2.1.2. KUT UNUTARNJEG TRENJA 4
2.2. POSMIČNA ČVRSTOĆA OTPADA 5
3. TRIAKSIJALNI POKUS 8
3.1. VRSTE TROOSNOG ISPITIVANJA 11
3.1.1. Konsolidirani drenirani pokus (CD) 11
3.1.2. Konsolidirani nedrenirani pokus (CU) 12
3.1.3. Nekonsolidirani nedrenirani pokus 13
3.2. TRIAKSIJALAN UREĐAJ 14
3.2.1. POSTOLJE I ĆELIJA 14
3.2.2. HIDRAULIČKE PUMPE 16
3.2.3. LOGGER 17
3.2.4. SOFTWARE 18
4. ISPITIVANJE UZORKA U TRIAKSIJALNOM UREĐAJU 19
4.1. PRIPREMA UZORKA 20
4.2 UGRADNJA UZORKA 23
4.3. POKUS 27
4.4. REZULTATI POKUSA 33
5. ZAKLJUČAK 35
6. LITERATURA 37

1. UVOD

Otpad je definiran Zakonom o održivom gospodarenju otpadom (NN 94/13; 73/17; 14/19) kao tvar ili predmet koja se odbacuje, namjerava ili mora odbaciti. Nastaje kao posljedica ljudske aktivnosti, povećanom potrošnjom, rastom broja stanovnika i gospodarstva, brzom zastarom proizvoda. Utjecaj otpada na emisije u zrak, vodu i tlo ovisi o količini i sastavu otpada kao i o načinu na koji se njime gospodari. (Anić Vučinić. 2015.)

Uzimajući to u obzir, donesena je Strategija gospodarenja otpadom (NN 130/2005) čija je svrha uspostaviti okvir unutar kojeg će Hrvatska morati smanjiti količinu otpada koji proizvodi, a otpadom koji je proizveden održivo gospodariti. Jedan od modela koji se koristi za smanjivanje nastajanja otpada je cirkularna ekonomija. Takav model se temelji na ponovnom iskorištavanju već upotrijebljenog sljedećim postupcima: recikliranje proizvoda nakon distribucije, ponovna upotreba, vađenje prirodnih sirovina, ekološki dizajn proizvoda.

Hrvatska se najvećim dijelom oslanja na odlaganje otpada na odlagališta. Prema odredbi Pravilnika o načinima i uvjetima odlaganja otpada, na odlagališta otpada dozvoljeno je odlaganje samo prethodno obrađenog otpada, pri čemu je mehaničko-biološka obrada najčešća tehnologija obrade komunalnog otpada. Otpad je jedan od gradivnih elemenata odlagališta pa je nužno poznavati njegova fizikalna i mehanička svojstva za potrebe projektiranja odlagališta.

2. POSMIČNA ČVRSTOĆA

Prema definiciji, posmična čvrstoća otpada je vrijednost posmičnog naprezanja, pri slomu, duž klizne površine unutar mase otpada. Posmična čvrstoća τ_f definira se Mohr-Columbovim zakonom sloma:

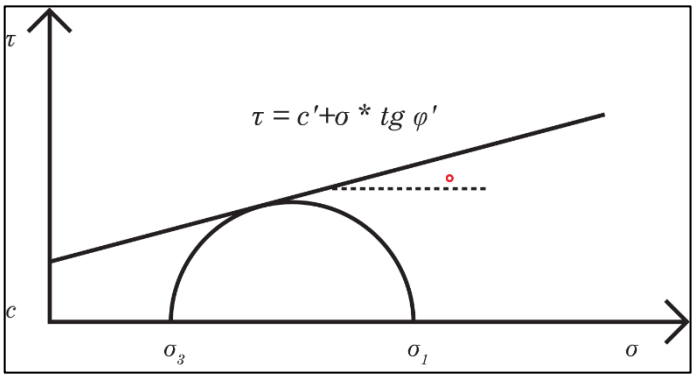
$$\tau_f = c' + \sigma'_n \times tg\varphi' \qquad \text{(izraz 1.)}$$

gdje je: c`-efektivna kohezija;

φ`-efektivan kut unutarnjeg trenja;

σ`n-normalno efektivno naprezanje.

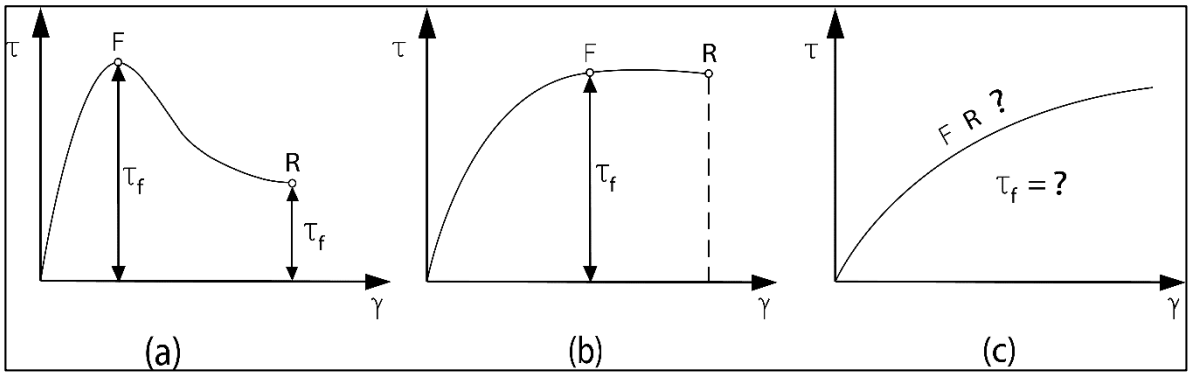
Izraz 1. definira pravac, kojemu je c` odsječak na ordinati, a $\varphi$` nagib u odnosu na horizontalu. Taj pravac predstavlja linearnu aprosksimaciju anvelope sloma u određenom rasponu vertikalnih naprezanja. Stanje naprezanja prikazano je Mohr-ovom kružnicom i do sloma dolazi kada anvelopa sloma dodirne Mohr-ovu kružnicu naprezanja (Slika 1).



Slika 1. Mohr-ov dijagram naprezanja i anvelopa sloma

Može se zaključiti da je potrebno odrediti parametre čvrstoće, koheziju i kut unutarnjeg trenja za određivanje posmične čvrstoće. Ta dva parametra nisu konstanta materijala, nego ovise o vrsti materijala, koeficijentu pora, granulometrijskom i mineraloškom sastavu. Postoje

različiti oblici loma (Slika 2) a to su krto-plastični lom, plastični lom i žilavo ponašanje materijala.



Slika 2. Oblici sloma uzorka

Na slici 2.a) prikazan je krto-plastičan lom koji podrazumijeva povećanje posmičnog naprezanja do maksimalne vrijednosti τ_f, koja predstavlja vršnu posmičnu čvrstoću, a zatim slijedi pad do rezidualne čvrstoće, tj. čvrstoća koja ostaje konstantna nakon dostizanja određene veličine deformacije uz nastavak deformiranja. Slika 2.b) prikazuje plastičan lom kod kojeg se uz porast deformacija dostigne maksimalna vrijednost τ_f, a sa nastavkom deformiranja posmično naprezanje ostaje konstantno. Takvo ponašanje karakteristično je za rastresita i zbijena tla. Za razliku od krto-plastičnog i plastičnog loma, žilavo ponašanje, prikazano na slici 2.c), ne dostiže se maksimalna vrijednost τ_f u ispitanom intervalu opterećenja.

Izraz za posmičnu čvrstoću je zapravo zakon trenja iskazan preko naprezanja. Kod slučaja klizanja do sloma dolazi kada se premaši maksimalna sila trenja koja se odupire klizanju. Definirana je koeficijentom trenja μ i silom reakcije N. Sila trenja prikazana je izrazom 2.

$$T = \mu \times N \qquad \text{(izraz 2.)}$$

Kada se ta jednadžba podijeli sa površinom, dobije se (izraz 3.):

$$\tau = \mu \times \sigma \text{ (izraz 3.).}$$

Koeficijent trenja može se prikazati preko funkcije kuta untarnjeg trenja pa slijedi izraz 4.:

$$\tau = \text{tg}\varphi \times \sigma \text{ (izraz 4.)}$$

Izraz 4. koristi se za materijale koji nemaju koheziju što je karakteristično za nekoherentne materijale, šljunak i pijesak i onda anvelopa sloma prolazi kroz ishodište koordinatnog sustava. Ako postoji kohezija, izraz 4. se modificira u:

$$\tau = c + \text{tg}\varphi \times \sigma \text{ (izraz 5.).}$$

2.1.1. KOHEZIJA

Kohezija je otpor tla smicanju kada su normalna naprezanja jednaka nuli i nastaje utjecajem elektrokemijskih sila između čestica. Sile su jače što su čestice sitnije i ima više dodirnih ploča pa je zbog toga kohezija osobina sitnozrnatih tala. Kako se smanjuje veličina čestica, tako se povećava njihov broj u jedinici volumena. Na dodirnim točkama između čestica djeluju električne i Van der Waalsove sile. Njihov intenzitet je jači, što je manji razmak između čestica, tj. što su čestice manje, bit će dominantne električne i Van der Waalsove sile.

Ona nije konstanta materijala, nego ovisi o puno čimbenika poput veličini čestica, mineraloškom sastavu materijala, koeficijentu pora, međusobnom razmaku između čestica.

2.1.2. KUT UNUTARNJEG TRENJA

Kut unutranjeg trenja računa se za koherentna tla prema sljedećem izrazu:

$$\varphi` = arc\ tg \frac{\tau_f - c}{\sigma`} \qquad \text{(izraz 6.).}$$

S obzirom da nekoherentna tla nemaju koheziju, anvelopa sloma prikazana je pravcem čiija je jednadžba:

$$tg\ \varphi` = \frac{\tau_f}{\sigma`} \qquad \text{(izraz 7.).}$$

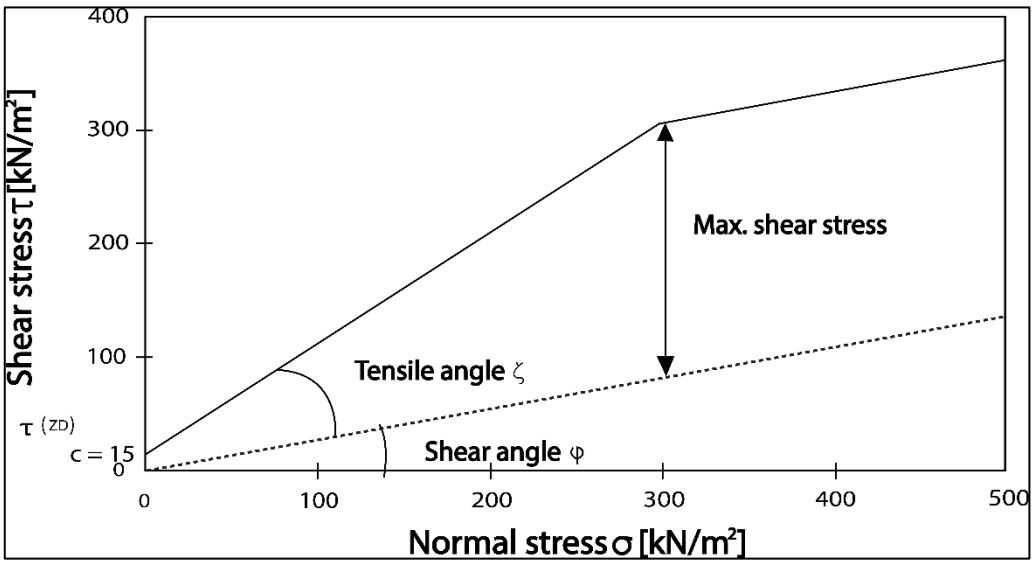
2.2. POSMIČNA ČVRSTOĆA OTPADA

Posmična čvrstoća otpada jedno je od mehaničkih svojstva otpada koje je potrebno odrediti zajedno sa fizikalnim svojstvima za projektiranje odlagališta. Poteškoće koje se javljaju kod određivanja tih svojstava otpada su nehomogenost otpada, nedostatak opće prihvaćene metode uzorkovanja i dobivanja neporemećenog uzorka za ispitivanje mehaničkih svojstava, nedostatak standardiziranog postupka i opreme za ispitivanje mehaničkih svojstava otpada, promjenjivost svojstva ovisno o starosti, dubini i lokaciji gdje se nalazi. Najčešći laboratorijski pokusi za određivanje mehaničkih parametara čvrstoće otpada su uređaj za direktan posmik i triaksijalan uređaj. Pri laboratorijskom ispitivanju otpada upitna je reprezentativna veličina uzorka i potrebno je poduzeti dodatne mjere zaštite kako bi se osigurali povoljni zdravstveni uvjeti za ispitivača. Za potrebe određivanja mehaničkih parametara bitna je geotehnička klasifikacija otpada prema kojoj se otpad dijeli na otpad koji se ponaša kao tlo i otpad koji se ne ponaša kao tlo koji su prikazani tablicom 1.

Tablica 1. Geotehnička klasifikacija otpada (Kavur, 2016)

GEOTEHNIČKA KLASIFIKACIJA OTPADA	
Otpad koji se ponaša kao tlo	Otpad koji se ne ponaša kao tlo
• Iskop tla • Industrijski talog • Kanalizacijski talog • Prašina, pepeo, ostatak nakon spaljivanja	• Komunalni otpad • Građevinski otpad • Zeleni otpad • Krupni otpad • Ostatak mehaničko-biološki obrađenog otpada

Posmična čvrstoća opisuje se kutem trenja i kohezijom. Kölsch je uveo treći parametar, vlačni kut ζ, kojim se opisuje vlačna čvrstoća. Vlačna čvrstoća rezultat je vlačne otpornosti koja se aktivira u vlaknima kao rezultat deformacije pod uvjetom da je sidrenje vlakna dovoljno.



Slika 3. Model posmične čvrstoće za otpad

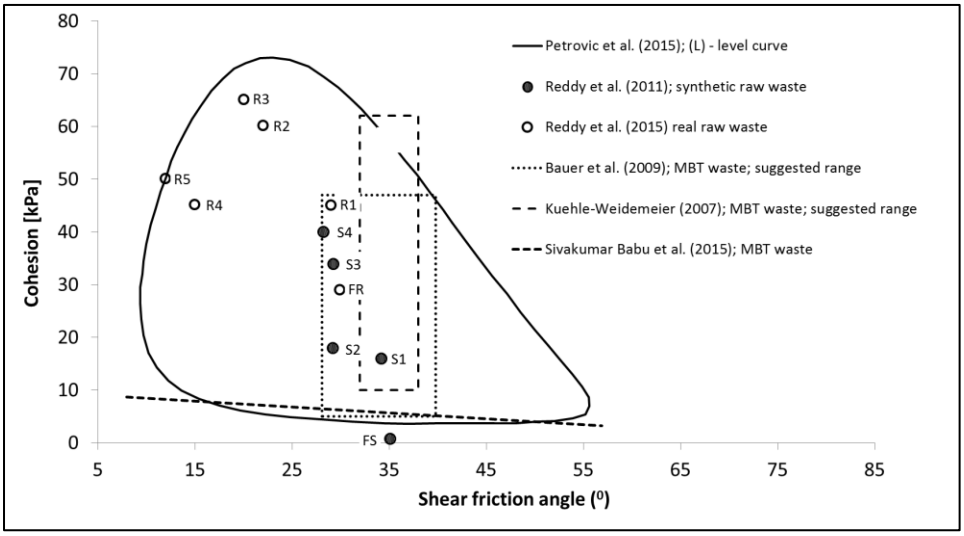
Ziehmann (1999) je istražio utjecaj obrade otada (neobrađen, biološki obrađen, mehanički-biološki obrađen i mehanički-biološki obrađena frakcija <60 mm) na posmičnu i vlačnu čvrstoću otpadnog materijala. Vrijednosti parametara čvrstoće s obzirom na različit postupak obrade otpada prikazane su u tablici 2. Otkrio je da kohezija nije pod utjecajem obrade otpada, dok biološka obrada povećava kut trenja za oko 17%. Nadalje, pokazano je da se vlačni kut u prosijanoj frakciji s česticama manjim od 60 mm ne može detektirati pa se za razmatranu vrstu otpada može zanemariti.

Tablica 2. Parametri čvrstoće otpada s obzirom na obradu (Ziehmann, 1999)

Parametar čvrstoće	Mjerna jedinica	Netretirani otad	Biološki obrađen otpad	Mehanički-biološko obrađen otpad	Mehanički-biološki obrađena frakcija <60 mm
Vlačni kut	[°]	30-35	30-35	15	0
Kut trenja	[°]	30	35	35-38	35-38
Kohezija	[kN/m^2]	15	15	15	15

S obzirom na parametre čvrstoće na smicanje čvrstog komunalnog otpada koji je prethodno mehaničko-biološki obrađen, Kuehle-Weidemeier (2007) je izvijestio da se kutovi trenja obično kreću između 32 ° i 38 °, dok je kohezija između 10 i 62 kPa.

Na slici 3. prikazana je usporedba prosječnih parametara posmične čvrstoće mehaničko-biološki obrađenog otpada i otpada iz bioreaktorskih odlagališta. Osim toga, na slici 4. također je prikazana granična krivulja s 90% vjerojatnosti da se parametri posmične čvrstoće neobrađenog komunalnog krutog otpada nalaze unutar te krivulje.



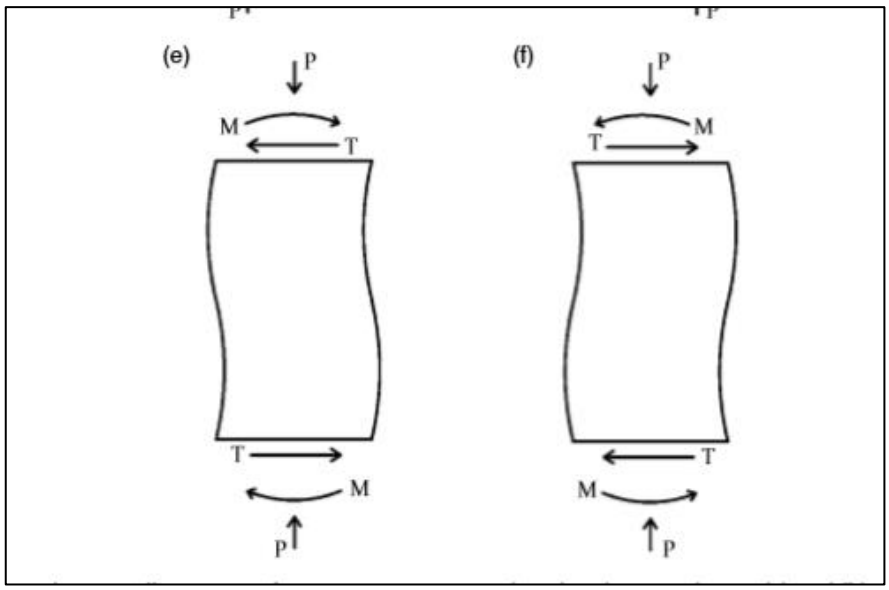
Slika 4. Parametri posmične čvrstoće mehanički-biološkog tretiranog otpada i sirovog netretiranog komunalnog otpada (Petrović, 2016)

Kao što se može vidjeti iz slike 4., parametri posmične čvrstoće neobrađenog komunalnog otpada raspršene su u širem području, dok parametri posmične čvrstoće prethodno obrađenog otpada pokazuju mnogo uže područje odgovarajućih vrijednosti kohezije i kuta trenja. Iz toga se može zaključiti da se ne može postaviti direktna veza između parametara posmične čvrstoće neobrađenog i obrađenog komunalnog otpada (Petrović, 2016).

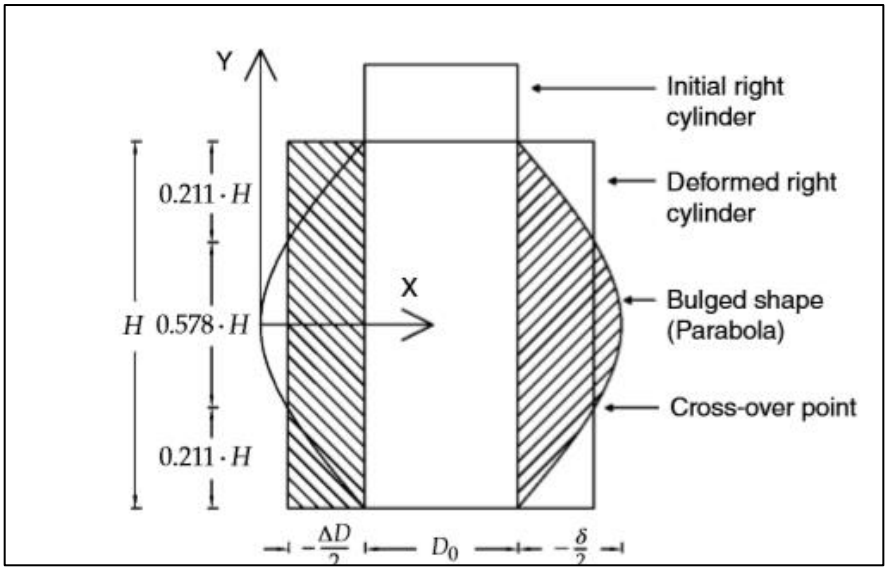
3. TRIAKSIJALNI POKUS

Triaksijalni pokus smatra se najnaprednijim pokusom za ispitivanje parametara čvrstoće i deformabilnosti, jer se pomoću njega mogu najbolje simulirati in-situ uvjeti, tj. uvjeti koji vladaju u tlu ili uvjetima koji mogu vladati u tlu u trenutku kada se izvodi građevina (u ovom slučaju sanitarno odlagalište). Služi za mjerenje deformabilnosti i čvrstoće uzoraka pri radijalno osnom stanju naprezanja. U pokusu se zadaju samo dva glavna naprezanja σ_3 i devijatorsko naprezanje q koja djeluju na uzorak i koja ga polagano dovode do sloma po stvarnoj plohi najmanjeg posmičnog otpora.

U standardnom triaksijalnom pokusu zadaje se početna visina uzorka i početni promjer uz poštivanje uvjeta da je visina dva puta veća od promjera uzorka. Kako je kod nehomogenih uzoraka realno za očekivati pojavu izvijanja (eng. “buckling”) i bačvastog deformiranja (eng. “barreling”), a s ciljem da deformacija uzorka bude što homogenija, u ovom je istraživanju omjer promjera i visine uzorka bio 1:1. Fenomen izvijanja prikazan je na slici 5, a fenomen bačvastog deformiranja na slici 6.



Slika 5. Izvijanje uzorka (Lade, 2016)



Slika 6. Bačvasto deformiranje uzorka (Lade, 2016)

Prijevod teksta slike 6. : initial right cylinder – početni pravilni valjak; deformed right cylinder – deformirani pravilni valjak; bulged shape (parabola) – izbočen oblik (parabola); cross – over point – točka prijelaza

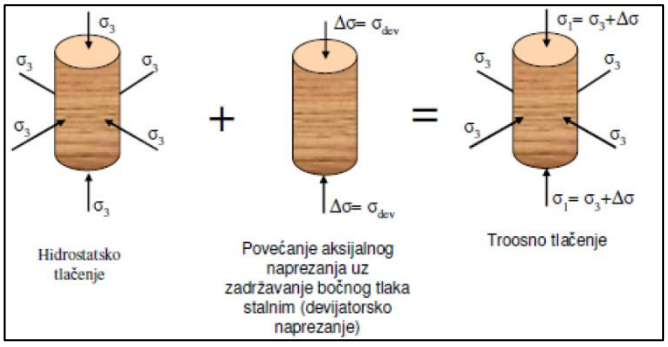
Kod nehomogenog uzorka raspodjela naprezanja je neujednačena na krajevima uzorka pa se zbog toga razvija moment savijanja što uzrokuje neujednačenu deformaciju, izbočenje na sredini i bačvasti oblik uzorka nakon ispitivanja. Takav profil bačvastog uzorka opisuje se aproksimacijom parabole. Za dobivanje prosječnih bočnih deformacija koriste se proračuni u točkama smještenim na jednoj petini visine uzorka. Kao uvjeti ispitivanja, zadaju se radijalno, bočno ili hidrostatsko naprezanje (to će biti ćelijski tlak čije su standardne vrijednosti 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa) i vertikalno naprezanje čija vrijednost ovisi o posmičnoj otpornosti uzorka. Tijekom izvođenja pokusa, mjeri se vertikalni pomak kape uzorka (vertikalna deformacija, tj. koliko je skraćenje uzorka), porni tlak i promjena volumena kod dreniranog pokusa. U slučaju da je potreban Poissonov koeficijent υ, mjeri se promjena promjera uzorka.

Ispitivanje se sastoji od opterećenja uzorka hidrostatskim pritiskom u ćeliji koji uzrokuje naprezanje σ_3 i dodatnim naprezanjem u uspravnom smjeru pri čemu je:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma_1 \qquad \text{(izraz 8.)}$$

Stanje glavnih naprezanja u uzorku kod troosnog ispitivanja prikazano je na slici 6. Ćelijski tlak predstavlja manje glavno naprezanje $\sigma_3 = \sigma_c$. Zbroj ćelijskog tlaka σ_3 i nametnutog osnog naprezanja predstavlja veće glavno naprezanje $\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma_1$. Kao razliku glavnih naprezanja, odnosno većeg i manjeg naprezanja dobije se devijatorsko naprezanje.

$$q = \sigma_3 - \sigma_1 \qquad \text{(izraz 9.)}$$



Slika 7. Stanje naprezanja u uzorku kod troosnog ispitivanja (Strelec i Štuhec, 2011)

Potrebno je ispitati najmanje 3 uzorka s različitim vrijednostima tlaka u ćeliji σ_3.

3.1. VRSTE TROOSNOG ISPITIVANJA

Pokus ima 3 faze:

1) Zasićivanje

Za pravilno ispitivanje i pravilnu interpretaciju rezultata troosnog pokusa uzorak mora biti zasićen najmanje 95%. Uzorak se zasićuje povratnim tlakom (tlak pomoću kojeg se u uzorak utiskuje voda).

2) Konsolidacija

Konsolidacija je proces istjecanja porne vode iz uzorka koji je pod nekim tlakom. Procesom konsolidacije omogućuje se dreniranje uzorka. Čeka se istjecanje viška vode odnosno konsolidacija kad ukupna naprezanja prijeđu u efektivna. Na uzorak djeluje samo ćelijski tlak pa je stoga $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_c$.

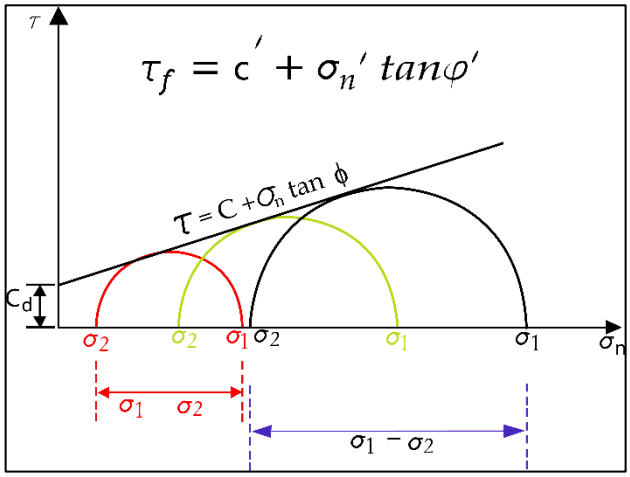
3) Posmik

Posmik može biti drenirani i nedrenirani. Kod dreniranog stanja, nakon konsolidacije uzorak se pomoću klipa osno opterećuje do sloma. Mjeri se promjena volumena porne vode. Za nedrenirano stanje nije dozvoljeno istjecanje vode iz uzorka pa nema promjene volumena. Mjere se ukupna naprezanja i porni tlak, a efektivna naprezanja se izračunavaju.

3.1.1. Konsolidirani drenirani pokus (CD)

Uzorak se zasićuje vodom do stupnja saturacije $Sr \geq 0,95$ poslije čega je izložen izotropnom ćelijskom tlaku σ_3. Tijekom konsolidacije, drenažni ventil je otvoren sve do kada proces nije završen. Nakon toga se nanosi $\Delta\sigma_1$ toliko sporo, da u svakom trenutku pokusa ne dolazi do porasta pornog tlaka iznad vrijednosti povratnog tlaka pa su ukupna naprezanja jednaka efektivnim. Drenažni ventil je otvoren tijekom konsolidacije i posmika pa se mjeri volumen

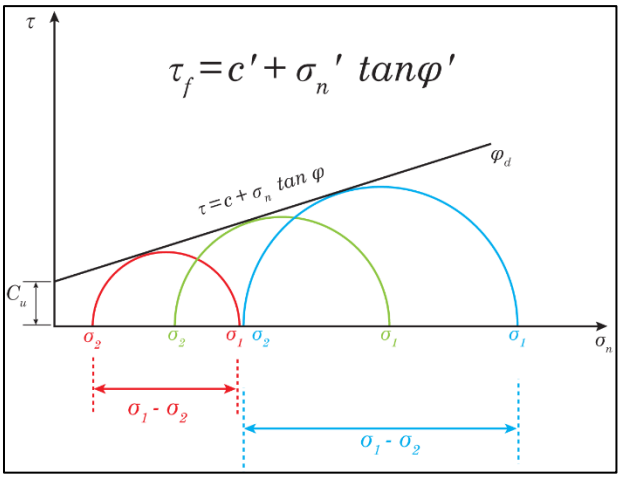
istisnute porne vode odnosno promjena volumena uzorka. Kriterij sloma određuje se kao maksimalna vrijednost čvrstoće na smicanje, tj. maksimalna vrijednost devijatorskog naprezanja. S obzirom da su ukupna naprezanja jednaka efektivnim, interpretacijom pokusa dobivaju se efektivna kohezija i efektivan kut trenja (Slika 8).



Slika 8. Rezultat konsolidiranog dreniranog pokusa

3.1.2. Konsolidirani nedrenirani pokus (CU)

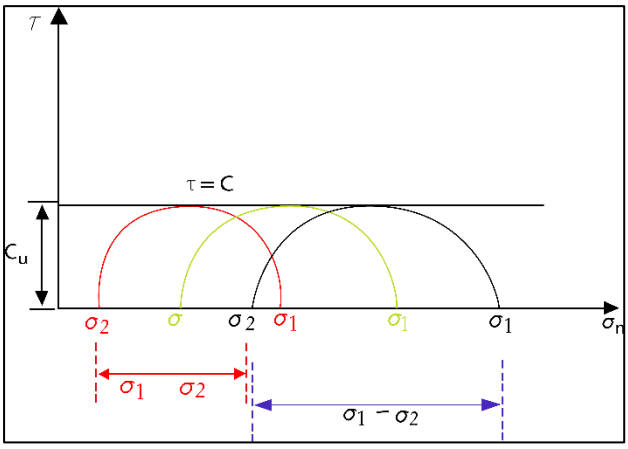
Koristi se za slabopropusne materijale kod kojih je process konsolidacije dugotrajan. Uzorak se prvo saturira, a zatim konsolidira uz otvoren ventil koji omogućuje dreniranje vode iz uzorka. Nakon toga slijedi posmik, u kojem se povećava opterećenje putem klipa koji s vrha ulazi u ćeliju tako da u uzorku dolazi do porasta pornog tlaka *u* uz zatvoren ventil. Kao rezultat toga, voda ne može izaći iz uzorka pa zbog toga ne dolazi do promjene volumena uzorka. Brzina nanošenja opterećenja ne bi smjela biti veća od 0,02% visine na minutu. Rezultati ispitivanja prikazani su na slici 9. Njihova interpretacija daje nedreniranu koheziju i nedreniran kut unutarnjeg trenja.



Slika 9. Rezultat konsolidiranog nedreniranog pokusa

3.1.3. Nekonsolidirani nedrenirani pokus

Naziva se brzim pokusom. Tipično za ovu vrstu pokusa je da su ventili za dreniranje i dodavanje pornog tlaka zatvoreni tijekom cijelog pokusa. U prvoj fazi, samo izotropni tlak u ćeliji koristi se za sprečavanje dreniranja, sva totalna izotropna naprezanja u ćeliji prenose se u međuprostor pa se tako sprečavaju varijacije u efektivnim naprezanjima unutar uzorka. Sam pokus izvodi se tako da se uzorak, kao i za ostale tipove pokusa, ugradi u troosnu ćeliju u kojoj se primijeni neko početno naprezanje σ_c. Ćelijski tlak djeluje preko membrane samo na povećanje pornog tlaka, a efektivno naprezanje se ne mijenja. Nakon ugradnje uzorak se ne konsolidira, već se odmah prelazi na posmik. U tom pokusu se ne mjere porni tlakovi. Rezultat takvih pokusa (Slika 10) je nedrenirana kohezija c_u. S obzirom da je anvelopa sloma horizontalna linija, kut unutarnjeg trenja φ jednak je nuli.



Slika 10. Rezultat nekonsolidiranog nedreniranog pokusa

3.2. TRIAKSIJALAN UREĐAJ

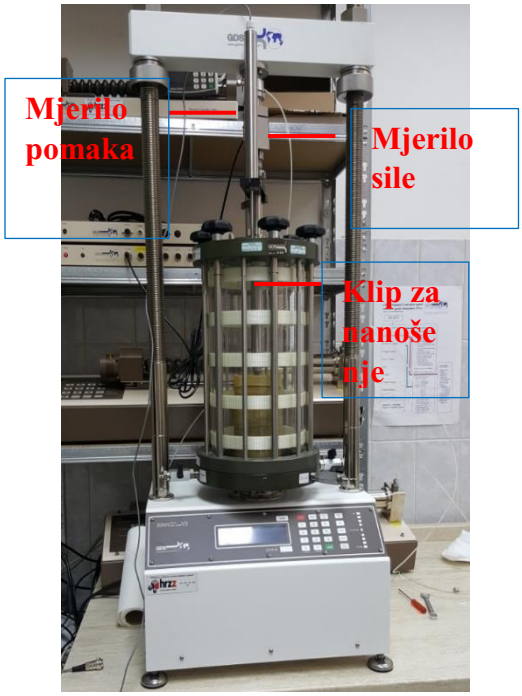
Triaksijalan aparat se u osnovi sastoji od hidrauličke preše na kojoj se nalazi triaksijalna ćelija. Osnovni dijelovi triaksijalnog aparata bit će opisani u sljedećim poglavljima.

3.2.1. POSTOLJE I ĆELIJA

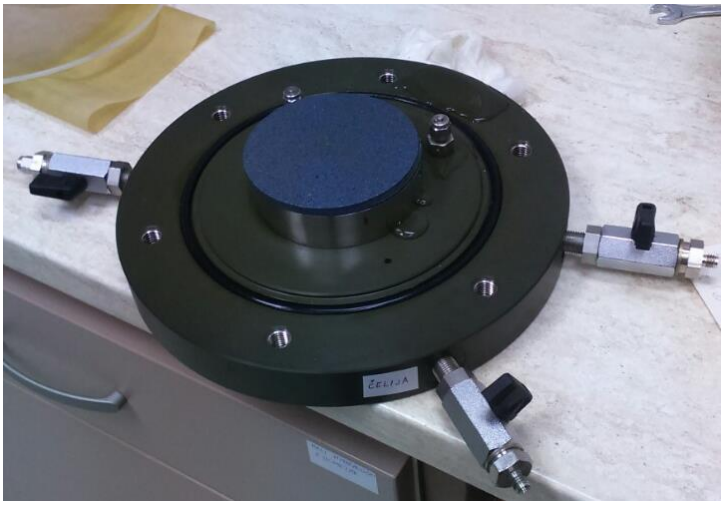
Na dnu triaksijalne ćelije nalazi se postolje sa pristupnim ventilima, a na kojem se ujedno nalazi i postolje za uzorak (Slika 11a i 11b). Nakon što se ugradi uzorak, montira se gornji dio ćelije koji je izgrađen od pleksiglasa te je s donjim dijelom pričvršćena vijcima te zajedno čine hemetički izoliran sustav. Ćelija s gornje strane ima ugrađen klip kojim se prenosi opterećenje na uzorak putem plastične kape. Uzimajući u obzir smanjenu visinu uzorka, standardna dužina klipa triaksijalne ćelije nije dostatna za nasjedanje na uzorak, tako da ova ćelija ima dvosruko duži klip za nanošenje osnog opterećenja od standardnog.

Dimenzije uzorka:

- 38 mm do 150 mm - sila od 50 kN
- 38 mm do 200 mm - sila od 150 kN
- 38 mm do 300 mm - sila od 250kN



Slika 11a. Triaksijalna ćelija



Slika 11b. Postolja za uzorak i ćeliju triaksijalnog uređaja

Tijekom pokusa će se triaksijalna ćelija unaprijed određenom brzinom dizati prema gore i kako će se ćelija pomicati prema gore, tako će se šipkom preko klipa nanositi opterećenje na uzorak i vršiti njegovo smicanje. Radi kontorole i upravljanja pokusom, triaksijalni uređaj opremljen je mjerilom sile i pomaka.

3.2.2. HIDRAULIČKE PUMPE

Pristupni ventili spojeni su silikonskim cjevčicama na pumpe (Slika 12) kojima je svrha prenošenje i reguliranje pritiska. Jedna cjevčica spojena je na pumpu sa uzorkom, a druga sa ćelijom. One kontroliraju pritiske u ćeliji i pritisak vode u uzorku. Osim toga mogu i mjeriti volumen vode. Pumpama upravlja koračni motor kojim se regulira gibanje klipa cilindra. Klip cilindra može se kretati dvosmjerno u ovisnosti da li se želi postići povećanje ili smanjenje pritiska. Maksimalni kapacitet cilindra pumpe iznosio je 2 dcl. Inače se te pumpe koriste za ispitivanje na tlima pa je ta količina vode dovoljna, ali za veće uzorke i poroznije uzorke poput otpada koji mogu sadržavati i znatno veće količine vode mogu se u simultani rad, radi osiguravanja potrebnog volumnog kapaciteta, upariti i dvije pumpe.

Zbog toga što je ispitani uzorak otpada bio znatno stišljiviji i porozniji u odnosu na standardne materijale koji se ispituju u triaksijalnom uređaju, tijekom pokusa hidrauličke pumpe „trošile“ su puno više vode nego što je njihov volumni kapacitet, pa su povremeno odlazile u tzv. limit state - granično stanje i pokus je privremeno stao.

Iako ova okolnost nema utjecaj na tijek i rezultate pokusa, sam pokus se može vremenski znatno odužiti više nego što je potrebno te je stoga svakako preporučljivo kod pokusa na stišljivim i poroznim uzorcima upariti dvije pumpe.



Slika 12. Hidraulička pumpa

Tehničke specifikacije pumpe:

- Mjerni raspon tlaka: 0 do 2 MPa
- Rezolucija - volumen: 0,1 mm^3
- Volumen klipa: 200 000 mm^3
- Masa: 17 kg

3.2.3. LOGGER

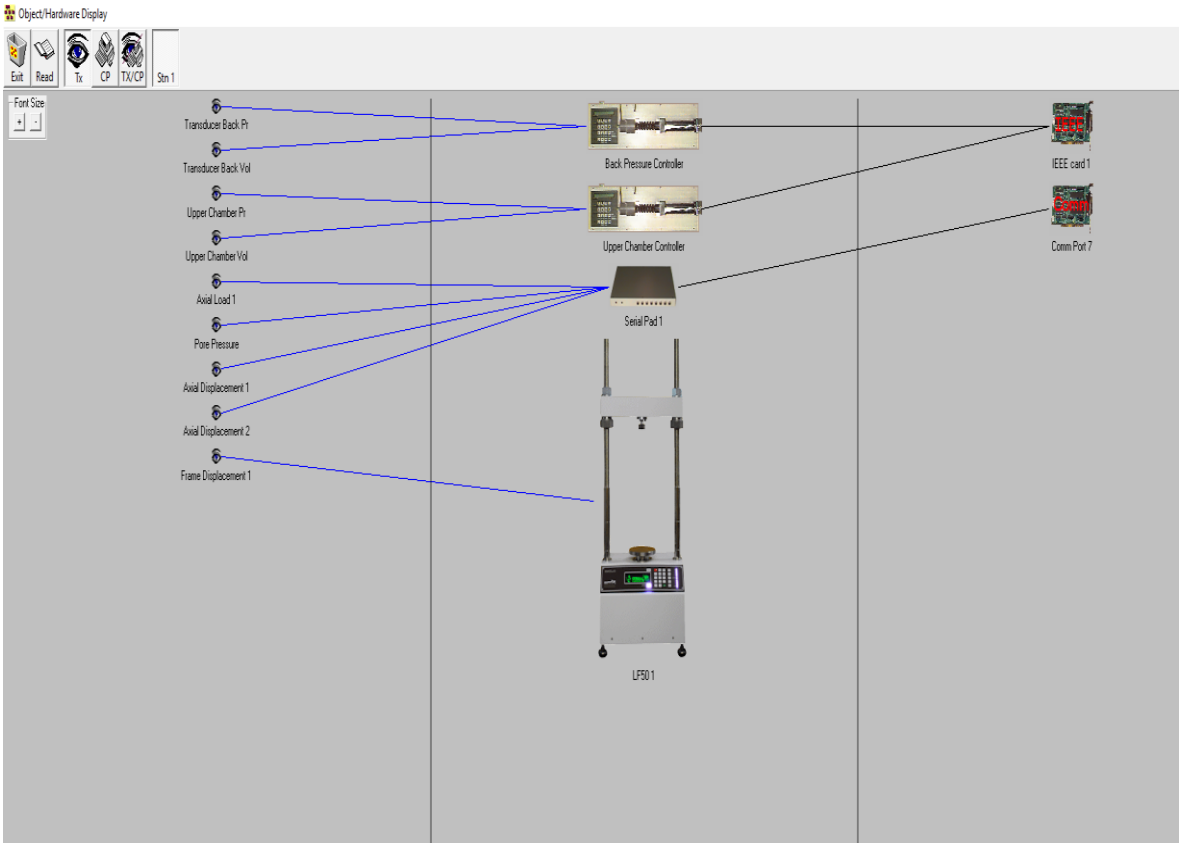
Logger ili uređaj za prikupljanje podataka s mjerila (Slika 13) koji su spojeni na njega. U slučaju triaksijalnog pokusa, to su mjerilo sile, mjerilo tlaka i mjerilo pomaka. Svrha mu je prikupljanje tih podataka i slanje istih na računalo koje ih trajno pohranjuje.



Slika 13. Logger

3.2.4. SOFTWARE

Software GDSLAB (Slika 14) koristi se za kontrolu i prikupljanje podataka za primjenu u geotehničkim laboratorijima i povezan je s loggerom. Služi za kontrolu i upravljanje triaksijalnim CD, CU i UU pokusom



Slika 14. Software

4. ISPITIVANJE UZORKA U TRIAKSIJALNOM UREĐAJU

Za ispitivanje je korišten uzorak komunalnog otpada koji je bio podvrgnut mehaničko-biološkoj obradi iz centra za gospodarenje otpadom Marišćina.

Postrojenje za mehaničko-biološku obradu otpada (MBO) dimenzionirano je za obradu do 100.000 tona komunalnog otpada godišnje. Postrojenje se sastoji od:

- Prihvatnog bunkera
- Mehaničke predobrade
- Biološke obrade

- Mehaničke rafinacije – proizvodnja goriva iz otpada (GIO - eng. SRF, Solid Recovered Fuel)

Nakon obrade čvrstog komunalnog otpada u MBO postrojenju, kao proizvod dobiva se sljedeće:

- Gorivo iz otpada (GIO visoke ili srednje/niske kvalitete)
- Korisni materijali za daljnju oporabu (željezni i neželjezni metali)
- Biorazgradivi materijal i škart, pogodni za proizvodnju bioplina.

U sklopu ovog rada ispitivan je uzorak otpada pogodan za proizvodnju bioplina.

4.1. PRIPREMA UZORKA

Najprije se odredi zatečena vlažnost uzorka na način da se izvaže posuda, a zatim posuda i vlažan uzorak (m_w) (Slika 15). Nakon toga slijedi sušenje uzorka na 24 h pri 60°C (Slika 16).



Slika 15. Vaganje posude i vlažnog uzorka



Slika 16. Sušenje uzoraka

Nakon sušenja, ponovno se važe posuda i suh uzorak (m_d). U tablici 3. Prikazane se izvagane mase i početna (zatečena) vlažnost uzorka otpada.

Tablica 3. Određivanje vlažnosti uzorka otpada

Uzorak broj	Tara	Tara + m_w	m_w	Tara + m_d	m_d	w	w_{sred}
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[%]	[%]
1	382	1109	727	1089	707	2,83	2,49
2	761	1446	685	1431	670	2,24	
3	980	1749	769	1731	751	2,1	

Masa vode dobije se tako da se od mase tare i vlažnog uzorka oduzme masa tare (izraz 10.).

$$m_w = m_{t+mw} - m_t \quad \text{(izraz 10.)}$$

Masa suhog uzorka dobije se tako da se od mase tare i suhog uzorka oduzme masa tare (izraz 11.).

$$m_d = m_{t+md} - m_t \quad \text{(izraz 11.)}$$

Vlažnost uzorka se računa prema izrazu:

$$w = \frac{m_w}{m_d} = \frac{m_w - m_d}{m_d} \quad \text{(izraz 12.)}$$

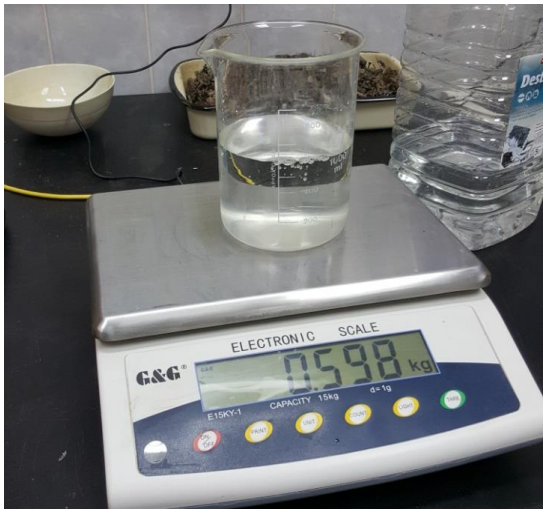
Radi bržeg zasićivanja uzorka, osušeni uzorak se pripremio u laboratoriju na početnu vlažnost od cca 60 %. Prema izrazu 13. se izračunava masa vode koja će se dodati uzorku.

$$w = 0{,}6 = \frac{m_w}{m_d} \quad \text{(izraz 13.)}$$

Za masu suhog uzorka od 0,997 kg slijedi da je masa vode jednaka umnošku vlažnosti i mase suhog uzorka (izraz 14.) iznosila 0,598 kg:

$$m_w = 0{,}6 \times m_d \quad \text{(izraz 14.)}$$

Ta masa vode se izvagala (Slika 17) i dodala uzorku, a koji se potom promiješao s ciljem homogenizacije uzorka (Slika 18), tj. da bi cijeli uzorak imao istu vlažnost.



Slika 17. Vaganje vode za vlaženje uzorka



Slika 18. Homogenizacija uzorka

Od sveukupne pripremljene količine uzorka otpada vlažnosti 60%, masa ugrađenog uzorka otpada u triaksijalnoj ćeliji iznosila je 574 g.

Volumen ugrađenog uzorka iznosio je:

$$V = r^2 \times \pi \times h = 5^2 cm \times \pi \times 9{,}83\ cm = 771{,}66\ cm^3$$

Prirodna gustoća uzorka iznosila je:

$$\rho = \frac{574\ g}{771{,}66\ cm^3} = 0{,}74\ g/cm^3$$

Gustoća suhog ugrađenog uzorka iznosila je:

$$\rho_d = \frac{\rho}{1+w} = \frac{0{,}74\ g/cm^3}{1+0{,}59} = 0{,}47 g/cm^3$$

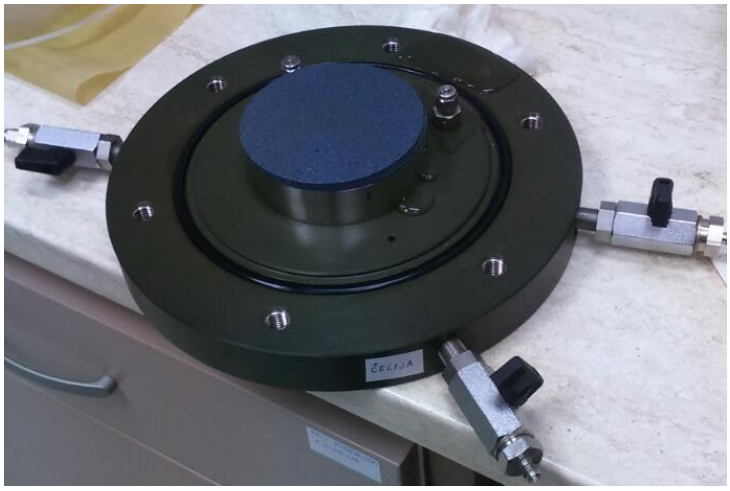
4.2 UGRADNJA UZORKA

Porozne pločice su sastavni dio triaksijalnog uređaja koji omogućava drenažu. Za njihovu pripremu potrebno ih je potopiti u vodi (Slika 19) da prilikom saturacije ne bi bilo zraka u porama poroznih pločica.



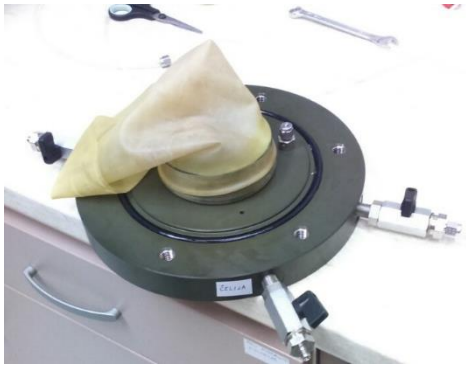
Slika 19. Potapanje poroznih pločica

Na kruto postolje sa pristupnim ventilima stavlja se postolje za uzorak. Na postolje za uzorak je stavljena porozna pločica (Slika 20) i na nju mokar filter papir da se spriječi ispiranje čestica uzorka.

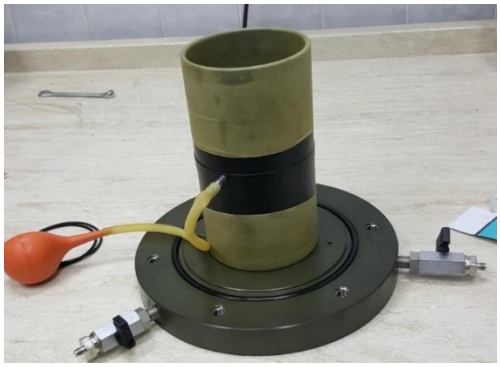


Slika 20. Priprema ugradnje uzorka

Stavlja se gumena membrana s ciljem razdvajanja vode iz uzorka i vode kojom će se puniti ćelija (Slika 21). S obzirom da je uzork rahli, ugrađuje se pomoćnim setom koji se sastoji od kalupa, vakuum pumpe i crijeva (Slika 22). Kalup se provlači kroz gumenu membranu pa se vakuum pumpom i crijevom, gumena membrana spoji s kalupom.



Slika 21. Postavljanje gumene membrane



Slika 22. Pomoćni set za ugradnju rahlog uzorka

Gumena membrana puni se uzorkom po slojevima debljine 2 cm koji se zbija utegom 8 do 10 udaraca da se dobije gušći uzorak (Slika 23). Omjer visine i promjera uzorka nakon ugradnje iznosio je 1:1.



Slika 23. Zbijanje uzorka utegom

Na ugrađeni uzorak je stavljen mokar filter papir, porozna pločica i plastična kapa za nanošenje pritiska (Slika 24). Slijedi zatvaranje uzorka sa ćelijom i postavljanje ćelije na postolje za ćeliju. Klip preko kojeg se prenosi opterećenje na uzorak spušta se do neposredne blizine s kapom (Slika 25).



Slika 24. Ugrađen uzorak



Slika 25. Ugrađen uzorak u triaksijalnoj ćeliji

Pumpe se spajaju na ćeliju kroz cjevčice. Jednom pumpom će se kontrolirati ćelijski pritisci, a drugom pritisak vode u uzorku. Osim pritiska, pumpe mogu mjeriti i volumen vode koja se gura u uzorak ili ako treba vodu izvući van. U ovom pokusu ćemo volumene mjeriti, a pritiske mjeriti i kontrolirati. Posljednje što se treba napraviti prije prve faze, saturiranja, potrebno je napuniti ćeliju deaeriranom vodom (Slika 26).



Slika 26. Punjenje ćelije vodom

4.3. POKUS

U fazi saturacije, diže se istovremeno pritisak u uzorku i pritisak u ćeliji. Povećavat će se ćelijski pritisak koji odgovara totalnom tlaku i tlaku vode u uzorku za iste inkremente što znači da će njihova razlika biti približno jednaka 0. Uzorak zasićujemo, pore se pune vodom, a istovremeno držimo efektivna naprezanja na 0 da ne dođe do deformacije uzorka. Pokus se pokreće preko računala. Potrebno mu je reći na koji način će se snimati podaci, da li je kapa uzorka u kontaktu s klipom, specifičnu gustoću, masu uzorka, promjer i visinu uzorka, vrstu pokusa. Stupanj zasićenosti provjerava se s tzv. "B check" postupkom. "B check" je zapravo postupak određivanja Skemptonovog parametra B. Skempton govori da je porast pornog tlaka jednak umnošku parametra B i prirasta ćelijskog pritiska (izraz 16.).

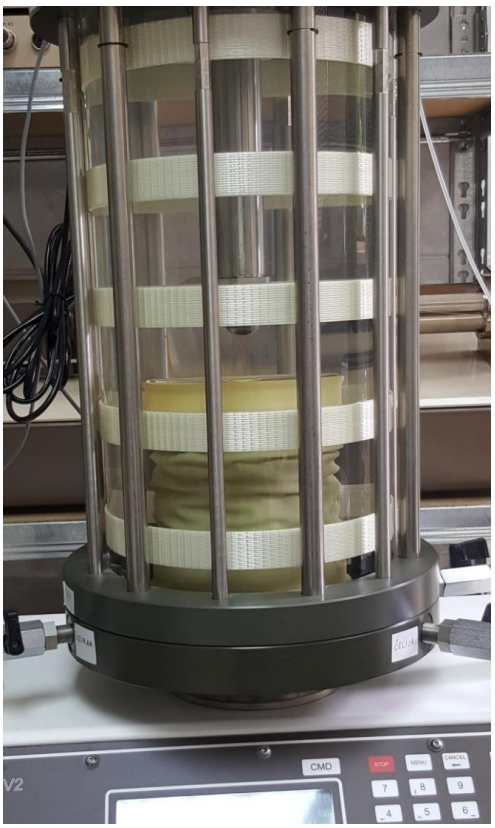
$$\Delta u = B \times \Delta\sigma \quad \text{(izraz 16.)}$$

Ako je stupanj zasićenosti 100 %, tada B mora biti jednak 1, jer će prirast pornog pritiska u uzorku biti jednak prirastu ćelijskog pritiska. To se radi na način da se poveća ćelijski pritisak i mjeri se porast pornog pritiska pa se računa B (izraz 17.).

$$B = {}^{\Delta u}/_{\Delta\sigma} \quad \text{(izraz 17.)}$$

Nakon prve faze saturacije uzorak je postigao zasićenje od 85 %, tj. Skemptonov parametar B iznosio je 0,85. Kako on nije iznosio minimalnu vrijednost 0,95, krenulo se sa drugom fazom zasićivanja. Prilikom drugog B check-a, stupanj saturacije iznosio je 0,95 pa se krenulo u drugu fazu pokusa, konsolidaciju (Slika 27). To znači da će se u drugoj fazi povećati ćelijski pritisak i dozvoliti istjecanje vode iz uzorka da se on slegne. S pumpom za ćelijski pritisak povećat će se ćelijski pritisak na 200 kPa, a pumpom za porni pritisak održavat će se porni pritisci na vrijednosti pornih pritisaka iz druge faze saturacije koji su iznosili 96 kPa.

Na slici 27. prikazano je slijeganje uzorka uslijed konsolidacije.



Slika 27. Slijeganje uzorka nakon konsolidacije

Kao što je već spomenuto, zbog velike stišljivosti uzorka, pumpa s kojom su regulirani porni pritisci je prilikom faze konsolidacije otišla u granični položaj. Tom prigodom pumpa je privremeno odspojena s ćelije kako bi se pripremila za nastavak pokusa te se pojavio jak neugodan miris procjedne vode iz uzorka. Utvrđeni pH procjedne tekućine iznosio je 5,63 što govori da se je procjedna voda agresivna i može uništiti pumpe pa je odlučeno da se u nastavku pokusa koristi toksična ćelija (Slika 28 i 29) s ciljem zaštite pumpe. Toksična ćelija se s jednom stranom spaja na uzorak, a drugom stranom na pumpu. Na taj način pumpa radi s čistom vodom jer su procjedna voda iz uzorka i voda iz pumpe razdvojene gumenom membranom.



Slika 28. Toksična ćelija



Slika 29. Toksična ćelija i procjedna voda iz uzorka

Nakon konsolidacije slijedila je posljednja faza pokusa, faza smicanja. Ćelijski pritisak ostao je isti, tj. 200 kPa, dok je brzina smicanja iznosila 0,1 mm/min što znači da će prešu dizati 0,1 mm u minuti. Na slici 29. prikazan je uzorak nakon smicanja na kojem se može vidjeti da prilikom smicanja nije došlo do njegova sloma i da deformacije nisu homogene, nego je uzorak poprimio bačvasti oblik.



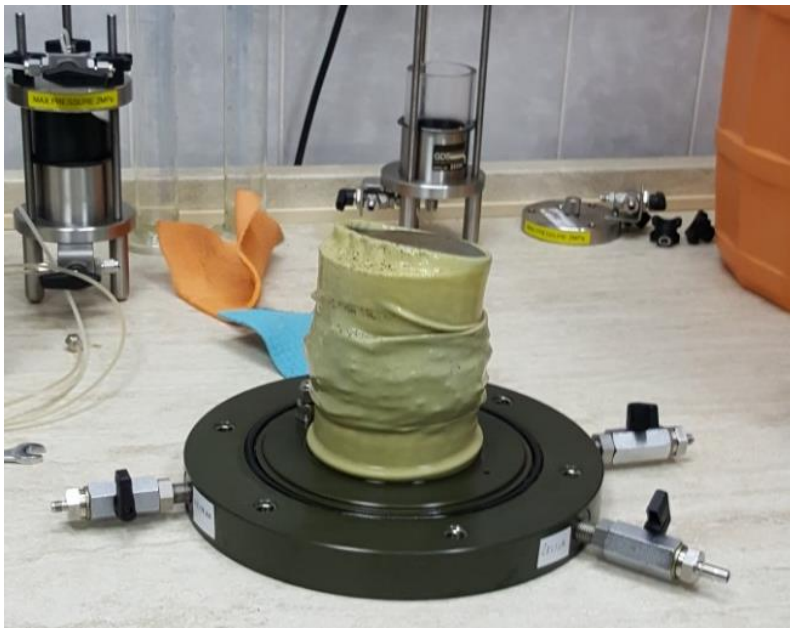
Slika 30. Uzorak nakon faze smicanja

Nakon toga ispustila se voda iz ćelije (Slika 31) i ista se rastavila.



Slika 31. Ispuštanje vode iz ćelije

Uzorak nakon ispitivanja prikazan je na slici 32.



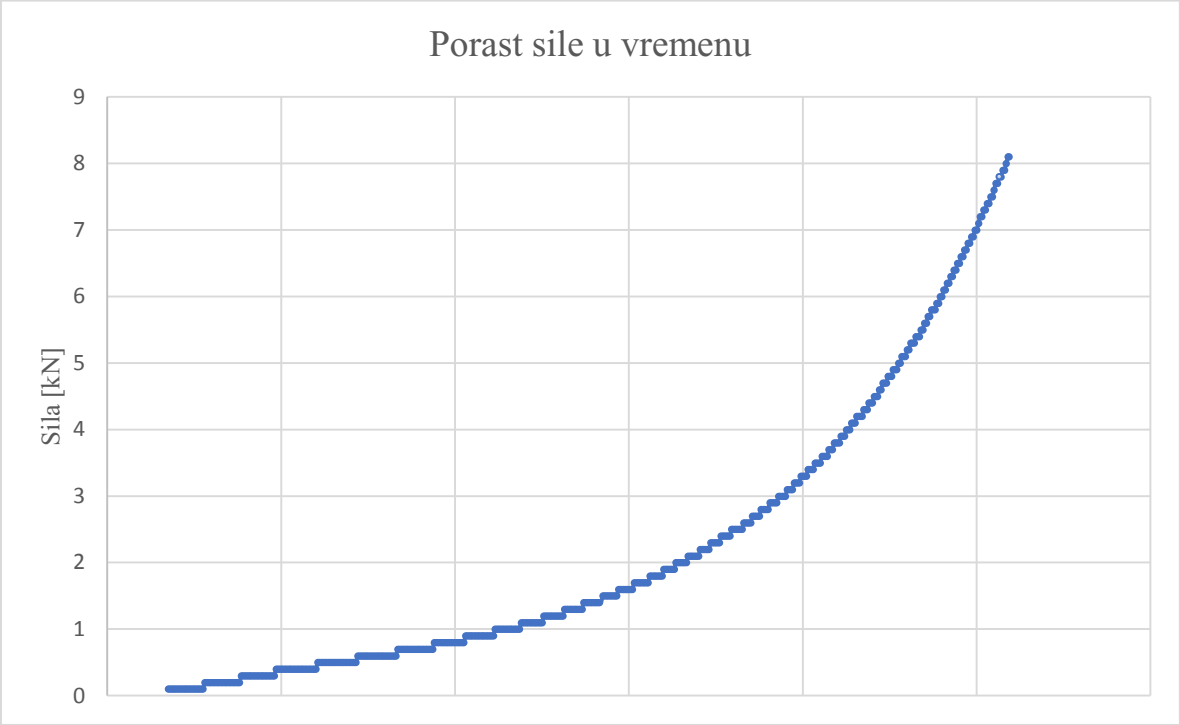
Slika 32. Uzorak nakon ispitivanja

4.4. REZULTATI POKUSA

U ovom radu prikazan je načelni postupak ispitivanja mehaničko-biološki obrađenog otpada u triaksijalnom uređaju. Prikazane su sve tri faze ispitivanja, i to postupak zasićivanja, konsolidacije i smicanja. Za potpunu interpretaciju rezultata posmične čvrstoće bilo bi potrebno izvršiti još minimalno dva pokusa pri različitim iznosima ćelijskih pritisaka.

Kao što se može uočiti sa slike 32, ispitivani mehaničko-biološki obrađeni otpad pokazao je svojstva deformacijskog očvršćivanja te unatoč velikom deformacijama nije došlo do sloma u uzorku, što je karakteristično ponašanje otpada i višestruko puta potvrđeno i od drugih istraživača, kao npr. [18].

Na dijagramu 1. prikazan je porast vertikalne sile tijekom faze smicanja. Budući da se raspon raspoloživog mjerila sile kreće u rasponu od 0 do 10 kN, pri iznosu od nešto više od 8 kN pokus je bio zaustavljen.



Dijagram 1. Porast vertikalne sile tijekom faze smicanja

5. ZAKLJUČAK

Prema odredbi Pravilnika o načinima i uvjetima odlaganja otpada, na odlagališta otpada dozvoljeno je odlaganje samo prethodno obrađenog otpada. Najčešća obrada komunalnog otpada je mehanički-biološka obrada koja podrazumijeva mehaničku obradu procesima sijanja, drobljenja, separacija pa sušenje u perforiranim betonskim bazenima s ciljem smanjenja vlage i volumena otpada.

Mehanički parametri otpada su stišljivost, bočna krutost i posmična čvrstoća otpada. Cilj ovog rada bio je prikazati postupak mjerenja parametara posmične čvrstoće u triaksijalnom uređaju. S obzirom da se najveći dio otpada odlaže na odlagališta, za njegovo projektiranje su potrebni ti podaci iz razloga jer je otpad jedan od sastavnog dijela odlagališta.

Jedan od laboratorijskog ispitivanja posmične čvrstoće otpada jest triaksijalno ispitivanje. Ono se sastoji od 3 faze, zasićivanja gdje se ćelijski i porni pritisci u uzroku drže istim i konstantnim do kada "B check" ne iznosi minimalno 0,95. Zatim kod konsolidacije se povećama ćelijki pritisak i dopušta se istjecanje porne vode pod pritiskom, jer se ovdje izvodio CU pokus. U posljednjoj fazi, fazi smicanja, uzorak se osno opterećuje do sloma. Triaksijalno ispitivanje je karakteristično za tla, ali se koristi i za ispitivanje na otpadu pa za sada ne postoji standardizirani postupak niti standardna oprema za određivanje mehaničkih parametara otpada. U ovom radu se pokazalo da se triaksijalnim ispitivanjem uzorak obrađenog otpada ne može dovesti do sloma, nego dolazi do nejednolike deformacije gdje uzorak poprima bačvasti oblik što otežava interpretaciju dobivenih rezultata mjerenja.

Kako su se promjenili standardni uvjeti ispitivanja, javljaju se određene specifčnosti u ispitivanju poput iskorištenja kapaciteta pumpa, jer je uzorak većih dimenzija, porozniji i

stišljiviji je od tla. Javlja se neugodan i jak miris prilikom otvaranja ventila i rastavljanja triaksijalne ćelije pa bi se trebalo imati bolju sanitarnu zaštitu za ispitivače.

Također je radi zaštite pumpi potrebno koristiti tzv. "toksične ćelije", a radi povećanja raspoloživog kapaciteta fluida preporučljivo je uparivati po dvije pumpe. Za ovakav način rada potrebno je osigurati minimalno četiri hidrauličke pumpe, što znatno poskupljuje provođenje samog pokusa, no time bi se osiguralo kontinuirano provođenje pokusa bez potrebe za ručnim podešavanjem pumpi tijekom pokusa.

Također je preporučljivo koristiti dvostruko duži klip za nanošenje opterećenja u triaksijalnoj ćeliji od standardnog, jer se promjenom omjera visine i promjera uzorka sa standardnih 2:1 na 1:1 "buckling" i "burreling" efekti, tj. efekti povezani s pojavom neuejdnačenih deformacija i bačvastog oblika uzorka otpada na ovaj način parcijalno reduciraju.

6. LITERATURA

1. Anić Vučinić A. (2015.). Gospodarenje otpadom. Geotehnički fakultet, Varaždin. Interna skripta

2. GDS Instruments. Dostupno na: https://www.gdsinstruments.com/ Korišteno: 15.05.2019.

3. Kavur, B. Nastavni materijali za kolegij Geotehničko-ekološki zahvati. Geotehnički fakultet u Varaždinu, ak.god. 2016/17.

4. Kvasnička, P. Mehanika tla. Rudarsko geološko naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2007.

5. Lade. V. P. Triaxial testing of soil. 2016.

6. Maksimović, M. M. Mehanika tla, 4. izdanje, AGM knjiga, Beograd, 2008.

7. Nonveiller, E.: Mehanika tla i temeljenje građevina, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Školska knjiga, Zagreb, 1979.

8. Strelec, S., Štuhec, D. Geotehnički laboratorij i primjena u inženjerskoj praksi. Interna skripta. Geotehnički fakultet, Varaždin, 2011.

9. Petrović I. Nastavni materijali za kolegij Tehnolgije obrade otpada. Geotehnički fakultet u Varaždinu, ak.god. 2018/19.

10. Petrović I. Nastavni materijali za kolegij Mehanika tla 1. Geotehnički fakultet u Varaždinu, ak.god. 2017/18.

11. Petrović I. Mini-review of the geotechnical parameters of municipal solid waste: MB-pre-treated vs. raw untreated waste. 2016.

12. Petrović, I. Problemi mehaničke sigurnosti na odlagalištima otpada. Građevinski fakultet. Sveučilište u Zagrebu. 2005.

13. Pravilnik o načinima i uvjetima odlaganja otpada. Narodne novine 114/2015. Dostupno na: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2015_10_114_2184.html Korišteno: 10.05.2019.

14. Roje – Bonacci, T.: Mehanika tla, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, Split, 2003.

15. Strategija gospodarenje otpadom. Narodne novine 130/2005). Dostupno na: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2005_11_130_2398.html Korišteno: 11.05.2019.

16. Što je cirkularna ekonomija i kako utječe na stvaranje novih radnih mjesta. Libertas. 2016. Dostupno na: https://www.libertas.hr/za-studente/sto-je-cirkularna-ekonomija-i-kako-utjece-na-novi-svjetski-poredak-i-stvaranje-novih-radnih-mjesta/ Korišteno: 2.5.2019.

17. Zakon o održivom gospodarenju otpadom. Narodne novine 94/13. Dostupno: https://www.zakon.hr/z/1897/Zakon-o-odr%C5%BEivom-gospodarenju-otpadom-2017-2019. Korišteno: 10.5.2019.

18. Jessberger, H.L.; Kockel, R.;: Determination and assessment of the mechanical properties of waste materials, Proceedings Sardinia 93, Fourth International Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, 11-15 October 1993, Vol.2, pp. 1383-1392, 1993.

19. Ziehmann, G.: Veraenderung des mechanischen Verhaltens durch die mechanische und biologische Vorbehandlung. Deponierung von vorbehandelten Siedlungsabfaellen, Veroeffentlichungen des Zentrums fuer Abfallforschung der Technischen Universitaet Braunschweig, Heft 14., 1999.

Popis slika

Slika 3. Mohr-ov dijagram naprezanja i anvelopa sloma

Slika 4. Oblici sloma uzorka

Slika 3. Model posmične čvrstoće za otpad

Slika 4. Parametri posmične čvrstoće mehanički-biološkog tretiranog otpada i sirovog netretiranog komunalnog otpada (Petrović, 2016)

Slika 5. Izvijanje uzorka (Lade, 2016)

Slika 6. Bačvasto deformiranje uzorka (Lade, 2016)

Slika 7. Stanje naprezanja u uzorku kod troosnog ispitivanja (Strelec i Štuhec, 2011)

Slika 8. Rezultat konsolidiranog dreniranog pokusa

Slika 9. Rezultat konsolidiranog nedreniranog pokusa

Slika 10. Rezultat nekonsolidiranog nedreniranog pokusa

Slika 11a. Triaksijalna ćelija

Slika 11b. Postolja za uzorak i ćeliju triaksijalnog uređaja

Slika 12. Hidraulička pumpa

Slika 13. Logger

Slika 14. Software

Slika 15. Vaganje posude i vlažnog uzorka

Slika 16. Sušenje uzoraka

Slika 17. Vaganje vode za vlaženje uzorka

Slika 18. Homogenizacija uzorka

Slika 19. Potapanje poroznih pločica

Slika 20. Priprema ugradnje uzorka

Slika 21. Postavljanje gumene membrane

Slika 22. Pomoćni set za ugradnju rahlog uzorka

Slika 23. Zbijanje uzorka utegom

Slika 24. Ugrađen uzorak

Slika 25. Ugrađen uzorak u triaksijalnoj ćeliji

Slika 26. Punjenje ćelije vodom

Slika 27. Slijeganje uzorka nakon konsolidacije
Slika 28. Toksična ćelija
Slika 29. Toksična ćelija i procjedna voda iz uzorka
Slika 30. Uzorak nakon faze smicanja
Slika 31. Ispuštanje vode iz ćelije
Slika 32. Uzorak nakon ispitivanja

Popis tablica

Tablica 4. Geotehnička klasifikacija otpada (Kavur, 2016)
Tablica 5. Parametri čvrstoće otpada s obzirom na obradu (Ziehmann, 1999)
Tablica 6. Određivanje vlažnosti uzorka otpada