

UNIVERZITET U BEOGRADU
RUDARSKO-GEOLOŠKI FAKULTET

Dragoslav R. Rakić

**KONSTITUTIVNE ZAVISNOSTI
KOMUNALNOG OTPADA SA DEPONIJAMA
U SRBIJI**

doktorska disertacija

Beograd, 2013

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MINING AND GEOLOGY

Dragoslav R. Rakić

**CONSTITUTIVE RELATIONS OF
LANDFILL MUNICIPAL WASTE IN
SERBIA**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2013

Mentor: Prof. dr Vladica Cvetković, redovni profesor,
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

Članovi Prof. dr Laslo Čaki, vanredni profesor
komisije: Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

Dr Gordana Hadži-Niković, docent
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

Dr Nenad Šušić, naučni savetnik
Institut za ispitivanje materijala – IMS, Beograd

Datum
odbrane: _____

ZAHVALNICA

Ovim putem izražavam iskrenu i najtopliju zahvalnost članovima komisije:

Mentoru Prof. Dr Vladici Cvetkoviću, na podršci i razumevanju, pozitivnom pristupu prilikom odobravanja teme i stvaranju opštih uslova za realizaciju disertacije.

Prof. Dr Laslu Čakiju, na njegovoj prijateljskoj podršci, nesebičnom angažovanju i uloženom trudu u svim fazama izrade ove disertacije. Posebno želim da istaknem pruženu pomoć tokom laboratorijskih ispitivanja, gde su njegov rad, predlozi, nove i interesantne ideje, diskusije tokom tumačenja i interpretacije dobijenih rezultata, znatno doprineli da disertacija dobije ovaj sadržaj i formu. Njegovi saveti su mi znatno pomogli u prevazilaženju mnogih problema i nedoumica.

Dr Nenadu Šušiću, na dugogodišnjoj uspešnoj naučnoj i stručnoj saradnji kao i pomoći koja se odnosi na deo laboratorijskih ispitivanja koja su obavljena u Institutu za ispitivanje materijala Srbije – IMS u Beogradu.

Želim ovim putem da izrazim i posebnu zahvalnost Prof. Dr Slobodanu Ćoriću, na beskrajnoj brizi i motivaciji tokom izrade ovog rada, na strpljivom čitanju rada, na tome što je svoje vreme često delio sa mnom i što mi je dobronamernim sugestijama pomogao da neke probleme bolje sagledam. Profesoru se zahvaljujem i na ulozi u mom celokupnom naučno-istraživačkom i stručnom usavršavanju.

Posebnu zahvalnost dugujem Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja, koje je finansirajući projekat tehnološkog razvoja TR 36014, značajno pomoglo da se uradi ova doktorska disertacija.

Na kraju, najveću zahvalnost dugujem mojoj porodici, supruzi Danijeli i sinovima Aleksi i Vukašinu, jer su bili uskraćeni za vreme koje sam posvetio izradi ovog rada. Oni se zbog toga nisu u svemu slagali sa mnom i nisu uvek klimali glavom, ali kada mi je bio potreban mir, ljubav i sreća, to sam od njih uvek dobijao.

KONSTITUTIVNE ZAVISNOSTI KOMUNALNOG OTPADA SA DEPONIJAMA U SRBIJI

Rezime:

U disertaciji su prikazani rezultati laboratorijskih ispitivanja uzoraka komunalnog otpada dobijeni u aparatima za direktno smicanje i edometarskim aparatima (jedan edometarski aparat konstruisan je za potrebe ove disertacije). Sva ispitivanja su izvršena na veštački pripremljenim uzorcima, uz uvažavanje preporuka koje se odnose na dimenzije korišćenih aparata i veličinu najvećih frakcija u uzorku (EN 1997-2, ASTM 2007-a, 2007-b). Za formiranje uzoraka korišćen je komunalni otpad različite starosti, uzet sa dve deponije u Srbiji (Ade Huje u Beogradu i gradske deponije u Novom Sadu).

Interpretacija rezultata dobijenih iz opita direktnog smicanja, obavljena je korišćenjem pravolinijske (Kulon-Mor-Tercagijeve jednačine čvrstoće smicanja) i krivolinijske anvelope loma pomoću logaritamske funkcije, a po prvi put je za komunalni otpad definisana i krivolinijska anvelopa loma preko hiperboličke funkcije. Kako su ispitivanja vršena na komunalnom otpadu različite starosti, zaključeno je da sa degradacijom opada i čvrstoća smicanja.

Na osnovu dobijenih rezultata iz edometarskih opita, određene su: minimalne i maksimalne vrednosti indeksa sekundarne kompresije (C_{α}) i modifikovanog indeksa sekundarne kompresije (C_{α}'), indeksa primarne kompresije (C_c) i modifikovanog indeksa primarne kompresije (C_c') kao i modula stišljivosti (M_v).

Verifikacija parametara čvrstoće smicanja i deformabilnosti, obavljena je na osnovu poređenja sa rezultatima koji su prikazani u literaturi. Uspostavljene zavisnosti koje se odnose na čvrstoću smicanja, prikazane u vidu pravolinijske ili krivolinijskih funkcija logaritamskog i hiperboličkog oblika, dale su dobro slaganje pri normalnim efektivnim naponima $\sigma'_n < 150$ kPa. Na osnovu toga, predloženo je njihovo korišćenje u analizama nosivosti i stabilnosti kosina komunalnih deponija u Srbiji, čija visina ne prelazi 10-15 m. Za komunalne deponije većih visina, preporučena je krivolinijska anvelopa loma hiperboličkog oblika.

Za verifikaciju parametara stišljivosti, iskorišćena je zavisnost koju je predložio Sowers (1973), a odnosi se na vezu indeksa primarne i sekundarne kompresije i početnog

koeficijenta poroiznosti. U disertaciji je po prvi put, za komunalni otpad uspostavljena i zavisnost između modifikovanih indeksa primarne (C_c') i sekundarne kompresije $(C_{\alpha}')_{\max}$ i $(C_{\alpha}')_{\min}$. Osim toga, je konstatovana tendencija porasta vrednosti indeksa sekundarne kompresije, sa povećanjem vertikalnog efektivnog napona. Na osnovu toga je zaključeno da primena konstantne vrednosti ovog indeksa, može za posledicu da ima nerealan proračun sleganja deponije. Stoga je uspostavljena nelinearna zavisnost i analitički je definisana pravouglom hiperbolom, posebno za maksimalni a posebno za minimalni indeks sekundarne kompresije.

Primenom različitih modela, koji se najčešće koriste za prognozu sleganja deponija komunalnog otpada, izvršena je validacija parametara deformabilnosti. Validacija je obavljena na osnovu poređenja sračunatih sleganja sa geodetski izmerenim sleganjima repera postavljenih na temeljima administrativno-tehničkog objekta izgrađenog na prostoru komunalne deponije u Novom Sadu (merjenja su obavljena od 2003. do 2010). Poređenjem merenih i sračunatih sleganja, primenom modela u kojima su figurisali parametri dobijeni laboratorijskim ispitivanjima komunalnog otpada sa analizirane lokacije, dobijena su zadovoljavajuća sleganja. Međutim, obavljena analiza sleganja pomoću modela u kojima su figurisali parametri koji nisu obuhvaćeni ovim istraživanjima, već su njihove vrednosti usvojene na osnovu preporuka autora modela, ukazala je na značajne razlike izmerenih i sračunatih vrednosti. Na osnovu toga, zaključeno je da ne postoje opšte prihvaćeni parametri deformabilnosti komunalnog otpada koji se mogu uspešno iskoristiti u modelima za prognozu sleganja. Oni se razlikuju od lokacije do lokacije i za njihovo određivanje neophodna su dugoročna laboratorijska i/ili terenska ispitivanja komunalnog otpada različitog sastava i starosti, praćena merenjima sleganja na konkretnim deponijama.

Ključne reči: komunalni otpad, deponija, geotehnička klasifikacija, čvrstoća smicanja, deformabilnost, indeks primarne kompresije, indeks sekundarne kompresije, modeli sleganja

Naučna oblast: Geološko inženjerstvo

Uža naučna oblast: Geotehnika

UDK: 624.13:628.4(497.11)(043.3)

CONSTITUTIVE RELATIONS OF LANDFILL MUNICIPAL WASTE IN SERBIA

Summary:

This thesis summarizes laboratory results for municipal waste direct shear and consolidation tests (an oedometer designed for tests performed in this dissertation). Each sample tested was prepared artificially in line with the recommendations for sizes of the apparatus used and the largest particles in a sample (EN 1997-2, ASTM 2007a, 2007b). Municipal waste for test samples varies in age, taken from two landfills in Serbia (Ada Huja at Belgrade and urban landfill at Novi Sad).

The obtained direct shear test results are interpreted using the linear (Coulomb-Mohr-Therzagi shear strength equation) and the nonlinear failure envelope with the logarithmic function and, for the first time for municipal waste, a nonlinear failure envelope was determined with the hyperbolic function. Tests on municipal waste of different age indicated that shear strength is decreasing with the advanced degradation.

The oedometer test results were used to determine the ranges of secondary compression index (C_α) and modified secondary compression index (C'_α), primary compression index (C_c) and modified primary compression index (C'_c), and modulus of compressibility (M_v).

The shear strength and deformability parameters were compared for verification to relevant data in published literature. The established shear strength relations, represented by linear and nonlinear functions in logarithmic and hyperbolic shapes, were in good agreement at normal effective stresses, $\sigma'_n < 150$ kPa. On this basis, the functions are recommended in considerations of slope stability and bearing capacity calculations for landfills 10-15 metres high in Serbia. For higher landfills, the hyperbolic failure envelope is recommended.

For verification of the compressibility parameters, the relation proposed by Sowers (1973) was used, which relates primary and secondary compression indices to the initial

void ratio. The relation between the modified indices of primary (C_c') and secondary compression, $(C_\alpha')_{\max}$ and $(C_\alpha')_{\min}$ is established for the first time in this thesis for municipal waste. The growth of secondary compression index with the increasing vertical effective stress also has been recorded and inferred that the use of a single value may lead to an incorrect estimate of the waste settlement. Because of that, a nonlinear analytical correlation is determined and represented by a right-angle hyperbola, for the maximum and for the minimum secondary compression indices separately.

Different conventional models for prediction of municipal waste settlement were used in validation of the stress-strain parameters for which certain constitutive relations were established. The validation is based on the comparison of analytical computed and surveying measured settlements of the bench marks fixed on the foundations of administrative-technical building at the Novi Sad landfill (measurements from 2003 to 2010). The agreement of the measured and calculated settlements, based on the laboratory test data for the Novi Sad landfill, was satisfactory. However, settlement analyses which were based not on this investigation but on the models with the parameters recommended by the model authors indicated higher difference between the measurements and the calculations. On the basis of that, it can be concluded that there are no waste deformability parameters generally applicable in the waste settlement prediction models. The parameters vary from one landfill to another and their determination requires long laboratory tests of municipal wastes different in composition and age, and measurements in situ at designated landfills.

Key words: municipal waste, landfill, geotechnical classification, shear strength, deformability, primary compression index, secondary compression index, models of settlement

Scientific field: Geological Engineering

Narrower scientific field: Geotechnics

UDC: 624.13:628.4(497.11)(043.3)

SADRŽAJ

SPISAK TABELA	v-vii
----------------------	-------

SPISAK SLIKA	viii - xxii
---------------------	-------------

POGLAVLJE 1. UVOD	1
--------------------------	---

1.1 Predmet i cilj istraživanja	2
1.2 Metode istraživanja	4
1.3 Primena rezultata istraživanja	5
1.4 Organizacija disertacije	7

POGLAVLJE 2. DEPONIJIA KOMUNALNOG OTPADA – INŽENJERSKA GRAĐEVINA	10
---	----

2.1 Geometrijske konfiguracije deponija	13
2.2 Konstruktivni elementi komunalnih deponija	16
2.3 Osnovni geotehnički problemi na deponijama	18
2.4 Zaključak	23

POGLAVLJE 3. OSNOVNI POKAZATELJI FIZIČKOG STANJA KOMUNALNOG OTPADA	24
---	----

3.1 Opšte o odnosu faza u komunalnom otpadu	24
3.2 Vlažnost	27
3.3 Sadržaj organskih materija	32
3.4 Zapreminska težina	36
3.5 Specifična težina	43
3.6 Poroznost	45
3.7 Granulometrijski sastav	47
3.8 Vodopropustljivost	52
3.9 Zaključak	54

POGLAVLJE 4. GEOTEHNIČKA KLASIFIKACIJA KOMUNALNOG OTPADA	56
<hr/>	
4.1 Sastav komunalnog otpada	57
4.2 Geotehnička klasifikacija komunalnog otpada	61
4.2.1 Pregled literaturnih podataka	61
4.2.2 Opšta metodologija formiranja geotehničke klasifikacije komunalnog otpada	67
4.2.3 Osnovni elementi sistema geotehničke klasifikacije	69
4.2.3.1 Izdvajanje komponenata po vrsti materijala	69
4.2.3.2 Mehaničke osobine izdvojenih grupa materijala	69
4.2.3.3 Oblik izdvojenih komponenata	70
4.2.3.4 Izdvajanje otpada po krupnoći	71
4.3 Rezultati klasifikacije otpada sa deponija u Srbiji	72
4.3.1 Opšte o sastavu otpada na komunalnim deponijama u Srbiji	72
4.3.2 Opis deponija sa kojih su uzeti uzorci za ispitivanje	76
4.3.3 Izbor uzoraka	80
4.3.4 Razvrstavanje otpada	82
4.3.5 Predlog geotehničke klasifikacije otpada	85
4.4 Zaključak	99
POGLAVLJE 5. NAPONSKO-DEFORMACIJSKE KARAKTERISTIKE KOMUNALNOG OTPADA	101
<hr/>	
5.1 Opšte o modelima tla	102
5.1.1 Elastični modeli	103
5.1.2 Elasto-plastični modeli	109
5.1.3 Plastični modeli	115
5.2 Opšte o konstitutivnim modelima komunalnog otpada	118
5.2.1 Konstitutivni model Machado i dr. (2002)	121
5.2.2 Konstitutivni model Babu i dr. (2010)	125
5.3 Zaključak	128
POGLAVLJE 6. ČVRSTOĆA SMICANJA KOMUNALNOG OTPADA	130
<hr/>	
6.1 Opšte o čvrstoći smicanja	131
6.2 Faktori koji utiču na čvrstoću smicanja komunalnog otpada	136
6.2.1 Heterogenost	137
6.2.2 Struktura	138

6.2.3	Sastav	139
6.2.4	Degradacija	140
6.2.5	Debljina nadsloja – efekat normalnih napona	142
6.2.6	Način odlaganja	143
6.2.7	Veličina i oblik čestica	144
6.2.8	Fazni sastav	144
6.2.9	Armirajuće čestice	148
6.3	Literaturni podaci ispitivanja čvrstoće smicanja	154
6.3.1	Literaturni podaci vezani za laboratorijska i in situ ispitivanja	154
6.3.1.1	Opiti direktnog smicanja	154
6.3.1.2	Triaksijalni opiti	178
6.3.1.3	Opiti izvedeni na terenu	191
6.3.2	Literaturni podaci vezani za podatke dobijene povratnim analizama	192
6.4	Metode i program ispitivanja	199
6.4.1	Metode ispitivanja	199
6.4.2	Program laboratorijskih ispitivanja	203
6.4.2.1	Kvalitet uzorka	203
6.4.2.2	Priprema uzorka	205
6.4.2.3	Postupak ispitivanja	209
6.5	Prikaz rezultata ispitivanja	210
6.5.1	Prikaz rezultata ispitivanja uzoraka iz serije A	210
6.5.2	Prikaz rezultata ispitivanja uzoraka iz serije B	215
6.5.3	Prikaz rezultata ispitivanja uzoraka iz serije C	216
6.5.4	Prikaz rezultata ispitivanja uzoraka iz serije D	224
6.5.5	Opšti komentari rezultata ispitivanja	228
6.6	Interpretacija rezultata ispitivanja	236
6.6.1	Kriterijumi loma	237
6.6.1.1	Kulon-Mor-Tercagijevi parametri čvrstoće smicanja	237
6.6.1.2	Krivolinijski oblik jednačine čvrstoće smicanja	255
6.6.1.2.1	Interpretacija rezultata ispitivanja primenom anvelope loma logaritamskog oblika	257
6.6.1.2.2	Interpretacija rezultata ispitivanja primenom anvelope loma hiperboličkog oblika	273
6.7	Zaključak	288
POGLAVLJE 7. DEFORMABILNOST KOMUNALNOG OTPADA		292
7.1	Parametri deformabilnosti komunalnog otpada	293
7.1.1	Modul elastičnosti	293
7.1.2	Parametri stišljivosti	294
7.1.2.1	Modul stišljivosti	294
7.1.2.2	Indeks primarne kompresije	297

7.1.2.3	Modifikovani indeks primarne kompresije	299
7.1.2.4	Indeks sekundarne kompresije	300
7.1.2.5	Modifikovani indeks sekundarne kompresije	303
7.2	Metode i program ispitivanja	305
7.2.1	Metode ispitivanja sa opisom aparata za izvođenje opita	305
7.2.2	Program laboratorijskih ispitivanja	310
7.2.2.1	Priprema uzoraka	310
7.2.2.2	Postupak ispitivanja	312
7.3	Prikaz rezultata ispitivanja	314
7.3.1	Prikaz rezultata ispitivanja uzoraka serije A	315
7.3.1.1	Indeks i modifikovani indeks sekundarne kompresije	320
7.3.1.2	Indeks i modifikovani indeks primarne kompresije	322
7.3.1.3	Modul stišljivosti	324
7.3.2	Prikaz rezultata ispitivanja uzoraka serije B	325
7.3.2.1	Indeks i modifikovani indeks sekundarne kompresije	326
7.3.2.2	Indeks i modifikovani indeks primarne kompresije	332
7.3.2.3	Modul stišljivosti	334
7.3.3	Prikaz rezultata ispitivanja uzoraka serije C	336
7.3.3.1	Indeks i modifikovani indeks sekundarne kompresije	336
7.3.3.2	Indeks i modifikovani indeks primarne kompresije	338
7.3.3.3	Modul stišljivosti	340
7.4	Zaključak	341
POGLAVLJE 8. VERIFIKACIJA REZULTATA ISPITIVANJA		344
8.1	Verifikacija čvrstoće smicanja	344
8.1.1	Pravolinijska Kulon-Mor-Tercagijeve jednačina čvrstoće smicanja	345
8.1.2	Verifikacija pravolinijske Kulon-Mor-Tercagijeve jednačine čvrstoće smicanja	348
8.1.3	Krivolinijski oblici jednačine čvrstoće smicanja	351
8.1.4	Verifikacija krivolinijskih oblika jednačine čvrstoće smicanja	358
8.2	Verifikacija parametara stišljivosti	361
8.2.1	Zavisnost indeksa i modifikovanog indeksa primarne kompresije (C_c, C'_c) od koeficijenta poroznosti	362
8.2.2	Zavisnost indeksa i modifikovanog indeksa sekundarne kompresije (C_s, C'_s) od koeficijenta poroznosti	365
8.2.3	Odnos modifikovanih indeksa sekundarne i primarne kompresije	371
8.2.4	Zavisnost indeksa sekundarne kompresije od vertikalnih efektivnih napona	374
8.2.5	Verifikacija modula stišljivosti (M_v)	379
8.3	Zaključak	382

POGLAVLJE 9. REZULTATI ISTRAŽIVANJA U ANALIZI SLEGANJA DEPONIIJA KOMUNALNOG OTPADA 386

9.1	Mehanizam sleganja deponija komunalnog otpada	387
9.1.1	Opšte o sleganju komunalnog otpada	387
9.1.2	Faze i mehanizam sleganja komunalnog otpada	394
9.2	Modeli sleganja komunalnog otpada	398
9.2.1	Modeli zasnovani na teoriji konsolidacije	399
9.2.2	Empirijski modeli	404
9.2.3	Reološki modeli	410
9.2.4	Biloški modeli	412
9.3	Validacija parametara deformabilnosti korišćenjem različitih modela u analizi sleganja komunalnog otpada	420
9.3.1	Opšte karakteristike lokacije sa rezultatima geodetskih osmatranja	420
9.3.2	Modeli zasnovani na teoriji konsolidacije	425
9.3.2.1	Model Sowers-a	425
9.3.1.2	Model Bjarngard i Edgers-a	426
9.3.3	Empirijski modeli	428
9.3.3.1	Logaritamska funkcija (Yen i Scanlon, 1975)	428
9.3.3.2	Eksponecijalna funkcija puzanja (El-Fadel i dr., 1999)	428
9.3.3.3	Hiperbolička funkcija (Ling i dr., 1998)	429
9.3.3.4	Komentar korišćenja empirijskih modela	429
9.3.4	Reološki model	430
9.3.5	Biloški model	431
9.3.6	Analiza dobijenih rezultata	432
9.4	Zaključak	435

POGLAVLJE 10. ZAKLJUČAK 438

LITERATURA 445

BIOGRAFIJA

SPISAK TABELA

Poglavlje 2. DEPONIJA KOMUNALNOG OTPADA – INŽENJERSKA GRAĐEVINA

Tabela 2.1 Osnovne fizičko-mehaničke karakteristike komunalnog otpada neophodne za projektovanje (Dixon i Jones, 2005)

Poglavlje 3. OSNOVNI POKAZATELJI FIZIČKOG STANJA KOMUNALNOG OTPADA

Tabela 3.1 Definisane najbitnijih fizičkih pokazatelja komunalnog otpada

Tabela 3.2 Intervali vlažnosti komunalnog otpada na deponijama

Tabela 3.3 Prosečne vlažnosti i maseno učešće izdvojenih komponenti komunalnog otpada

Tabela 3.4 Zapreminske težine svežeg otpada u zavisnosti od zbijenosti (Fassett i dr., 1994)

Tabela 3.5 Prosečne zapreminske težine komunalnog otpada

Tabela 3.6 Prosečne vrednosti osnovnih pokazatelja faznog sastava

Tabela 3.7 Prikaz publikovanih podataka vezanih za koeficijent filtracije

Poglavlje 4. GEOTEHNIČKA KLASIFIKACIJA KOMUNALNOG OTPADA

Tabela 4.1 Katalog sortiranja komunalnog otpada (European Commission, 2004)

Tabela 4.2 Pregled postojećih sistema klasifikacije otpada (Langer, 2005; Rakić, 2013)

Tabela 4.3 Vizuelna procena oblika čestica izdvojenih materijala

Tabela 4.4 Predlog grupisanja materijala prema mehaničkim karakteristikama

Tabela 4.5 Grupisanje materijala prema sadržaju armirajućih komponenti

Tabela 4.6 Grupisanje materijala prema sadržaju nestišljivih materijala

Tabela 4.7 Grupisanje materijala prema sadržaju stišljivih materijala

Tabela 4.8 Predložena klasifikacija otpada prema mehaničkim karakteristikama – Ada Huja

Tabela 4.9 Predložena klasifikacija otpada prema mehaničkim karakteristikama – Novi Sad

Tabela 4.10 Pretpostavke za definisanje stanja komponenata u odnosu na faze odlaganja

Tabela 4.11 Stanje komponenata u odnosu na faze odlaganja za otpad sa deponija u Srbiji

Poglavlje 5. TEORIJSKE OSNOVE NAPONSKO-DEFORMACIJSKIH VEZA

Tabela 5.1 Parametri konstitutivnog modela komunalnog otpada na osnovu objavljenih rezultata (Carvalho i Vilar, 1999)

Poglavlje 6. ČVRSTOĆA SMICANJA KOMUNALNOG OTPADA

Tabela 6.1 Parametri čvrstoće smicanja prema sadržaju deformabilnih komponenti (Langer, 2005)

Tabela 6.2 Parametri čvrstoće smicanja iz opita direktnog smicanja

Tabela 6.3 Parametri čvrstoće smicanja određeni triaksijalnim ispitivanjima

Tabela 6.4 Terenski i laboratorijski podaci sa preporukama parametara čvrstoće smicanja (Kavazanjian i dr. 1995)

Tabela 6.5 Ugao unutrašnjeg trenja na kosinama postojećih deponija (Kavazanjian i dr. 1995)

Tabela 6.6 Parametri čvrstoće smicanja dobijeni povratnim analizama i na osnovu predloga autora

Tabela 6.7 Rezultati ispitivanja uzoraka iz serije A – otpad sa deponije Ada Huja

Tabela 6.8 Rezultati ispitivanja uzoraka iz serije B – otpad sa deponije Novi Sad

Tabela 6.9 Rezultati ispitivanja uzoraka iz serije C – izmešan otpad sa obe deponije

Tabela 6.10 Rezultati ispitivanja uzoraka iz serije D – izmešan otpad sa obe deponije

Poglavlje 7. DEFORMABILNOST KOMUNALNOG OTPADA

Tabela 7.1 Osnovne fizičke karakteristike ispitanih uzoraka iz serije A – deponija Ada Huja

Tabela 7.2 Vrednosti indeksa i modifikovanog indeksa sekundarne kompresije

Tabela 7.3 Vrednosti indeksa i modifikovanog indeksa primarne kompresije

Tabela 7.4 Osnovne karakteristike ispitanih uzoraka iz serije B – otpad sa deponije Novi Sad

Tabela 7.5 Vrednosti indeksa i modifikovanog indeksa sekundarne kompresije

Tabela 7.6 Vrednosti indeksa i modifikovanog indeksa primarne kompresije

Tabela 7.7 Osnovne karakteristike uzorka iz serije C – izmešan otpad sa obe deponije

Tabela 7.8 Vrednosti indeksa i modifikovanog indeksa sekundarne kompresije

Tabela 7.9 Vrednosti indeksa i modifikovanog indeksa primarne kompresije

Poglavlje 8. VERIFIKACIJA REZULTATA ISPITIVANJA

Tabela 8.1	Zbirni prikaz parametara čvrstoće smicanja
Tabela 8.2	Parametri čvrstoće smicanja dobijeni izvođenjem opita direktnog smicanja pojedinih autora iz izabranih literaturnih podataka
Tabela 8.3	Prikaz parametara čvrstoće smicanja za jednačinu čvrstoće logaritamskog oblika
Tabela 8.4	Prikaz parametara čvrstoće smicanja za jednačinu čvrstoće hiperboličkog oblika
Tabela 8.5	Zbirni prikaz parametara stišljivosti

Poglavlje 9. PRIMENA REZULTATA U ANALIZI SLEGANJA DEPONIJA KOMUNALNOG OTPADA

Tabela 9.1	Korišćeni parametri za model Sowers-a
Tabela 9.2	Korišćeni parametri za model Bjarngard i Edgers-a
Tabela 9.3	Sračunata sleganja i procentualni iznos deformacija u odnosu na početnu visinu

SPISAK SLIKA

Poglavlje 2. DEPONIJA KOMUNALNOG OTPADA – INŽENJERSKA GRAĐEVINA

- Slika 2.1 Deponija formirana površinskim nasipanjem
- Slika 2.2 Deponija formirana iskopom rovova u teren
- Slika 2.3 Deponija formirana nasipanjem ispod i na površini terena
- Slika 2.4 Deponija formirana zatrpavanjem postojećih prirodnih depresija
- Slika 2.5 Geološki sastav terena sa karakterističnim geometrijskim oblicima deponija u Srbiji
- Slika 2.6 Konstruktivni elementi deponije komunalnog otpada (Environment Agency, 2002)
- Slika 2.7 Modeli najčešćih pojava deformacija na infrastrukturnim delovima deponije (Dixon & Jones, 2005)
- Slika 2.8 Šematski prikaz sleganja otpada
- Slika 2.9 Oblici proloma otpada opterećenog temeljom

Poglavlje 3. OSNOVNI POKAZATELJI FIZIČKOG STANJA KOMUNALNOG OTPADA

- Slika 3.1 Uopšteni model faznog sastava koji se koristi kod tla
- Slika 3.2 Promena faznog sistema komunalnog otpada u toku biodegradacije
- Slika 3.3 Različiti vidovi tečnosti unutar pornog prostora otpada (Zornberg i dr., 1999)
- Slika 3.4 Promena vlažnosti u odnosu na dubinu uzetog uzorka
- Slika 3.5 Veza vlažnosti i sadržaja organskih materija karakteristična za stari komunalni otpad
- Slika 3.6 Određivanje zapreminske težine komunalnog otpada na terenu
- Slika 3.7 Zavisnost između zapreminske težine otpada i vertikalnog efektivnog napona (Powrie & Beaven, 1999)
- Slika 3.8 Zavisnost zapreminske težine od dubine (Kavazanjian i dr., 1995)
- Slika 3.9 Hiperbolička promena zapreminske težine sa dubinom (Zekkos i dr., 2006)
- Slika 3.10 Interval zapreminskih težina ispitivanih uzoraka

- Slika 3.11 Specifična težina u zavisnosti od sadržaja organskih materija
- Slika 3.12 Dijagram zavisnosti suve zapremine težine i koeficijenta poroznosti
- Slika 3.13 Sita koja se koriste za sejanje krupnijih čestica
- Slika 3.14 Granulometrijski sastav uzoraka otpada sa različitih dubina (Gabr & Valero, 1995)
- Slika 3.15 Granulometrijski sastav otpada različite starosti (Jessberger, 1994)
- Slika 3.16 Karakteristične krive granulometrijskog sastava otpada različite starosti
- Slika 3.17 Granulometrijski sastav otpada na kojem su izvedeni opiti direktnog smicanja

Poglavlje 4. GEOTEHNIČKA KLASIFIKACIJA KOMUNALNOG OTPADA

- Slika 4.1 Opšti pregled sastava otpada u svetu (U. Langer, 2005)
- Slika 4.2 Pregled sastava otpada za pojedine gradove u svetu
- Slika 4.3 Opšta klasifikacija otpada
- Slika 4.4 Sistem klasifikacije po biorazgradljivosti otpada (Landva i Clark, 1990)
- Slika 4.5 Određivanje starosti otpada na osnovu datuma iz izvađenih novina (Oettle i dr. 2008)
- Slika 4.6 Raspodela mase otpada u zavisnosti od dimenzija izdvojenih komponenata (Kölsch, 1996)
- Slika 4.7 Nepovoljni uslovi za sortiranje otpada na terenu
- Slika 4.8 Razvrstan komunalni otpad prema katalogu sortiranja
- Slika 4.9 Sortiranje otpada u hali – deponija u Novom Sadu
- Slika 4.10 Prikaz sastava otpada za pojedine gradove u Srbiji (osnovni podaci preuzeti sa sajta fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu)
- Slika 4.11 Uporedni podaci sastava otpada u Srbiji i u svetu prema katalogu Evropske komisije
- Slika 4.12 Situacija zatvorene deponije na Ada Huji sa koje su uzeti uzorci komunalnog otpada
- Slika 4.13 Karakteristični geotehnički presek deponije sa lokacijom bušotine iz koje je uzet materijal za ispitivanje
- Slika 4.14 Deo situacije aktivne deponije komunalnog otpada u Novom Sadu sa koje su uzeti uzorci komunalnog otpada
- Slika 4.15 Karakteristični geotehnički presek deponije sa lokacijom bušotina iz kojih je uzet materijal za ispitivanje
- Slika 4.16 Komunalni otpad iz istražne bušotine na deponiji Ada Huja
- Slika 4.17 Komunalni otpad iz istražne bušotine i istražne jame sa deponije u Novom Sadu

- Slika 4.18 Primenjena metodologija ispitivanja
- Slika 4.19 Delimično modifikovana procedura razvrstavanja komunalnog otpada
- Slika 4.20 Postupak mešanja i pripreme materijala za sortiranje
- Slika 4.21 Sastav komunalnog otpada za pripremu uzoraka sa deponije Ada Huja – Beograd
- Slika 4.22 Sastav komunalnog otpada za pripremu uzoraka sa deponije Novi Sad
- Slika 4.23 Sastav izmešanog komunalnog otpada sa deponija Ada Huja i Novi Sad
- Slika 4.24 Granulometrijski sastav otpada koji je korišćen za geotehničku klasifikaciju
- Slika 4.25 Troughli dijagram oblika materijala sa procenom mehaničkih karakteristika
- Slika 4.26 Zbirna granulometrijska kriva i krive zastupljenosti materijala (armirajuće komponente) - Ada Huja
- Slika 4.27 Zbirna granulometrijska kriva i krive zastupljenosti materijala (armirajuće komponente) - Novi Sad
- Slika 4.28 Zbirna granulometrijska kriva i krive zastupljenosti materijala (nestišljive komponente) - Ada Huja
- Slika 4.29 Zbirna granulometrijska kriva i krive zastupljenosti materijala (nestišljive komponente) – Novi Sad
- Slika 4.30 Zbirna granulometrijska kriva i krive zastupljenosti materijala (stišljive komponente) - Ada Huja
- Slika 4.31 Zbirna granulometrijska kriva i krive zastupljenosti materijala (stišljive komponente) – Novi Sad
- Slika 4.32 Klasifikacija prema različitim vidovima mehaničkog ponašanja komunalnog otpada
- Slika 4.33 Klasifikacija prema različitim vidovima mehaničkog ponašanja komunalnog otpada u odnosu na faze odlaganja
- Slika 4.34 Klasifikacija prema različitim vidovima mehaničkog ponašanja analiziranog komunalnog otpada u odnosu na faze odlaganja

Poglavlje 5. TEORIJSKE OSNOVE NAPONSKO-DEFORMACIJSKIH VEZA

- Slika 5.1 Uobičajene idealizacije naponsko-deformacijskog ponašanja u mehanici tla: a) krto idealno plastična; b) elastično idealno plastična; c) elastična sa deformacijskim ojačanjem (Bardet, 1997)
- Slika 5.2 Idealizovani tipovi naponsko-deformacijskog ponašanja a) linearno elastičan; b) nelinearno elastičan; c) elasto-plastičan

- Slika 5.3 Tipični oblici elasto-plastičnog ponašanja tla pri smicanju: a) deformacijsko očvršćavanje; b) deformacijsko omekšavanje; c) savršeno plastično; d) kombinacija prethodo opisanih ponašanja tla (Bardet, 1997)
- Slika 5.4 Definicije inicijalnih i tangentskih modula za standardne laboratorijske opite
- Slika 5.5 Nelinearna naponsko-deformacijska zavisnost – Konderov hiperbolički model
- Slika 5.6 Hiperbolička naponsko-deformacijska kriva sa parametrima transformisane hiperbole
- Slika 5.7 Idealno elastični - idealno plastični model
- Slika 5.8 Cam-Clay model i modifikovani Cam-Clay model
- Slika 5.9 Idealizovani prikaz izotropne kompresije
- Slika 5.10 Odnos konsolidacije i naprežanja
- Slika 5.11 Promene zapremine kod izotropne kompresije u edometarskom opitu
- Slika 5.12 Deformacijsko omekšavajući model
- Slika 5.13 Modeli loma u prostoru glavnih napona (Chen, 1985)
- Slika 5.14 Idealizovani kriterijumi loma
- Slika 5.15 Mohr - Coulombov kriterijum loma za ravansko naponsko stanje
- Slika 5.16 Promena koeficijenta poroznosti pri izotropnoj kompresiji komunalnog otpada

Poglavlje 6. ČVRSTOĆA SMICANJA KOMUNALNOG OTPADA

- Slika 6.1 Morova i Kulon-Morova anvelope loma
- Slika 6.2 Uticajni faktori na čvrstoću smicanja komunalnog otpada (Langer, 2005)
- Slika 6.3 Karakteristični slučajevi orijentacije komponenata otpada (Kölsch, 1996)
- Slika 6.4 Efekat armiranja na mobilisani napon zatezanja (Kölsch, 1996)
- Slika 6.5 Promena sastava komunalnog otpada u Velikoj Britaniji (Watts i dr. 2002)
- Slika 6.6 Zavisnost čvrstoće smicanja od sadržaja zemljastog tla (Siegel i dr. 1990)
- Slika 6.7 Smanjenja čvrstoće smicanja usled povećanja debljine nadsloja (Kölsch, 1996)
- Slika 6.8 Uticaj zbijanja na mobilisani ugao unutrašnjeg trenja komunalnog otpada (Manassero i dr. 1997)

- Slika 6.9 Dijagrami smicanja suvog i provlaženog papira (Pelkey i dr. 2001)
- Slika 6.10 Zavisnost kohezije i ugla unutrašnjeg trenja od zapreminske težine (Dixon i dr. 2004)
- Slika 6.11 Uticaj zapreminske težine i veličine frakcija na čvrstoću smicanja (Zekkos, 2005)
- Slika 6.12 Uticaj granulometrijskog sastava na ugao unutrašnjeg trenja (Manassero i dr. 1997)
- Slika 6.13 Anvelopa loma za različite materijale (Manassero i dr., 1997)
- Slika 6.14 Ponašanje komunalnog otpada pri opitu smicanja (Kölsch, 1996)
- Slika 6.15 Povećanje čvrstoće smicanja zbog efekta armiranja (Kölsch, 1996)
- Slika 6.16 Povećanje frikcije zbog efekta “uklještenja” (Kölsch, 1996)
- Slika 6.17 Model opita smicanja otpada; karakteristično ponašanje tokom smicanja (Kölsch, 1993)
- Slika 6.18 Model opita smicanja otpada; obvojnice loma - linije smicanja (Kölsch, 1993)
- Slika 6.19 Rezultati opita direktnog smicanja u velikoj razmeri –otpad iz Kanadskih deponija (Landva i Clark, 1990)
- Slika 6.20 Naknadni rezultati opita direktnog smicanja u velikoj razmeri - otpad iz Kanadskih deponija (Landva i Clark, 1990)
- Slika 6.21 Rezultati opita direktnog smicanja u zavisnosti od sastava otpada (Siegel i dr., 1990)
- Slika 6.22 In situ opiti direktnog smicanja u aparatu velikih dimenzija (Houston i dr. 1995)
- Slika 6.23 Parametri čvrstoće smicanja u zavisnosti od normalnih napona (Kavazanjian i dr. 1995)
- Slika 6.24 Izlomljena anvelopa loma (Manassero i dr. 1996)
- Slika 6.25 Čvrstoća smicanja uzoraka otpada iz Viskonsina (Edinçliler i dr. 1996)
- Slika 6.26 Parametri čvrstoće smicanja u zavisnosti od horizontalnih pomeranja (Thomas i dr. 1999)
- Slika 6.27 Naponsko-deformacijska zavisnost uzoraka usitnjene gume (Ghaly, 2000)
- Slika 6.28 Mobilisani drenirani parametri čvrstoće smicanja (Gotteland i dr. 2000)
- Slika 6.29 a) Vršni parametri čvrstoće smicanja b) Mobilisani parametri čvrstoće smicanja za pomeranja od $\Delta l = 25$ mm (Pelkey i dr. 2001)
- Slika 6.30 Mobilisane vrednosti ugla unutrašnjeg trenja (Pelkey i dr. 2001)
- Slika 6.31 Zavisnost između ugla unutrašnjeg trenja i horizontalnih pomeranja (Hossain, 2002)

- Slika 6.32 Opit smicanja uzorka SW_07 (Langer, 2005)
- Slika 6.33 Zavisnost vršnih parametara čvrstoće smicanja od sadržaja deformabilnih komponenti (Langer, 2005)
- Slika 6.34 Uticaj zapreminske težine uzoraka sa 100 % i 62 % frakcija manjih od 20 mm na smičuću čvrstoću otpada (Zekkos, 2005)
- Slika 6.35 Efekat sastava i veličine frakcija otpada na smičuću čvrstoću (Zekkos, 2005)
- Slika 6.36 Uticaj normalnih napona na parametre čvrstoće smicanja (Zekkos, 2005)
- Slika 6.37 Uticaj orijentacije ljustastih frakcija na naponsko-deformacijsko ponašanje uzorka (Zekkos, 2005)
- Slika 6.38 Preporučena nelinearna logaritamska i linearna anvelopa loma (Zekkos, 2005)
- Slika 6.39 Laboratorijski određene i ekstrapolovane vrednosti parametara čvrstoće smicanja (Singh, 2008)
- Slika 6.40 Uticaj promene vlažnosti otpada na ugao unutrašnjeg trenja (Wilson, 2009)
- Slika 6.41 Zavisnost parametara čvrstoće smicanja od relativnih deformacija i starosti otpada (Jessberger i dr. 1995)
- Slika 6.42 Zavisnost ugla unutrašnjeg trenja od starosti otpada (Reuter i Nolte, 1995)
- Slika 6.43 Zavisnost efektivnih parametara čvrstoće smicanja, dobijenih triaksijalnim ispitivanjima od relativnih deformacija (Grisolia i dr. 1995)
- Slika 6.44 Putanje napona i linije loma za različite relativne deformacije dobijene na prirodno vlažnim uzorcima sa zapreminskom težinom $\gamma = 10 \text{ kN/m}^3$ (Machado i dr. 2002)
- Slika 6.45 Mobilisani parametri čvrstoće smicanja u funkciji aksijalnih deformacija (Kockel i Jessberger, 1995; Machado i dr. 2002)
- Slika 6.46 a) Naponsko-deformacijska kriva za anizotropno konsolidovani uzorak
b) Deformacije do dostizanja različitih K uslova tokom tipičnih opita koji su obavljani na Univerzitetu u Berkliju (Zekkos, 2005)
- Slika 6.47 Mobilisani naponi i anvelopa loma za $K = 0.3$ i za a) 5 % aksijalne deformacije i b) 10 % aksijalne deformacije (Zekkos, 2005)
- Slika 6.48 Parametri čvrstoće smicanja za $K=0.3$ i za različite aksijalne deformacije (Zekkos, 2005)
- Slika 6.49 Rezultati triaksijalnih ispitivanja otpada (Papić i dr. 2007)
- Slika 6.50 Parametri čvrstoće smicanja u zavisnosti od sadržaja tla (Papić i dr. 2007)

- Slika 6.51 Naponsko-deformacijske zavisnosti triaksijalnih CU opita za a) neporemećene uzorke i b) poremećene uzorke (Singh, 2008)
- Slika 6.52 Putanje efektivnih napona sa anvelopama loma za a) neporemećene uzorke i b) poremećene uzorke (Singh, 2008)
- Slika 6.53 Parametri čvrstoće smicanja dobijeni povratnim analizama (Singh i Murphy, 1990)
- Slika 6.54 Parametri čvrstoće smicanja komunalnog otpada dobijeni povratnim analizama, terenskim i laboratorijskim ispitivanjima (Howland i Landva, 1992)
- Slika 6.55 Dijagram čvrstoće smicanja dobijen na osnovu laboratorijskih opita i podataka dobijenih povratnim analizama (Eid i dr. 2000)
- Slika 6.56 Analizirane reference metoda određivanja čvrstoće smicanja komunalnog otpada
- Slika 6.57 Aparat za direktno smicanje sa dimenzijama kutije 60 x 60 mm – RGF Beograd
- Slika 6.58 Aparat za direktno smicanje sa dimenzijama kutije 100 x 100 mm – IMS Beograd
- Slika 6.59 Materijalni sastav komunalnog otpada koji je korišćen za ispitivanje
- Slika 6.60 Naponsko-deformacijska zavisnost komunalnog otpada u zavisnosti od orijentacije armirajućih frakcija (Athanasopoulos i dr. 2008)
- Slika 6.61 Zavisnost napona i pomeranja tokom smicanja uzorka U-1 iz serije A
- Slika 6.62 Zavisnost napona i pomeranja tokom smicanja uzorka U-2 iz serije A
- Slika 6.63 Zavisnost napona i pomeranja tokom smicanja uzorka U-3 iz serije A
- Slika 6.64 Karakteristično izdizanje gornjeg rama aparata sa izgledom uzorka nakon smicanja
- Slika 6.65 Zavisnost napona i pomeranja tokom smicanja uzorka U-4 iz serije B
- Slika 6.66 Zavisnost napona i pomeranja tokom smicanja uzorka U-5 iz serije B
- Slika 6.67 Zavisnost napona i pomeranja tokom smicanja uzorka U-6 iz serije B
- Slika 6.68 Zavisnost napona i pomeranja tokom smicanja uzorka U-7 iz serije C
- Slika 6.69 Zavisnost napona i pomeranja tokom smicanja uzorka U-8 iz serije C
- Slika 6.70 Zavisnost napona i pomeranja tokom smicanja uzorka U-9 iz serije C
- Slika 6.71 Zavisnost napona i pomeranja tokom smicanja uzorka U-10 iz serije D
- Slika 6.72 Zavisnost napona i pomeranja tokom smicanja uzorka U-11 iz serije D
- Slika 6.73 Zavisnost napona i pomeranja tokom smicanja uzorka U-12 iz serije D
- Slika 6.74 Uticaj orijentacije frakcija na smičići napon za prvu grupu uzoraka ($\sigma'_n = 25$ kPa)
- Slika 6.75 Uticaj orijentacije frakcija na smičići napon za prvu grupu uzoraka ($\sigma'_n = 50$ kPa)

- Slika 6.76 Uticaj orijentacije frakcija na smičiči napon za prvu grupu uzoraka ($\sigma'_n = 100$ kPa)
- Slika 6.77 Uticaj orijentacije frakcija na smičiči napon za drugu grupu uzoraka ($\sigma'_n = 25$ kPa)
- Slika 6.78 Uticaj orijentacije frakcija na smičiči napon za drugu grupu uzoraka ($\sigma'_n = 50$ kPa)
- Slika 6.79 Uticaj orijentacije frakcija na smičiči napon za drugu grupu uzoraka ($\sigma'_n = 100$ kPa)
- Slika 6.80 Uticaj orijentacije ljustastih frakcija na odnos mobilisanih napona smicanja pri smičućim pomeranjima od 14 mm
- Slika 6.81 Parametri čvrstoće smicanja za uzorke iz serije A
- Slika 6.82 Parametri čvrstoće smicanja za uzorke iz serije B
- Slika 6.83 Parametri čvrstoće smicanja za uzorke iz serije C
- Slika 6.84 Parametri čvrstoće smicanja za uzorke iz serije D
- Slika 6.85 Zbirne obvojnice loma za uzorke iz serije A
- Slika 6.86 Zbirne obvojnice loma za uzorke iz serije B
- Slika 6.87 Zbirne obvojnice loma za uzorke iz serije C
- Slika 6.88 Zbirne obvojnice loma za uzorke iz serije D
- Slika 6.89 Uticaj orijentacije čestica otpada na čvrstoću smicanja ($\gamma = 9.8 - 11.2$ kN/m³)
- Slika 6.90 Uticaj orijentacije čestica otpada na čvrstoću smicanja ($\gamma = 11.9 - 15.0$ kN/m³)
- Slika 6.91 Mobilisana kohezija u funkciji smičućih pomeranja - uzorci serije A
- Slika 6.92 Mobilisana kohezija u funkciji smičućih pomeranja - uzorci serije B
- Slika 6.93 Mobilisana kohezija u funkciji smičućih pomeranja - uzorci serije C
- Slika 6.94 Mobilisana kohezija u funkciji smičućih pomeranja - uzorci serije C
- Slika 6.95 Mobilisana kohezija u funkciji horizontalnih pomeranja- uzorci serije D
- Slika 6.96 Mobilisani ugao unutrašnjeg trenja u funkciji pomeranja-uzorci serije A
- Slika 6.97 Mobilisani ugao unutrašnjeg trenja u funkciji pomeranja-uzorci serije B
- Slika 6.98 Mobilisani ugao unutrašnjeg trenja u funkciji pomeranja-uzorci serije C
- Slika 6.99 Mobilisani ugao unutrašnjeg trenja u funkciji pomeranja-uzorci serije D
- Slika 6.100 Mobilisani ugao unutrašnjeg trenja u funkciji horizontalnih pomeranja i veličine čestica
- Slika 6.101 Zavisnost kohezije i ugla unutrašnjeg trenja od smičućih pomeranja i zapremnske težine – serija A
- Slika 6.102 Zavisnost kohezije i ugla unutrašnjeg trenja od smičućih pomeranja i zapremnske težine – serija B

- Slika 6.103 Zavisnost kohezije i ugla unutrašnjeg trenja od smičućih pomeranja i zapreminske težine – serija C
- Slika 6.104 Zavisnost kohezije i ugla unutrašnjeg trenja od smičućih pomeranja i zapreminske težine – serija D
- Slika 6.105 Zavisnost između kohezije i ugla unutrašnjeg trenja za karakteristična pomeranja – serije A i B
- Slika 6.106 Zavisnost između kohezije i ugla unutrašnjeg trenja za karakteristična pomeranja – serije C i D
- Slika 6.107 Matematički oblici anvelope loma
- Slika 6.108 Ilustracija primene krivolinijske anvelope loma logaritamskog oblika (Dancan & Wright, 2005)
- Slika 6.109 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma logaritamskog oblika (uzorci iz serije A, $c' = 0$ kPa)
- Slika 6.110 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma logaritamskog oblika (uzorci iz serije A, $c' = 5$ kPa)
- Slika 6.111 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma logaritamskog oblika (uzorci iz serije A, $c' = 10$ kPa)
- Slika 6.112 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma logaritamskog oblika (uzorci iz serije B, $c' = 0$ kPa)
- Slika 6.113 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma logaritamskog oblika (uzorci iz serije B, $c' = 5$ kPa)
- Slika 6.114 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma logaritamskog oblika (uzorci iz serije B, $c' = 10$ kPa)
- Slika 6.115 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma logaritamskog oblika (uzorci iz serije C, $c' = 0$ kPa)
- Slika 6.116 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma logaritamskog oblika (uzorci iz serije C, $c' = 5$ kPa)
- Slika 6.117 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma logaritamskog oblika (uzorci iz serije C, $c' = 10$ kPa)
- Slika 6.118 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma logaritamskog oblika (uzorci iz serije D, $c' = 0$ kPa)
- Slika 6.119 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma logaritamskog oblika (uzorci iz serije D, $c' = 20$ kPa)
- Slika 6.120 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma logaritamskog oblika (uzorci iz serije D, $c' = 30$ kPa)
- Slika 6.121 Prikaz logaritamske funkcije za interval malih normalnih napona ($c' = 0$ kPa)
- Slika 6.122 Prikaz logaritamske funkcije za interval malih normalnih napona ($c' = 5$ kPa)

- Slika 6.123 Geometrijski prikaz elemenata krivolinijske anvelope hiperboličkog oblika (Maksimović, 1989, 1992)
- Slika 6.124 Načini predstavljanja funkcionalne zavisnosti elemenata krivolinijske anvelope loma hiperboličkog oblika a) $\varphi' = f(\log \sigma'_n)$ b) $\varphi' = f(\sigma'_n)$
- Slika 6.125 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma hiperboličkog oblika (uzorci iz serije A, $c' = 0$ kPa)
- Slika 6.126 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma hiperboličkog oblika (uzorci iz serije A, $c' = 5$ kPa)
- Slika 6.127 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma hiperboličkog oblika (uzorci iz serije A, $c' = 10$ kPa)
- Slika 6.128 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma hiperboličkog oblika (uzorci iz serije B, $c' = 0$ kPa)
- Slika 6.129 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma hiperboličkog oblika (uzorci iz serije B, $c' = 5$ kPa)
- Slika 6.130 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma hiperboličkog oblika (uzorci iz serije B, $c' = 10$ kPa)
- Slika 6.131 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma hiperboličkog oblika (uzorci iz serije C, $c' = 0$ kPa)
- Slika 6.132 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma hiperboličkog oblika (uzorci iz serije C, $c' = 5$ kPa)
- Slika 6.133 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma hiperboličkog oblika (uzorci iz serije C, $c' = 10$ kPa)
- Slika 6.134 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma hiperboličkog oblika (uzorci iz serije D, $c' = 0$ kPa)
- Slika 6.135 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma hiperboličkog oblika (uzorci iz serije D, $c' = 20$ kPa)
- Slika 6.136 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma hiperboličkog oblika (uzorci iz serije D, $c' = 30$ kPa)

Poglavlje 7. DEFORMABILNOST KOMUNALNOG OTPADA

- Slika 7.1 Šematski prikaz sleganja tokom izvođenja edometarskog opita
- Slika 7.2 Zavisnost modula stišljivosti od vertikalnih efektivnih napona (Dixon i dr. 2004)
- Slika 7.3 Zavisnost napona i koeficijenta poroznosti
- Slika 7.4 Zavisnost indeksa primarne kompresije i početnog koeficijenta poroznosti (Sowers, 1973)

- Slika 7.5 Zavisnost pritiska i deformacija u fazi primarne kompresije (Landva i Clark, 1990)
- Slika 7.6 Komponente sekundarne kompresije
- Slika 7.7 Zavisnost indeksa sekundarne kompresije i početnog koeficijenta poroznosti (Sowers, 1973)
- Slika 7.8 Vremenski osmatrana sleganja na različitim deponijama (Bjarngard i Edgers, 1990)
- Slika 7.9 Idealizovana kriva zavisnosti deformacije deponije u vremenu (Bjarngard i Edgers, 1990)
- Slika 7.10 Edometarski aparati sa dimenzijama prstena $D = 100$ mm i $h = 40$ mm – RGF Beograd
- Slika 7.11 Šematski prikaz edometarskog aparata i sistema za opterećenje
- Slika 7.12 Izgled edometarskog aparata i sistema za opterećenje
- Slika 7.13 Merni sat – komparater Vogel tipa 242042, Germany
- Slika 7.14 Povezanost sistema za akviziciju mernih vrednosti
- Slika 7.15 Izgled ekrana za unošenje plana merenja sa prikazom rezultata merenja
- Slika 7.16 Priprema materijala za ispitivanja
- Slika 7.17 Formiranje uzorka u velikoj edometarskoj ćeliji – a); izgled uzorka nakon obavljenog sušenja – b)
- Slika 7.18 Zavisnost vreme-deformacija za uzorke iz serija A i B
- Slika 7.19 Zavisnost vreme- vertikalna deformacija za uzorak U-9 koji je ispitan u velikoj edometarskoj ćeliji
- Slika 7.20 Vremensko sleganje uzorka U-1 iz serije A
- Slika 7.21 Vremensko sleganje uzorka U-2 iz serije A
- Slika 7.22 Vremensko sleganje uzorka U-3 iz serije A
- Slika 7.23 Vremensko sleganje uzorka U-4 iz serije A
- Slika 7.24 Zavisnost napona i deformacija u fazi primarne kompresije
- Slika 7.25 Zavisnost napona i deformacija za različito vreme primarne kompresije
- Slika 7.26 Vrednosti modula stišljivosti za uzorke iz serije A
- Slika 7.27 Zavisnost modula stišljivosti i vertikalnog napona za uzorke serije A
- Slika 7.28 Vremensko sleganje uzorka U-5 iz serije B
- Slika 7.29 Vremensko sleganje uzorka U-6 iz serije B
- Slika 7.30 Vremensko sleganje uzorka U-7 iz serije B
- Slika 7.31 Vremensko sleganje uzorka U-8 iz serije B
- Slika 7.32 Zavisnost napona i deformacija u fazi primarne kompresije

Slika 7.33	Zavisnost napona i deformacija za različito vreme primarne kompresije
Slika 7.34	Vrednosti modula stišljivosti za uzorke iz serije B
Slika 7.35	Zavisnost modula stišljivosti i vertikalnog napona za uzorke serije B
Slika 7.36	Sleganje u vremenu uzorka U-9 iz serije C
Slika 7.37	Zavisnost napona i deformacija u fazi primarne kompresije
Slika 7.38	Zavisnost napona i deformacija za različito vreme primarne kompresije
Slika 7.39	Vrednosti modula stišljivosti za uzorak iz serije C

Poglavlje 8. VERIFIKACIJA REZULTATA ISPITIVANJA

Slika 8.1	Uticaj zapreminske težine na čvrstoću smicanja komunalnog otpada
Slika 8.2	Čvrstoća smicanja manje zbijenog komunalnog otpada sa deponija u Srbiji
Slika 8.3	Čvrstoća smicanja zbijenijeg komunalnog otpada sa deponija u Srbiji
Slika 8.4	Zbirni prikaz parametara čvrstoće smicanja komunalnog otpada
Slika 8.5	Zbirni prikaz parametara čvrstoće smicanja za izdvojene literaturne podatke
Slika 8.6	Uporedni prikaz pravolinijskih anvelopa loma predloženih u ovom radu i literaturnih podataka
Slika 8.7	Krivolinijska jednačina čvrstoće logaritamskog oblika za manje zbijeni otpad ($c'_{mob} = 0$ kPa)
Slika 8.8	Krivolinijska jednačina čvrstoće logaritamskog oblika za manje zbijeni otpad ($c'_{mob} = 5$ kPa)
Slika 8.9	Krivolinijska jednačina čvrstoće logaritamskog oblika za manje zbijeni otpad ($c'_{mob} = 10$ kPa)
Slika 8.10	Krivolinijska jednačina čvrstoće logaritamskog oblika zbijenijeg otpada ($c'_{mob} = 0$ kPa)
Slika 8.11	Krivolinijska jednačina čvrstoće logaritamskog oblika zbijenijeg otpada ($c'_{mob} = 5$ kPa)
Slika 8.12	Krivolinijska jednačina čvrstoće logaritamskog oblika zbijenijeg otpada ($c'_{mob} = 10$ kPa)
Slika 8.13	Krivolinijska jednačina čvrstoće hiperboličkog oblika manje zbijenog otpada ($c'_{mob} = 0$ kPa)
Slika 8.14	Krivolinijska jednačina čvrstoće hiperboličkog oblika manje zbijenog otpada ($c'_{mob} = 5$ kPa)
Slika 8.15	Krivolinijska jednačina čvrstoće hiperboličkog oblika manje zbijenog otpada ($c'_{mob} = 10$ kPa)

- Slika 8.16 Krivolinijska jednačina čvrstoće hiperboličkog oblika zbijenijeg otpada ($c'_{\text{mob}} = 0$ kPa)
- Slika 8.17 Krivolinijska jednačina čvrstoće hiperboličkog oblika zbijenijeg otpada ($c'_{\text{mob}} = 5$ kPa)
- Slika 8.18 Krivolinijska jednačina čvrstoće hiperboličkog oblika zbijenijeg otpada ($c'_{\text{mob}} = 10$ kPa)
- Slika 8.19 Krivolinijske anvelope loma logaritamskog oblika
- Slika 8.20 Krivolinijske anvelope loma hiperboličkog oblika
- Slika 8.21 Pravolinijske i krivolinijske anvelope loma
- Slika 8.22 Uporedni prikaz modifikovanog indeksa primarne kompresije
- Slika 8.23 Zavisnost indeksa primarne kompresije i početnog koeficijenta poroznosti
- Slika 8.24 Zavisnost maksimalnog i minimalnog indeksa sekundarne kompresije od početnog koeficijenta poroznosti - uzorci serije A
- Slika 8.25 Zavisnost maksimalnog i minimalnog indeksa sekundarne kompresije od početnog koeficijenta poroznosti- uzorci serije B
- Slika 8.26 Zavisnost maksimalnog i minimalnog indeksa sekundarne kompresije od početnog koeficijenta poroznosti- uzorak serije C
- Slika 8.27 Uporedni prikaz modifikovanog indeksa sekundarne kompresije
- Slika 8.28 Zavisnost maksimalnog indeksa sekundarne kompresije i početnog koeficijenta poroznosti
- Slika 8.29 Zavisnost minimalnog indeksa sekundarne kompresije i početnog koeficijenta poroznosti
- Slika 8.30 Odnos maksimalnog modifikovanog indeksa sekundarne kompresije i modifikovanog indeksa primarne kompresije
- Slika 8.31 Odnos minimalnog modifikovanog indeksa sekundarne kompresije i modifikovanog indeksa primarne kompresije
- Slika 8.32 Uticaj normalnih napona na odnos maksimalnih modifikovanih indeksa sekundarne i primarne kompresije
- Slika 8.33 Uticaj normalnih napona na odnos minimalnih modifikovanih indeksa sekundarne i primarne kompresije
- Slika 8.34 Analitička aproksimacija zavisnosti maksimalnog indeksa sekundarne kompresije od vertikalnog napona – serija A
- Slika 8.35 Analitička aproksimacija zavisnosti minimalnog indeksa sekundarne kompresije od vertikalnog napona – serija A
- Slika 8.36 Analitička aproksimacija zavisnosti maksimalnog indeksa sekundarne kompresije od vertikalnog napona – serija B
- Slika 8.37 Analitička aproksimacija zavisnosti minimalnog indeksa sekundarne kompresije od vertikalnog napona – serija B

- Slika 8.38 Analitička aproksimacija zavisnosti maksimalnog indeksa sekundarne kompresije od vertikalnog napona – serija C
- Slika 8.39 Analitička aproksimacija zavisnosti minimalnog indeksa sekundarne kompresije od vertikalnog napona – serija C
- Slika 8.40 Zbirni prikaz linearne zavisnosti modula stišljivosti od srednjih vrednosti razmatranih opsega vertikalnih efektivnih napona
- Slika 8.41 Prosečne vrednosti modula stišljivosti u zavisnosti od lokacije komunalnog otpada
- Slika 8.42 Predložena korelaciona zavisnost modula stišljivosti od vertikalnog efektivnog napona

Poglavlje 9. PRIMENA REZULTATA U ANALIZI SLEGANJA DEPONIJA KOMUNALNOG OTPADA

- Slika 9.1 Šematski prikaz različitih faza deformacije komunalnog otpada (A-inertni materijali; B-vrlo deformabilni; C-skloni biodegradacije)
- Slika 9.2 Rezultati merenja sleganja na različitim deponijama (Spikula, 1997)
- Slika 9.3 Kvalitativni model mehanizma sleganja komunalnog otpada (Grisolia i Napoleoni, 1995)
- Slika 9.4 Mehanizmi i najbitniji faktori koji utiču na sleganje deponija (Hunte i dr., 2011)
- Slika 9.5 a) Krive vremenskog sleganja istog komunalnog otpada sa različitim periodima građenja, b) Izražene promene vertikalnih deformacija za isto vreme od zatvaranja posmatranih deponija A i B (Coumoulos i Koryalos, 1997)
- Slika 9.6 Promena relativne visine u funkciji normalnog napona (Rao i dr. 1977)
- Slika 9.7 Model sleganja komunalnog otpada (Bjarngard i Edgars, 1990)
- Slika 9.8 Reološki model sleganja komunalnog otpada (Edil i dr., 1990)
- Slika 9.9 Kompozitni model stišljivosti komunalnog otpada (Marques i dr., 2003)
- Slika 9.10 Proces odlaganja otpada sa prikazom kompozitnog modela (Marques i dr., 2003)
- Slika 9.11 Skica objekta sa lokacijama geodetskih repera za kontrolu sleganja
- Slika 9.12 Izmerena sleganja na repnim tačkama administrativno-tehničkog objekta
- Slika 9.13 Položaj hale sa reperima na kojima su vršena osmatranja
- Slika 9.14 Izmerena sleganja na repnim tačkama postavljenim na temeljima hale
- Slika 9.15 Vidljive deformacije na hali usled sleganja komunalnog otpada u podlozi

-
- Slika 9.16 Opšti geotehnički model terena u zoni objekta
- Slika 9.17 Usvojeni geotehnički model terena za analizu sleganja
- Slika 9.18 Poređenje sračunatih i izmerenih vrednosti sleganja - zavisnost C_α od e_0
- Slika 9.19 Poređenje sračunatih i izmerenih vrednosti sleganja- zavisnost C_α od σ'_v
- Slika 9.20 Poređenje sračunatih i izmerenih vrednosti sleganja - zavisnost C_α od e_0
- Slika 9.21 Poređenje sračunatih i izmerenih vrednosti sleganja- zavisnost C_α od σ'_v
- Slika 9.22 Poređenje sračunatih i izmerenih vrednosti sleganja – logaritamska funkcija
- Slika 9.23 Poređenje sračunatih i izmerenih vrednosti sleganja – eksponencijalna funkcija
- Slika 9.24 Poređenje sračunatih i izmerenih vrednosti sleganja – hiperbolička funkcija
- Slika 9.25 Poređenje sračunatih i izmerenih vrednosti sleganja – reološki model
- Slika 9.26 Poređenje sračunatih i izmerenih vrednosti sleganja – reološki model
- Slika 9.27 Zbirni prikaz sračunatih sleganja korišćenjem različitih modela
- Slika 9.28 Uporedni prikaz sračunatih sleganja sa literaturnim podacima

POGLAVLJE *1*

UVOD

Rast ljudske populacije sa povećanjem ličnih potreba i razvojem tehnologije, osnovni su faktori stvaranja velikih količina komunalnog otpada. Za komunalni otpad se može reći da je to „najrašireniji“ i „najvidljiviji“ deo opšteg problema zaštite životne sredine. Zato se u poslednje vreme velika pažnja posvećuje njegovom odlaganju, jer se sa tim problemom susreće svako naseljeno mesto. Klasičan način odlaganja otpada na komunalnim deponijama, predstavlja najjednostavnije i najjeftinije a ujedno, i najnepovoljnije rešenje. Naime, telo deponije čine „zatrane“ sirovine koje imaju određenu energetska vrednost, a sa druge strane godinama ugrožavaju životnu sredinu.

Savremeni trendovi vezani za tehnološke mogućnosti prerade otpada, uveliko se primenjuju u razvijenim zemljama sveta, s konačnim ciljem napuštanja klasičnog odlaganja otpada. Razvijene zemlje uveliko razrađuju takozvani „bezdeponijski koncept“, koji podrazumeva primenu novih tehnologija za potpuno uklanjanje komunalnog otpada. Međutim, ovakva ideja podrazumeva dugoročno prilagođavanje društva ali i države, jer su za to neophodna velika finansijska sredstva. Činjenica je da se i u Srbiji, određena količina komunalnog otpada koristi i reciklira, međutim, to je zanemarljivo mali procenat u odnosu na otpad koji se i dalje odlaže na deponije. S obzirom na to, odlaganje otpada na komunalnim deponijama, i dalje će predstavljati

preovlađujući oblik tretmana otpada u Srbiji, što potvrđuje i „Strategija upravljanja otpadom za period 2010 – 2019. godine“.

Strogi ekološki kriterijumi vezani za izgradnju novih komunalnih deponija, kao i nespремnost ljudi da žive u njihovoj blizini, sužava izbor slobodnih lokacija za odlaganje velikih količina komunalnog otpada. Ova situacija dovodi to toga da se otpad u Srbiji i dalje odlaže na postojeće deponije, šireći ih tako i u horizontalnom i vertikalnom pravcu. Mnoge od njih je, prema svim ekološkim, geološkim, građevinskim i drugim principima, trebalo davno zatvoriti. Većina od njih i ne predstavljaju sanitarne komunalne deponije, već su to uglavnom ili, zvanične deponije koje ne ispunjavaju propisane mere zaštite, ili su divlje deponije i smetlišta. Odluke o njihovom zatvaranju, uglavnom se ne sprovode jer ih prate ekonomski i politički aspekti. Zato, sve dok se savremeni tretmani otpada ne počnu znatno više da primenjuju, kod nas će se pritisak za odlaganje otpada na postojećim deponijama, i dalje povećavati. Međutim, treba napomenuti da su aktivnosti na izgradnji novih, zatim sanacija, rekultivacija a sve češće i zatvaranje postojećih deponija komunalnog otpada na teritoriji Srbije, intenzivirane zadnjih godina. Zato je na inženjerima različitih struka, veliki izazov da pronađu sigurne načine za dalje odlaganje komunalnog otpada, bilo projektovanjem novih ili proširenjem postojećih deponija. To svakako zahteva i posebne inženjerske analize, od kojih istraživanje samog otpada, ima poseban značaj.

1.1 PREDMET I CILJ ISTRAŽIVANJA

Predmet istraživanja u ovoj disertaciji su geotehničke karakteristike odloženog komunalnog otpada na deponijama u Srbiji. Njihovo određivanje (posebno mehaničkih karakteristika), otežano je iz više razloga:

- promenljivog i heterogenog sastava otpada (po sastavu, veličini i obliku čestica, različitim osobinama pojedinih materijala);
- nepostojanja opšte prihvaćene metodologije uzorkovanja, formiranja reprezentativnih uzoraka i njihovog ispitivanja;

- izrazite promene svojstava u zavisnosti od vremena tj. stadijuma razgradnje otpada.

Zbog toga se ispitivanja uglavnom vrše na veštački pripremljenim uzorcima, vodeći računa o vlažnosti, zbijenosti, procentualnom sadržaju i obliku pojedinih komponenti otpada (El-Fadel i dr., 1999; Machado i dr., 2002; Hossain, 2002; Marques i dr., 2003; Dixon & Jones, 2005; Langer, 2005; Zekkos i dr., 2006; Sharma & Anirban, 2007; Singh, 2008; Babu i dr., 2010. i dr.).

Eksperimentalno određivanje geotehničkih karakteristika komunalnog otpada, do sada u Srbiji nije rađeno, pa je domaća stručna i naučna javnost, bila oslonjena na preuzimanje neophodnih podataka iz svetske literature. Međutim, sastav komunalnog otpada varira od regiona do regiona i od države do države, a pored različitog sastava, često se vrše i namenska ispitivanja korišćenjem specijalnih aparata i usvajanjem različitih graničnih uslova. Ove varijacije ne uzimaju se u obzir iako značajno utiču na fizičko-mehaničke osobine otpada, pa je vrlo problematično njihovo generalizovanje i direktno preuzimanje tj., korišćenje u projektovanju deponija komunalnog otpada.

Istraživanja u okviru ove disertacije bila su usmerena na proučavanju naponsko-deformacijskih zavisnosti i određivanju osnovnih fizičko-mehaničkih parametara komunalnog otpada, koji karakterišu deponije u Srbiji. Naponsko-deformacijske zavisnosti komunalnog otpada veoma su složene, jer su posledica permanentnog nanošenja izrazito heterogenog materijala, a zbog dugotrajne razgradnje izazvane biohemijskim procesima u deponiji, i vremenski su uslovljene. Osnovni cilj bio je uspostavljanje određenih analitičkih zavisnosti između laboratorijski određenih parametara koji predstavljaju neizostavnu komponentu u numeričkom geotehničkom modeliranju komunalnog otpada. S obzirom na njihovu brojnost, bilo je važno utvrditi koje parametre treba ugraditi u analitičke modele a koje zanemariti, kako bi oni bili pogodni za praktičnu upotrebu. Da bi se to postiglo, bilo je neophodno sprovesti niz laboratorijskih ispitivanja na uzorcima komunalnog otpada koji su istražnim bušenjem i kopanjem istražnih jama, uzeti iz samih deponija.

Neposredni ciljevi disertacije vezani su za istraživanja koja se odnose na rešavanje sledećih problema:

- definisanje uticaja sastava, odnosa faza, fizičkog stanja, vremenskog i drugih faktora, na uspostavljanje konstitutivnih zavisnosti;
- uticaj karakterističnih osobina pojedinačnih komponenti otpada na njegovo fizičko-mehaničko ponašanje;
- ponašanje komunalnog otpada kako u početnoj fazi odlaganja, tako i nakon zatvaranja deponije, sa aspekta naponsko-deformacijskih promena;
- praktičnu primenu i unapređenje teorijskih saznanja vezanih za geostatičke numeričke analize na osnovu uporednih rezultata merenja na konkretnim objektima i korišćenjem dobijenih konstitutivnih zavisnosti.

1.2 METODE ISTRAŽIVANJA

Za definisanje fizičko-mehaničkih karakteristika komunalnog otpada, primenjene su konvencionalne laboratorijske metode istraživanja koje se koriste i u mehanici tla, s' tim što je komunalni otpad tretiran kao veštačko tlo. Prilikom izbora komunalnog otpada za formiranje uzoraka, vodilo se računa o njegovoj starosti, tako da je materijal istražnim bušenjem i izvođenjem istražnih jama, uzet iz jedne aktivne deponija (gradska deponija u Novom Sadu) i jedne zatvorene deponije (Ada Huja u Beogradu). Nakon definisanja sastava i pripreme komunalnog otpada, obavljena su identifikaciono-klasifikaciona ispitivanja, a nakon toga predložen je i sproveden postupak za geotehničku klasifikaciju komunalnog otpada. Postupak je zasnovan na sastavu i fizičkim osobinama, ali i na ključnim faktorima koji utiču na mehaničko ponašanje komunalnog otpada, kao što je sadržaj stišljivih i nestišljivih čestica i čestica sa armirajućom funkcijom u otpadu.

U cilju ispitivanja primenljivosti različitih konstitutivnih zavisnosti na komunalni otpad, obavljena su edometarska ispitivanja (ukupno tri serije ispitivanja na 9 uzoraka otpada) kao i opiti direktnog smicanja (ukupno četiri serije ispitivanja na 12 uzoraka, odnosno 36 probnih tela). Ova ispitivanja izvršena su na veštački pripremljenim uzorcima, pri čemu se vodilo računa o načinu pripreme, reprezentativnosti materijala, dimenzijalnim

odnosima korišćenih aparata i sastava komunalnog otpada. Ispitivanja su obavljena na uzorcima sa različitim zapreminskim težinama a sa prirodnim vlažnostima.

Za određivanje parametara čvrstoće smicanja, korišćeni su aparati za direktno smicanje i uzorci dimenzija 60 x 60 mm i visine od 25 mm (RGF Beograd) kao i aparati za direktno smicanje sa dimenzijama uzoraka 100 x 100 mm i visine $h = 23$ mm (Instituta za ispitivanje materijala – IMS). Kako se za razliku od prirodnog tla, smičuća čvrstoća otpada realizuje pri bitno većim pomeranjima, tj. nakon aktiviranja „armirajućih“ komponenti otpada, za definisanje parametara smičuće čvrstoće otpada, primenjen je odgovarajući raspon normalnih napona od 25 - 100 kPa. Posebna analiza posvećena je izboru kriterijuma loma. Pored korišćenja pravolinijskog oblika jednačine čvrstoće smicanja, interpretacija rezultata izvršena je i korišćenjem krivolinijske anvelope loma primenom relacija koje odgovaraju logaritamskom i hiperboličkom obliku, koji smičuću čvrstoću otpada definišu u širokom opsegu normalnih napona.

Edometarska ispitivanja obavljena su na način koji je omogućio uvid u vremenski razvoj deformacija, s obzirom da je dužina trajanja pojedinih serija opita iznosila preko 5 meseci. Može se reći da je zbog dužine trajanja opita, delimično uključena i biološka degradacija. Opiti su izvedeni na uzorcima prečnika 10 cm, a jedan opit izveden je i na uzorku prečnika 20 cm i to u aparatu, koji je za potrebe ove disertacije, tehnički unapređen (tehničko rešenje). Kako je ponašanje komunalnog otpada naponski i vremenski uslovljeno, rezultati edometarskih ispitivanja analizirani su kroz fazu primarne (u koju je uključena i inicijalna) i naročito sekundarne kompresije koja je posledica puzanja i biološke degradacije.

1.3 PRIMENA REZULTATA ISTRAŽIVANJA

Prilikom projektovanja, korišćenja i osmatranja deponija komunalnog otpada, kod nas je pažnja uglavnom usmerena na optimizaciji deponije, njenim kapacitetima, načinom i metodologijom izgradnje, sprečavanju pojave neprihvatljivo visokog sadržaja filtrata u okolnim podzemnim vodama, odnosno emisije gasova. S druge strane, ponašanje komunalnog otpada na deponiji, sa aspekta stabilnosti, nosivosti i sleganja, po pravilu se

zanemaruje. U svetu je to po nekada znalo da opomene, jer je dolazilo do rušenja čitavih kosina deponija i formiranja „klizišta otpada“, sa zapreminama koje su premašivale milione kubnih metara otpadnog materijala. Posledice su po nekada bile teške, jer je pored zagađenja životne sredine i prekida rada deponije, u pojedinim slučajevima dolazilo i do gubitka ljudskih života. Jednu od najznačajnijih uloga u tome imalo je zanemarivanje i nedovoljno poznavanje ponašanja komunalnog otpada u deponiji, koje je zbog izrazite heterogenosti materijala i izraženih vremenskih promena, specifično i vrlo kompleksno. Ovo se posebno odnosi na fizičko-mehaničke parametre komunalnog otpada, čije je poznavanje neophodno ne samo kod projektovanja deponija, već i nakon zatvaranja i njihovog dugotrajnog korišćenja (promena namene i planiranje prostora nekadašnje deponije: sportski tereni, manji privredni objekti, izletišta i sl.).

To je u neku ruku upozorenje, pa i potreba za razvijanjem jedne nove geotehničke discipline. Naime, prema nekim autorima ponašanje otpada treba razmatrati u okviru posebne discipline „mehanike otpada“ (*waste mechanics*), a pominje se još i termin „geotehnika otpada“, s obzirom da se laboratorijska ispitivanja komunalnog otpada, sprovode oslanjajući se na osnovne metode i koncepte koji su razvijeni u „mehanicu tla“, kao jednoj od osnovnih geotehničkih disciplina.

Ispitivanja koja su vršena u okviru ove disertacije, nisu do sada bila predmet naučnih istraživanja kod nas, pa otuda ova problematika nije razmatrana. Ako se uzme u obzir da je ova geotehnička disciplina relativno novijeg datuma, i da je nedovoljno zastupljena u domaćoj geotehničkoj praksi, onda, pored naučnog doprinosa ove disertacije, s pravom se očekuje i određeni praktični značaj. Tu se pre svega misli na primenu eksperimentalno određenih parametara za različite vidove geotehničkog modeliranja prilikom analiza sleganja, nosivosti i stabilnosti kosina komunalnih deponija, kako u eksploatacionoj fazi, tako i nakon zatvaranja deponije. Pored toga, očekuje se i animiranje naučne i stručne javnosti kao i nadležnih institucija, za adekvatan pristup geotehničkoj problematici istraživanja komunalnog otpada, a određeni doprinos daće i u formiranju domaćih propisa i aktuelizovanju regulative o geotehničkim aspektima projektovanja, izgradnje, sanacije i zatvaranja deponija komunalnog otpada.

1.4 ORGANIZACIJA DISERTACIJE

Doktorska disertacija je podeljena u deset poglavlja. Svako poglavlje počinje opštim predgovorom a završava se zaključkom gde se u kratkim crtama prikazuju metode, rezultati i diskusija.

U *Poglavljju 1*, daju se opšte napomene koje se odnose na značaj istraživanja komunalnog otpada i njegovog odlaganja na deponijama. Istaknuti su predmet i cilj istraživanja, korišćene metode i primena rezultata u geotehničke svrhe.

U *Poglavljju 2*, opisuje se značaj geoloških podloga kod projektovanja deponije komunalnog otpada koja se posmatra kao geotehnička građevina. Posebno se navode geotehnički aspekti kao što su: stabilnost kosina, prognoza veličine i vremena sleganja kao i nosivost otpada.

U *Poglavljju 3*, naglašava se složenost određivanja osnovnih pokazatelja fizičkog stanja komunalnog otpada, pre svega zbog njegovog izrazito heterogenog sastava i vremenske promenljivosti usled biorazgradnje. Prikazane su vrednosti osnovnih pokazatelja faznog sastava (vlažnost, sadržaj organskih materija, zapreminska težina, specifična težina, granulometrijski sastav, vodopropustljivost), koji su dobijeni na osnovu standardnih laboratorijskih ispitivanja.

U *Poglavljju 4*, prikazan je novi okvir geotehničke klasifikacije komunalnog otpada, baziran na određenim preporukama iz literature, ali i na praktičnim rezultatima ispitivanja za potrebe ovih istraživanja. Sama klasifikacija se izvodi u nekoliko faza a osnovu predstavljaju najrazličitije klasifikacije koje se koriste za tlo. Međutim, prvi put su u obzir uzete i neke od posebnih fizičkih i najbitnijih mehaničkih karakteristika pojedinačnih komponenti otpada, koje se različito ponašaju od tla (nestišljivi i materijali sa armirajućom funkcijom).

U *Poglavljju 5*, ukratko su prikazani osnovni analitički izrazi naponsko-deformacijskog ponašanja tla - konstitutivni modeli, koje se sve češće koriste da bi se opisalo i

ponašanje komunalnog otpada. Iako još uvek nije razvijen jednostavan i potpun konstitutivni model, koji za predviđanje naponsko-deformacijskog ponašanja komunalnog otpada uključuje sve faktore (istoriju naponskog stanja, mehaničko puzanje, biodegradaciju isl.), prikazana su dva karakteristična konstitutivna modela koja su predložena od strane Machado i dr., (2002) i Babu i dr., (2010).

U *Poglavlju 6*, analizirana je čvrstoća smicanja komunalnog otpada. Najpre su opisani faktori koji utiču na čvrstoću smicanja a nakon toga dat je istorijski prikaz literaturnih podataka u zavisnosti od korišćenih metoda ispitivanja, za poslednjih tridesetak godina. Posebna pažnja posvećena je programu ispitivanja, kojim su obuhvaćeni kvalitet i priprema uzoraka kao i sam postupak ispitivanja. Rezultati su prikazani u zavisnosti od serije ispitivanja sa svim pojedinačnim detaljima. Interpretacija rezultata, izvršena je na osnovu usvojenog kriterijuma loma (horizontalna pomeranja od $\Delta l = 14$ mm) korišćenjem klasičnog – pravolinijskog oblika jednačine čvrstoće smicanja kao i na osnovu krivolinijske anvelope loma, primenom relacija koje odgovaraju tzv. logaritamskom i hiperboličkom obliku.

U *Poglavlju 7*, analizirana je deformabilnost tj. stišljivost (kompresibilnost) komunalnog otpada. Posebna pažnja je posvećena načinu pripreme uzoraka, postupku ispitivanja koji je obuhvatio i dužini trajanja opita kao i aparatima koji su korišćeni za izvođenje opita. S obzirom na dužinu trajanja opita od min. 74 dana do max. 161 dana, rezultati ispitivanja omogućili su da se odrede parametri stišljivosti, koji su neophodni u analizama sleganja komunalnog otpada. Rezultati ispitivanja prikazani su na dijagramima koji su definisani kao "dijagrami kompresija" a ne konsolidacije, što je uobičajena terminologija kada je u pitanju tlo.

U *Poglavlju 8*, na osnovu prethodno prikazanih rezultata laboratorijskih ispitivanja, izvršena je interpretacija i na osnovu toga predložene su vrednosti parametara čvrstoće smicanja i stišljivosti, koji karakterišu komunalni otpad deponija u Srbiji. Predložene vrednosti upoređivane su sa rezultatima koji su prikazani u literaturi od strane drugih istraživača koji su proučavali komunalni otpad.

U *Poglavlju 9*, prikazani su različiti modeli sleganja komunalnog otpada. Na osnovu njih se može odrediti sleganje na deponijama, što je posebno važno za procenu mogućnosti korišćenja zatvorenih deponija. U vezi sa tim su laboratorijski utvrđeni parametri deformabilnosti, za koje su uspostavljene određene zavisnosti, iskorišćeni za analizu sleganja objekta koji je izgrađen na gradskoj komunalnoj deponiji u Novom Sadu. Ovo je poređeno sa izmerenim vrednostima sleganja, i poslužilo da se izvrši validacija prikazanih parametara.

U *Poglavlju 10*, sumirani su zaključci i doprinosi, koji su proizašli iz ovih istraživanja. Takođe se daje i kraći osvrt na nerešena pitanja, sa preporukama za dalja istraživanja.

Disertacija se završava spiskom korišćene literature i kraćom biografijom autora.

POGLAVLJE 2

DEPONIJIA KOMUNALNOG OTPADA – INŽENJERSKA GRAĐEVINA

Definicija deponije data je u "Strategiji upravljanja otpadom za period 2010 -2019. godine" (dalje "Strategija") prema kojoj je deponija "mesto za odlaganje otpada na površini ili ispod površine terena". Bez obzira što se deponija definiše kao "mesto", ona svakako predstavlja građevinu koja sa pratećim objektima, pored ekonomskih i ekoloških aspekta, treba da ispuni i opšte tehničke zahteve za izgradnju. To podrazumeva i poštovanje odgovarajućih propisa i standarda koji regulišu ovu oblast i koji se stalno menjaju i vremenom postaju znatno strožiji (u prilogu dva "Strategije" navedena su 66 dokumenta: Zakona, Pravilnika, Uredbi i Odlika, koji su relevantni za upravljanje otpadom). Paralelno sa tim, menjaju se i usavršavaju projektna rešenja koja uključuju primenu savremenih građevinskih materijala (uglavnom veštačkih geosintetičkih materijala), tehnologije izvođenja deponije, kontrole kvaliteta izrade kao i kvaliteta primenjenih materijala.

Tehnički zahtevi vezani za odlaganje otpada, definisani su posebnim dokumentima koji su usklađeni sa međunarodnim preporukama. Oni se uopšteno mogu podeliti na:

- propise i standarde koji se odnose na formiranje, održavanje, osmatranje i praćenje deponije ("Zakon o upravljanju otpadom", Sl. glasnik RS, br. 36/2009 i 88/2010; "Zakon o zaštiti životne sredine", Sl. glasnik RS, br. 135/2004 i 36/2009) i

- propise i standarde koji se odnose na inženjerska projektovanja (opšti tehnički zahtevi za izgradnju deponije komunalnog otpada sa pratećim objektima, definisani su "Zakonom o planiranju i izgradnji objekata" Sl. glasnik RS, br. 72/2009, 24/2011; "Pravilnikom o kriterijumima za određivanje lokacije i uređenje deponija otpadnih materijala", Sl. glasnik RS, br. 54/1992).

Propisi formiranja, održavanja, osmatranja i praćenja, prilagođeni su "veku trajanja" deponije i zahtevaju određen nivo kontrole životne sredine. To podrazumeva monitoring pre i u toku formiranja kao i nakon prestanka odlaganja otpada, sve do smanjenja emisije štetnih uticaja iz deponije na propisanu prihvatljivu meru.

Sa druge strane, propisi inženjerskog projektovanja komunalnih deponija, slični su pravilima građenja standardnih građevinskih objekata (Rakić i dr., 2012b). Samim tim, projektovanje se realizuje u fazama koje podrazumevaju poštovanje određenog redosleda, počevši od:

- planiranja i izbora lokacije (kabinetski i terensko-istraživački postupci koji pored identifikacije važećih regulativa i standarda, analiza postojećih i projektovanih količina i karakteristika otpada, infrastrukturnih, topografskih i klimatskih, uključuju i geološka, inženjerskogeološka, hidrogeološka i hidrološka ispitivanja vezana za prirodne uslove potencijalnih lokacija za izgradnju deponije);
- utvrđivanja lokacije koja obuhvata izradu prostorno-urbanističke dokumentacije i definisanje uslova za njeno privođenje nameni (izrada topografskih karata, namenskih geoloških sa karakteristikama terena kao što su: sastav, struktura, stabilnost, uslovi iskopa, vodopropustljivost, nivo podzemne vode i njen kvalitet, kapacitet i upotrebljivost, poprečni preseki sa fazama formiranja deponijskog tela i sl., Rakić i dr., 2005; Rakić i dr., 2006);
- izrade dokumentacije za izvođenje deponije (tehnička dokumentacija vezana za projektovanje deponije usklađena sa topografijom i karakteristikama terena,

preliminarni planovi konture deponije, zahtevane zapremine otpada i tla za prekrivke);

- projektovanje osnove deponije i pripadajućih objekata sa infrastrukturnim uređenjem (dimenzije konstrukcije i pratećih objekata, karakteristike zaštitnih sistema u osnovi – bazi i na površini – prekrivka, definisanje operativnih karakteristika vezanih za upotrebu dnevnih prekrivki, dovoz otpada i sl.);
- korišćenja deponije tj. odlaganja otpada (izrada plana upotrebe sa prilaznim putevima i specijalnim radnim površinama za manipulaciju, kontrola eulata, gasa, površinskih voda, mogućnost reciklaže, ograđivanje, rasveta, uspostavljanje sistema monitoringa radi: kontrole kvaliteta podzemnih voda, kontrole eventaulnih isparenja, kontrole zagađenosti vazduha, kontrole stabilnosti kosina, kontrole sleganja otpada, narušavanje flore i faune i sl.);
- zatvaranja deponije, njen spoljašnji izgled sa integracijom deponije u prirodno okruženje.

Međutim, i pored primene propisanih regulativa, događaju se određeni problemi, koji se redovno pripisuje projektantu, a posledice po pravilu trpi lokalno stanovništvo. Oslanjanje projektanta na poštovanje regulative, ne može biti njegova odbrana protiv izazvane štete zagađenjem. Zato se sve češće projektuju deponije koje prevazilaze zahteve definisane pravilnicima u nekim ključnim aspektima kao što su stabilnost i zaštita (Rakić, 2011). Razvijene zemlje poseduju detaljne pravilnike i regulative o lociranju deponija, projektovanju, izvođenju, korišćenju i osmatranju u toku odlaganja i nakon njihovog zatvaranja. U tom pogledu od velikog značaja su propisana uputstva od strane EPA (Environmental Protection Agency), ili WSDE (Washington State Department of Ecology), koja detaljno obrađuju ovu problematiku. Osnovna načela ovih uputstava, zasnivaju se na tehničkim normama koje se moraju poštovati kod projektovanja sanitarnih deponija i moraju biti usaglašena sa što višim nivoom zaštite životne sredine. Ona uključuju i rešavanje najvažnijih geotehničkih problema koji se moraju analizirati i proveravati (uglavnom su vezana za vertikalna i horizontalna pomeranja).

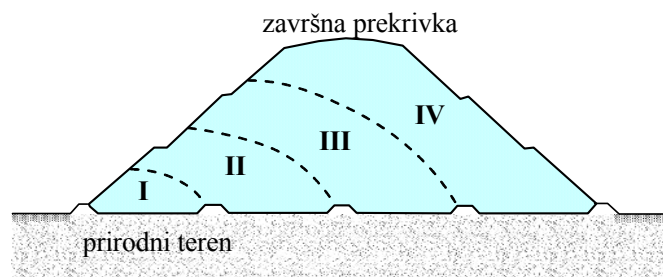
2.1 GEOMETRIJSKE KONFIGURACIJE DEPONIIJA

Uređena deponija komunalnog otpada (kod nas se često koristi termin - sanitarna deponija), može se definisati kao: ”inženjerska konstrukcija (nasuta, ukopana ili delimično ukopana građevina), koja je izgrađena i opremljena za trajno, kontrolisano, organizovano i sigurno odlaganje komunalnog otpada”. Gradi se na prethodno pripremljenom i zaštićenom prirodnom terenu, sistemom nepropusnih barijera - ”zaptivki”, na koji se otpad dovozi, planski nasipa, zbija i na kraju prekriva odgovarajućim zaštitnim sistemom (Rakić, 2011).

Komunalna deponija može biti izgrađena nasipanjem otpada na samoj površini terena (podsećajući tako na veštačko “brdo”), u samom terenu (zapunjavanjem prirodnih udolina, napuštenih kamenoloma, jama, kaverni i sl.), ili, kombinacijom iskopa u terenu sa nasipanjem.

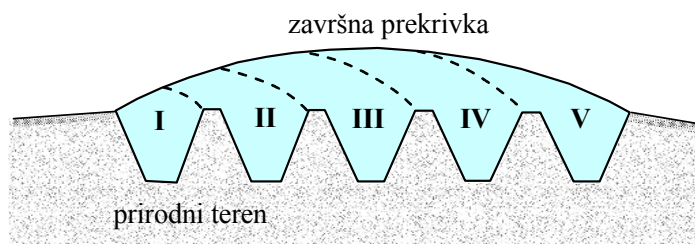
Kao najčešći oblici geometrijske konfiguracije komunalnih deponija (Repetto, 1995) javljaju se:

- *površinsko nasipanje* (Slika 2.1) - deponija se formira direktno na terenu ili sa malim iskopom. Ovaj oblik primenjuje se u terenima sa visokim nivoom podzemnih voda ili tamo gde je teren nestabilan.



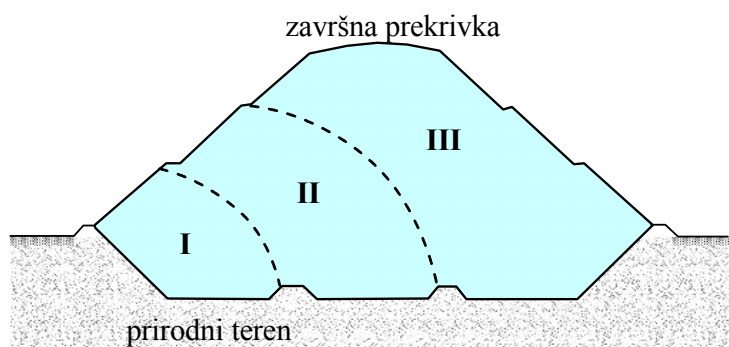
Slika 2.1 Deponija formirana površinskim nasipanjem

- *iskop u terenu ili ispuna rovova* (Slika 2.2) - otpad se nasipa u seriji dubokih i tesnih rovova a koristi se u slučaju malih količina otpada. U nekim zemljama se koristi i kao metod za skladištenje opasnog otpada.



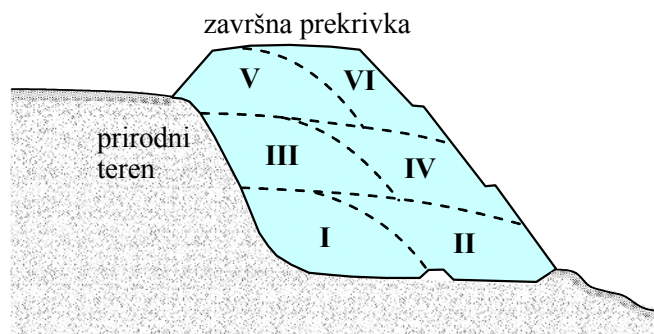
Slika 2.2 Deponija formirana iskopom rovova u terenu

- kombinacija nasipanja ispod i na površini terena (Slika 2.3) – deponija je jednim delom ukopana a drugim delom je na površini terena tako da predstavlja kombinaciju prethodna dva tipa. Dubina iskopa zavisi od dubine prirodne nepropusne podloge - najčešće gline i nivoa podzemne vode.



Slika 2.3 Deponija formirana nasipanjem ispod i na površini terena

- zatrpavanje postojećih prirodnih depresija tzv. kanjonska ispuna ili "popuna doline" (Slika 2.4) - otpad se nasipa između brda a kasnije se teren ravna.



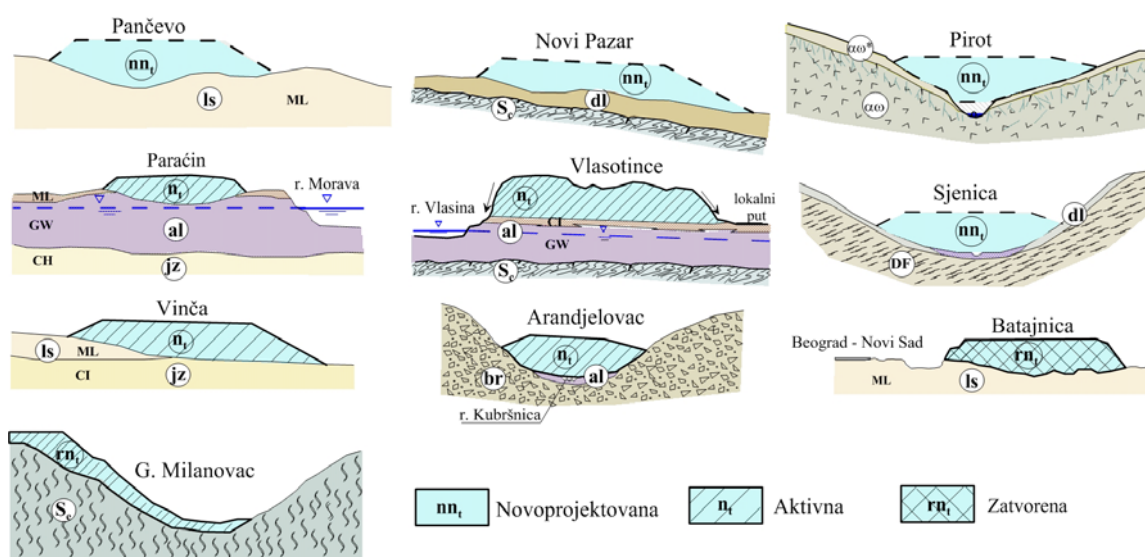
Slika 2.4 Deponija formirana zatrpavanjem postojećih prirodnih depresija

Svakako da je dispozicija deponije uslovljena geološkim karakteristikama terena. To se pre svega odnosi na:

- pogodnost lokalnog tla za formiranje baze deponije – mehaničke karakteristike podloge (prihvatljiva čvrstoća i deformabilnost);
- mogućnost proceđivanja filtrata i gasa u prirodni teren – hidraulička provodljivost podloge/temelja i okolnog tla (vodopropustljivost, podložnost zagađenju, kapacitet prečišćavanja);
- ocenu prirodnog rizika (seizmičnost, mogućnost pojave savremenih procesa);
- blizinu i kvalitet lokalnih materijala koji će se koristiti za dnevne prekrivke i sl.

Ovi geološki podaci se obično analiziraju prilikom procesa izbora lokacije, a kasnije se dopunjavaju geotehničkim i hidrogeološkim istraživanjima (Rakić i dr., 2012b).

U Srbiji se najčešće primenjuje površinsko nasipanje otpada (po pravilu u blizini rečnih tokova), ili se vrši zatrpavanje postojećih prirodnih depresija. Za većinu deponija u Srbiji može se reći da su locirane tako da izazivaju opasnost po zdravlje stanovništva i životnu sredinu. Na Slici 2.5 prikazani su karakteristični geometrijski oblici postojećih, rekultivisanih i novoprojektovanih komunalnih deponija za neke gradove u Srbiji (Rakić i dr., 2006).



Slika 2.5 Geološki sastav terena sa karakterističnim geometrijskim oblicima deponija u Srbiji

Na prikazanim modelima komunalnih deponija, vidi se da je telo deponije njen najveći konstruktivni element. Može se reći da je to “živi” element deponije koji je izložen stalnim promenama, jer nije u potpunosti stabilizovan. Za telo deponije može se reći da ima najznačajniji uticaj na preostale konstruktivne elemente. Telo deponije vremenom menja svoje biološke, fizičke i mehaničke osobine, čime se ugrožavaju zaštitni sistemi i sistemi za evakuaciju filtrata i gasova, a u nekim slučajevima dolazi do pojava nestabilnosti. Pored toga, i geometrijske karakteristike deponije, pre svega visina usled dodavanja novih slojeva, ali i nagibi kosina, stalno se menjaju. Visina nekih deponija iznosi više desetina metara, a zapremina po nekad premašuje milione kubnih metara. Primera radi, jedan grad od oko 100 000 stanovnika, dnevno proizvede prosečno od 80 – 100 tona otpada (prosečno od 0.8 – 1.0 kg po stanovniku). Ako se za prosečni vek deponije uzme period od oko 20 god, to znači da na deponiji treba smestiti od 600 000 do 750 000 tona otpada, odnosno, sa prosečnom zapreminskom težinom otpada koja se kreće od 6 - 11 kN/m³ (u zavisnosti od načina odlaganja, zbijanja, povremenog ili stalnog prekrivanja kao osrednjena vrednost može se uzeti 9 kN/m³), zapremina otpada na takvoj jednoj deponiji, iznosila bi od 550 000 – 650 000 m³. Takva jedna deponija može da zauzme površinu dimenzije 200 x 200 m i visine 15 m, ili slikovito rečeno, 5 fudbalskih terena pokrivenih otpadom visine 15 m (Rakić, 2011).

2.2 KONSTRUKTIVNI ELEMENTI KOMUNALNIH DEPONIJA

Kao što se vidi, izgradnja komunalne deponije nije moguća bez zaštitnih sistema čija je uloga da spreče širenje zagađenja iz tela deponije u prirodni teren, i da otpad izoluju od spoljnih uticaja.

Najbitniji zaštitni sistemi deponije komunalnog otpada su:

- *obložni sistemi u osnovi i na bokovima* - sastoje se od višeslojnih barijera koje se po pravilu izvode od zbijene gline, geosintetičkih glinenih slojeva i/ili njihovom kombinacijom, geosintetičkih geomembrana i drenažnih slojeva. Za obložne sisteme se može reći da su najvažniji elementi deponije, jer moraju u potpunosti sprečiti isticanje filtrata iz tela deponije;

- *prekrivni završni sistemi* – pored barijere čine ih i drenažni slojevi, a njihova osnovna uloga (pored zaštite nižih slojeva od oštećenja i mržnjenja) je ograničeni dotok atmosferskih voda tokom odlaganja otpada i potpuno sprečavanje infiltracije atmosferskih voda u deponiju nakon njenog zatvaranja;
- *sistemi za zaštitu deponije od atmosferskih padavina* - po pravilu se izvode sistemi horizontalnih drenova – kanala i ređe rigola.

Uređenu deponiju karakteriše i postojanje sistema za sakupljanje i evakuaciju filtrata i sistema za sakupljanje i kontrolu gasova, koji nastaju u unutrašnjosti tela deponije:

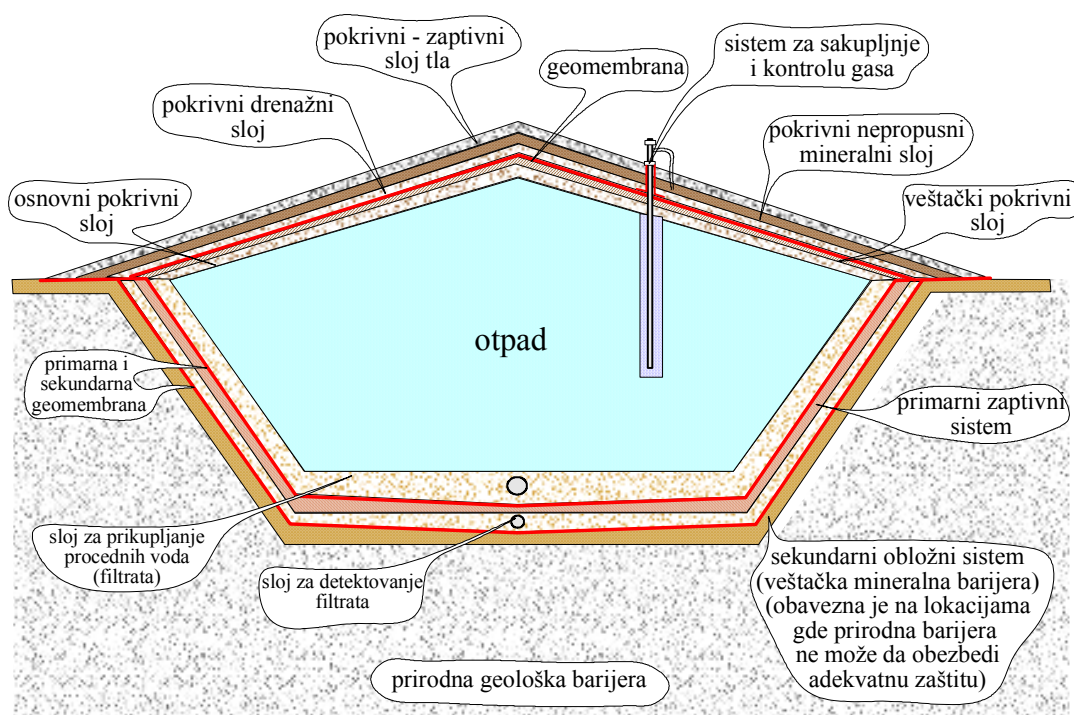
- *sistemi za sakupljanje i otklanjanje filtrata iz tela deponije* (primarnog ili sekundarnog) - njihovom evakuacijom sprečava se povećanje pritiska na zaštitne obloge deponije. Po pravilu se posebnim sistemom izvode van tela deponije i podvrgavaju određenom tretmanu u stanici za prečišćavanje ili se vrši recirkulacija;
- *sistemi za sakupljanje, kontrolu, osmatranje i iskorišćavanje deponijskog gasa* - količine gasa mogu biti znatne i uglavnom se radi o metanu i ugljen dioksidu. U razvijenim zemljama koriste se za stvaranje energije a prema nekim procenama danas u svetu postoji više od 1150 postrojenja (kogeneratora) za iskorišćavanje deponijskog gasa.

Pored pomenutih zaštitnih sistema, na uređenoj deponiji se uspostavlja i sistem monitoringa, a u sklopu deponije su i odgovarajući prateći objekti:

- *sistemi za nadzor, kontrolu i praćenje podzemnih voda i deponijskog gasa* (monitoring) – njihov osnovni cilj je pravovremena detekcija ispuštanja procednih voda i gasa iz deponije bez obzira na sprovedene mere zaštite. Sprovodi se u skladu sa lokalnim uslovima, a započinje već u početnoj fazi izgradnje deponije (pre samog odlaganja otpada) a traje i nakon zatvaranja deponije;

- *sistemi za prijem otpada i rad na deponiji* - ovim sistemima vrši se kontrola odlaganja otpada kao i procesa razgradnje otpada čime se sprečava njegov uticaj na okolinu.

Uopšteni konstruktivni elementi komunalne deponije, prikazani su na Slici 2.6.



Slika 2.6 Konstruktivni elementi deponije komunalnog otpada (Environment Agency, 2002)

Osnovni pojmovi: **Telo deponije** – prostor na kome se odlaže otpad; **Baza deponije** – površina na koju se oslanja telo deponije; **Bazni obložni sistem** – zaštita baze deponije za sprečavanje nekontrolisanog prodiranja filtrata i deponijskog gasa u tlo, kao i za zaštitu od prodora podzemne vode u telo deponije; **Bočni obložni sistem** – zaštita bočnih strana deponije koja je slična baznom obložnom sistemu; **Prekrivni zaštitni sistem** – zaštita gornje površine tela deponije za sprečavanje nekontrolisanog izlaza deponijskog gasa i nekontrolisanog ulaza spoljnih voda u telo deponije (procedne vode, kiša, sneg); **Završni prekrivni sistem** – završni rekultivirajući sloj od zemljanog materijala koji se postavlja iznad prekrivnog zaštitnog sistema, najčešće u kombinaciji sa drenaznim slojem; **Deponijski gas** – nastaje razgradnjom organskog materijala u telu deponije; **Filtrat** (eluat, procedna voda) – tečnost koja se cedi kroz telo deponije a sadrži mnoge organske i neorganske sastojke (može biti primarni-tečnost istisnuta iz samog otpada i sekundarni-spoljašnja tečnost infiltrirana u otpad).

2.3 OSNOVNI GEOTEHNIČKI PROBLEMI NA DEONIJAMA

Odlaganje otpada na deponiji podrazumeva veoma dug vremenski period (obično dvadesetak i više godina). Iz tih razloga neophodno je sprovoditi geotehničke analize koje uključuju:

- sleganje podloge i otpada u okviru same deponije sa analizom uticaja na okolne objekte;
- stabilnosti kosina deponije ili prirodnog terena ukoliko se vrše dublji iskopi;
- proveru nosivosti podloge ili same deponije ukoliko se planira izgradnja objekata na deponiji;
- interakcije otpada sa prirodnim, odnosno veštačkim materijalima koji se koriste kao zaštitni sistemi;
- nepropusnost zaštitnih slojeva u osnovi i na površini;
- uslove iskopa i pripreme podloge za telo deponije;
- uređenje terena sa uslovima izgradnje pratećih i infrastrukturnih objekata.

Većina deformacija nastaje usled interakcije prirodnog terena ili zaštitnih obložnih i prekrivnih sistema sa komunalnim otpadom u telu deponije. Zato je za potrebe projektovanja deponija, neophodno poznavanje osnovnih fizičko-mehaničkih karakteristika prirodnog terena i komunalnog otpada. Iako nije moguće u potpunosti definisati fizičko-mehaničke karakteristike otpada, pre svega zbog njegove heterogene prirode, važno je da se one razumeju i da se što tačnije definiše interval najčešćih vrednosti.

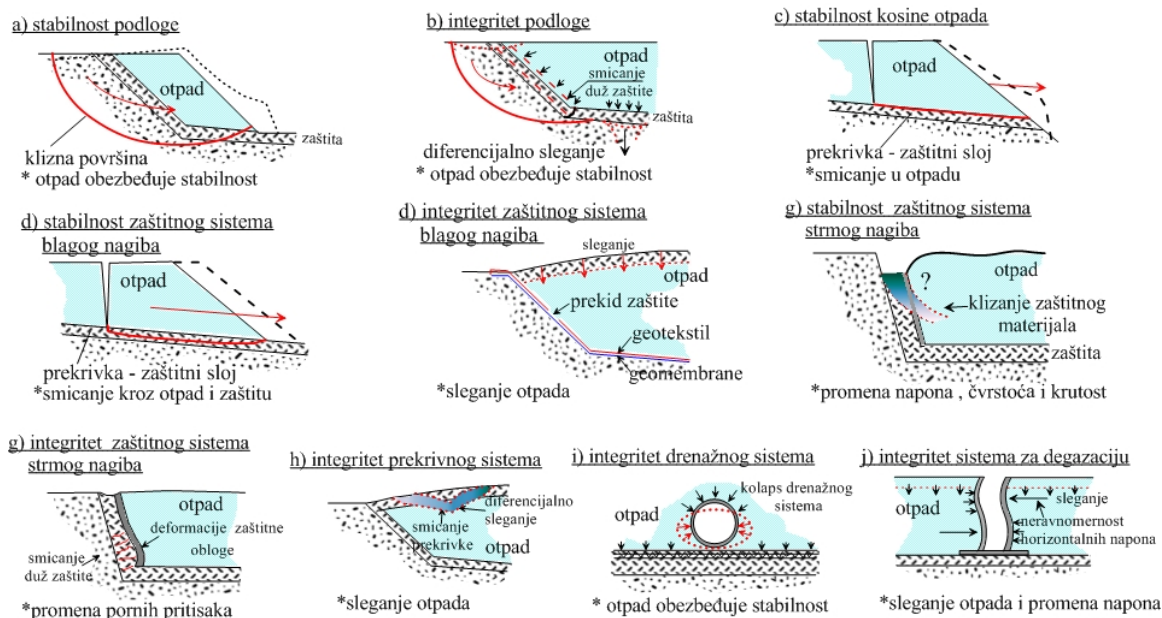
U Tabeli 2.1, prikazane su osnovne fizičko-mehaničke karakteristike komunalnog otpada koje je neophodno poznavati da bi se izvršilo pravilno projektovanje, odnosno da bi se izbegle moguće deformacije na infrastrukturnim delovima deponije.

Tabela 2.1 Osnovne fizičko-mehaničke karakteristike komunalnog otpada neophodne za projektovanje (Dixon & Jones, 2005)

Slučaj za analiziranje	Zapreminska težina	Stišljivost	Čvrstoća smicanja	Vodopropustljivost
Stabilnost podloge deponije	+		+	
Integritet podloge	+		+	
Stabilnost kosine deponije	+	+	+	+
Stabilnost zaštitnog sistema blagog nagiba	+		+	+
Integritet zaštitnog sistema blagog nagiba	+	+	+	
Stabilnost zaštitnog sistema strmog nagiba	+		+	+
Integritet zaštitnog sistema strmog nagiba	+	+	+	
Integritet prekrivnih sistema	+	+	+	
Integritet drenažnih sistema	+			
Integritet sistema za degazaciju	+	+	+	+

Klizanje kosina deponija nije svakodnevno, ali se dešava redovno u zemljama širom sveta. Zato je **stabilnost kosina**, kod svih nasutih geotehničkih objekata, među koje spadaju i deponije komunalnog otpada, bitan geotehnički problem koji treba analizirati. Visina deponije, u većini slučajeva prelazi desetak metara pa je klizanje njenih kosina vrlo česta pojava (Rumpke SAD, 1996; Don Juan Kolumbija 1997; Payatas Filipini, 2000. – stradalo 270 ljudi; Ano Liosia Grčka 2003; Leuwigajah Indonezija 2005. – stradalo 147 ljudi).

Upotreba geosintetičkih materijala donosi višestruke koristi kod izgradnje deponija komunalnog otpada (Rakić & Dragaš, 2002). Međutim, klizanje kosina javlja se i na deponijama koje su izgrađene korišćenjem geosintetičkih materijala, bez obzira što su projektovane na osnovu ustaljene prakse. Koerner & Soong (2000), odnosno Dixon & Jones (2005), prikazuju karakteristične vidove deformacija i oštećenja na komunalnim deponijama, koji mogu dovesti do većih nestabilnosti u podlozi i na kosinama deponija (Slika 2.7). Može se zapaziti da se najčešći vidovi oštećenja dešavaju zbog formiranja kliznih ravni na kontaktima između različitih komponenti sistema (na primer geosintetik-geosintetik, geosintetik-otpad, geosintetik-prirodni teren).

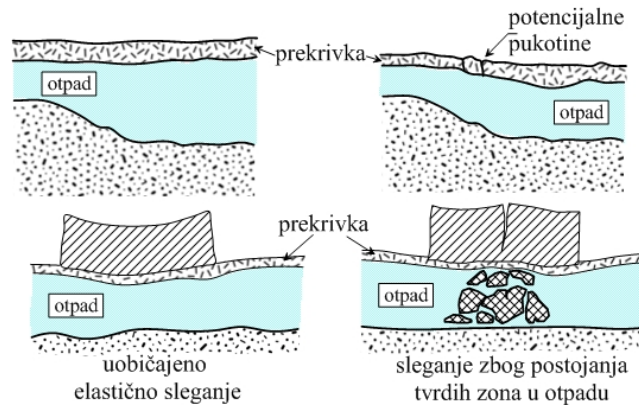


Slika 2.7 Modeli najčešćih pojava deformacija na infrastrukturnim delovima deponije (Dixon & Jones, 2005)

Zbog svega iznetog, neophodna je geotehnička analiza preventivnih mera za stabilizaciju kosina deponije. Ona uključuje: izbor nagiba kosine za traženi faktor sigurnosti, postavljanje zaštitnih sistema u osnovi, armiranje kosina, postavljanje površinskih zaštitnih sistema, poznavanje načina odlaganja otpada i sl. To podrazumeva i korišćenje savremenih tehnika numeričkog modeliranja, gde se uključuju i fizičko-mehaničke karakteristike komunalnog otpada. Ovakve vrste analiza pomažu u odabiru parametara čvrstoće smicanja komunalnog otpada koji se koriste u konvencionalnim procenama stabilnosti. One omogućuju analize za potencijalne klizne površine koje se najčešće odnose na kontakt otpada i prirodnog tla ili otpada i veštačkih-geosintetičkih materijala koji se koriste kao zaštitni sistemi. Ukoliko se ponašanje komunalnog otpada poistoveti sa ponašanjem sredina izgrađenih od mineralnih čestica (tla), onda se i čvrstoća smicanja može predstaviti Kulon-Morovom jednačinom čvrstoće smicanja, odnosno parametrima čvrstoće smicanja. Analize koje se tom prilikom sprovode, koriste konkretne numeričke podatke – parametre čvrstoće smicanja: ugao unutrašnjeg trenja - φ' ili φ'_{mob} i tzv. "prividnu koheziju" - c' ili c'_{mob} . Vrednost ovih parametara zavisi od: sastava komunalnog otpada, starosti otpada i stepena dekompozicije, vlažnosti i prisustva atmosfere vode, načina odlaganja tj. stepena zbijanja, debljine sloja, količine i vrste dnevnog pokrivača i sl. Pri tome, treba imati u vidu da je oblikovanje tela deponije vremenski uslovljeno, što za posledicu ima i promenu čvrstoće smicanja.

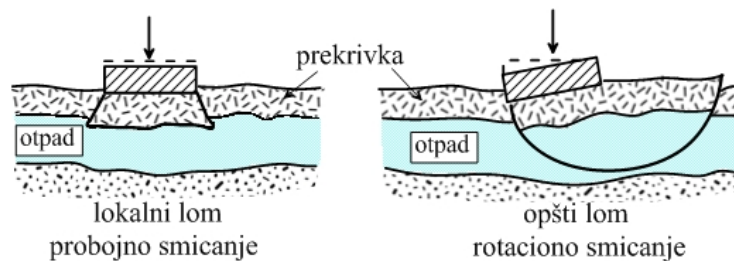
Sleganje tela deponije može da izazove negativne posledice tokom njenog korišćenja ali i u periodu nakon njenog zatvaranja. Najveći deo sleganja nastaje kao posledica stišljivosti samog otpada (Slika 2.8). Pored toga, u nekim slučajevima izražena su i sleganja podloge. Poseban problem predstavljaju i dugotrajni biohemijski procesi u otpadu koji su neravnomerni pa često izazivaju nagla dodatna sleganja. Iz tih razloga se na deponijama vrši zbijanje otpada pri odlaganju, čime se zauzima manji prostor a smanjuju se i naknadna sleganja. U zavisnosti od visine deponovanog materijala, ukopavanja pojedinih etaža ispod prirodne kote terena i karakteristika otpada i podinskih slojeva, dešavaju se neravnomerna sleganja koja mogu da imaju negativne posledice na zaštitne sisteme. To se naročito manifestuje oštećenjima u zaštitnim slojevima u podlozi, pucanju i cepanju slojeva završnog pokrivača, poremećajima u funkcionisanju drenažnih sistema, nemogućnosti korišćenja površina iznad deponije kao

građevinskog zemljišta i dr. Sleganja mogu nastati i zbog izgradnje objekata na površini deponije, pa osim navedenih negativnih uticaja, mogu se očekivati i njihova oštećenja. Pored toga, način odlaganja, starost i sastav otpada, takođe su važni faktori za procenu vremenskog sleganja. Rešavanje ovog problema, jedan je od najvažnijih geotehničkih zadataka vezanih za deponije komunalnog otpada.



Slika 2.8 Šematski prikaz sleganja otpada

Takođe treba reći da se u poslednje vreme nameće i pitanje korišćenja starih (zatvorenih) deponija komunalnog otpada za građenje, s obzirom da je sve manje prostora za izgradnju raznih objekata (rekreativni centri, hale, skladišta, dečja igrališta i sl.). U takvim slučajevima kao poseban geotehnički problem, javlja se **dozvoljena nosivost** otpada (Slika 2.9). Prema nekim istraživanjima, vrednosti dozvoljenih opterećenja komunalnog otpada su dosta male i kreću se u rasponu od $q_{doz} = 25 - 40 \text{ kN/m}^2$.



Slika 2.9 Oblici proloma otpada opterećenog temeljom

2.4 ZAKLJUČAK

Strogi ekološki kriterijumi vezani za određivanje lokacije deponije, intenzivna urbanizacija a pre svega nespremnost ljudi da žive u blizini deponije, sužavaju izbor slobodnih lokacija za izgradnju novih komunalnih deponija. Otuda se u razvijenim zemljama već uveliko koriste visoke tehnološke mogućnosti prerade otpada. Ipak, za naše uslove to je još uvek nedostižno, pa je klasičan način odlaganja otpada na komunalnim deponijama, ostao najjednostavnije i najjeftinije rešenje. Ova situacija dovodi to toga da se otpad i dalje odlaže na postojeće deponije, šireći ih tako i u horizontalnom ali i u vertikalnom pravcu izgradnjom strmijih kosina, što je često znalo da nas opomene velikim rušenjima i znatnim sleganjem, jer su u pitanju zapremine koje premašuju milione kubnih metara otpadnog materijala. Posledice su bile teške, jer je pored zagađenja životne sredine i prekida rada deponije, dolazilo i do gubitka ljudskih života. Sve to podrazumeva rešavanje niza problema kao što su: ekološki, ekonomski, hidrološki, infrastrukturni, građevinski, pa i geološki. Iz toga se vidi da problematika odlaganja komunalnog otpada, generalno ne spada ni u jednu tradicionalnu inženjersku disciplinu, već je u pitanju interdisciplinarno naučno područje. Medjutim, često se kod projektovanja deponija komunalnog otpada ne uvažava u dovoljnoj meri značaj geoloških podloga, što može da izazove određene ekološke posledice po životnu sredinu. U okviru geoloških, svakako se ne smeju zanemariti geotehnički aspekti, pre svega stabilnost kosina, prognoza veličine i vremena sleganja otpada kao i nosivost otpada.

POGLAVLJE 3

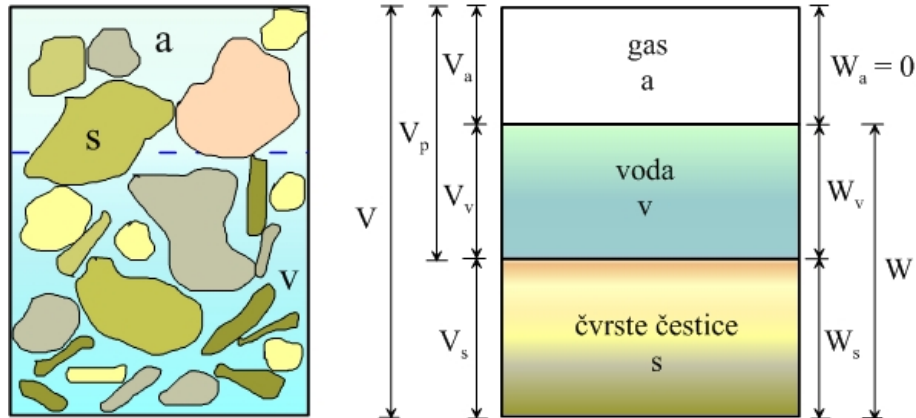
OSNOVNI POKAZATELJI FIZIČKOG STANJA KOMUNALNOG OTPADA

U literaturi se mogu naći različite vrednosti pokazatelja fizičkog stanja komunalnog otpada. Osnovne razloge treba tražiti u različitim definicijama i postupcima koje su istraživači koristili prilikom njihovog utvrđivanja. To dodatno otežava poređenje dobijenih rezultata, pa je zato neophodno utvrditi opšte postupke ispitivanja.

Zbog određene sličnosti komunalnog otpada i tla, najčešće se pri određivanju osnovnih pokazatelja fizičkog stanja, koriste laboratorijski i terenski opiti, koji su uobičajeni kod geotehničkih istraživanja. Međutim, za razliku od tla, određivanje fizičkih pokazatelja komunalnog otpada je složenije zbog njegovog izrazito heterogenog sastava, konzistencije, biorazgradljivosti i sl. Pored toga, fizičke osobine otpada menjaju se vremenom, kako po dubini tako i od lokacije do lokacije pa je i način uzimanja i izbor reprezentativnih uzoraka problematičan i još uvek kod nas nije standardizovan. Zato se često izrađuju i namenski aparati kako bi se sproveda određena laboratorijska i terenska ispitivanja.

3.1 OPŠTE O ODNOSU FAZA U KOMUNALNOM OTPADU

I za komunalni otpad, se kao i za tlo, najčešće podrazumeva da se sastoji iz tri faze: čvrste, tečene i gasovite, a njihovo relativno učešće u masi, opisuje se odgovarajućim pokazateljima. Uopšteno, odnos pojedinih faza u uzorku komunalnog otpada može se predstaviti modelom koji je prikazan na Slici 3.1.



Slika 3.1. Uopšteni model faznog sastava koji se koristi kod tla

Polazeći od osnova mehanike tla, fazni pokazatelji komunalnog otpada, definišu se na osnovu konstitutivnih odnosa koji se mogu izraziti preko tri osnovna fizička parametra, uz pretpostavku da je poznata zapreminska težina vode ($\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$) kao i zapreminska težina čvrstih čestica (γ_s). Najčešće su to:

- suva zapreminska težinu (γ_d), izražena težinsko-zapreminskim odnosom - W_s/V
- poroznost (n), izražena zapreminskim odnosom - V_p/V i
- vlažnost (w), izražena težinskim odnosom - W_v/W_s .

Sva tri parametra definišu se preko težine – W (ili mase – m) i zapremine – V . Ovakav koncept je pogodan jer se na osnovu toga mogu izvesti i ostali bitni fizički parametri koji se koriste u geotehničkoj praksi. Svakako da se mogu koristiti i neka druga tri pokazatelja, kao što su zapreminska težina čvrstih čestica (γ_s), koeficijent poroznosti (e) i recimo stepen zasićenja (S_r). Međutim, treba napomenuti da je zapreminska težina čvrstih čestica tla, osim za organske materije, približno oko 26.5 kN/m^3 , dok je kod komunalnog otpada njeno određivanje dosta složeno, a vrednost dosta varira, jer se vezuje za zapreminsku težinu čvrstih čestica svake od komponenata komunalnog otpada. Definicije osnovnih pokazatelja kao i njihove međusobne relacije, u odnosu na tri osnovna fizička parametra, prikazane su u Tabeli 3.1.

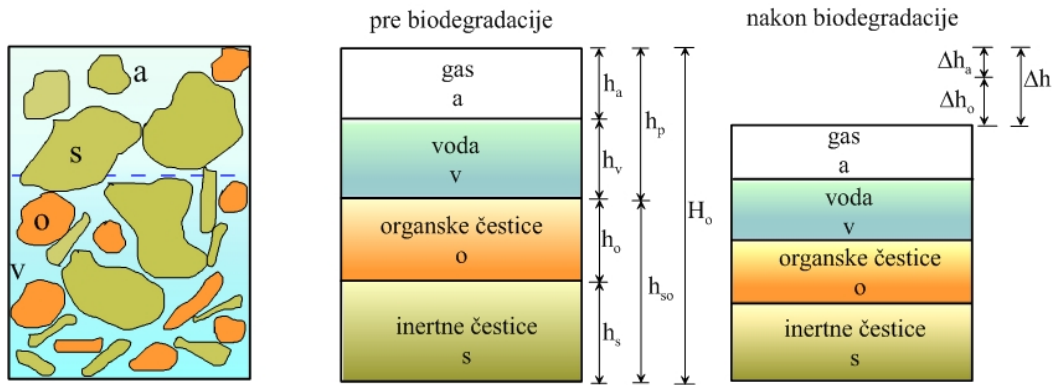
Stalna cirkulacija gasa i tečnosti kroz komunalni otpad, tj. deponiju, direktno utiče na promenu strukture otpada. Pored toga, na deponiji je izražen i proces biorazgradnje koji

je najizraženiji kod organskih čestica. Zbog te specifične porozne strukture, fazni sastav komunalnog otpada je izuzetno promenljiv i to na relativno malom rastojanju.

Tabela 3.1. Definisane najvažnijih fizičkih pokazatelja komunalnog otpada

Parametar	Oznaka	Jedinica	Relacije
Zapreminska težina	γ	kN/m^3	$\gamma = W/V = (I + w) \cdot \gamma_d$
Koeficijent poroznosti	e	m^3/m^3	$e = V_p/V_s = \frac{n}{1-n}$
Zapreminska težina čvrstih čestica	γ_s	kN/m^3	$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} = \frac{\gamma_d}{1-n}$
Zapreminski sadržaj vode	v	$\text{m}^3/\text{m}^3 - \%$	$v = \frac{V_v}{V} = w \cdot \frac{\gamma_d}{\gamma_w}$
Zapreminski sadržaj gasa	a	$\text{m}^3/\text{m}^3 - \%$	$a = \frac{V_a}{V} = n - w$
Stepen zasićenja	S_r	$\text{m}^3/\text{m}^3 - \%$	$S_r = \frac{V_v}{V_p} = \frac{w}{n}$
Stepen areacije	A	$\text{m}^3/\text{m}^3 - \%$	$A = \frac{V_a}{V_p} = \frac{a}{n} = 1 - S_r$

Prikazani trofazni sistem za komunalni otpad, ne uzima u obzir činjenicu da se sadržaj, a time i zapremina organskih materijala, vremenom menjaju. U okviru ovog rada, organske čestice svrstane su u čvrstu fazu za koju se u mehanici tla pretpostavlja da joj se ukupna zapremina ne menja. Međutim, postoji i drugačije predstavljanje faznog sastava komunalnog otpada. Machado i dr., (2008), predložili su četvorofazni sistem koji se sastoji od: gasa, vode, vlakana i lepljivih materijala, nalik pasti. U okviru vlaknaste faze autori su uvrstili plastične materijale, tekstil i ostale slične materijale. Ovako definisan četvorofazni sistem, deli čvrste materijale po vrsti i obliku a ne uzima u obzir njihovu vremensku promenljivost. Nešto drugačiji predlog dat od strane Gourc i dr., (2010), prema kojima se komunalni otpad takođe definiše kao četvorofazni sistem koji se sastoji od: inertne – čvrste (s), organske (o), tečne (v) i gasovite (a) faze (Slika 3.2). Inertnu fazu čine nerazgradljivi materijali kao što su plastika, metal, komadi stena, keramike, stakla i sličnih materijala. Svi ostali materijali sačinjavali bi organsku fazu. Ovakav četvorofazni prikaz faznog sastava komunalnog otpada, omogućuje da se osnovni fizički pokazatelji odrede u određenoj fazi razgradnje, i da se na taj način prikaže njihova promena, ukoliko su poznati početni uslovi.



Slika 3.2. Promena faznog sistema komunalnog otpada u toku biodegradacije

Vrednosti osnovnih fizičkih parametara u određenoj fazi biorazgradnje, jednostavno se mogu odrediti na osnovu sledećih izraza:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_{d0}}{1 - \frac{\Delta h}{H_0}} \quad (3.1)$$

$$n = n_0 - \Delta n = n_0 - \frac{(1 - n_0) \frac{\Delta h}{H_0}}{1 - \frac{\Delta h}{H_0}} \quad (3.2)$$

$$w = w_0 - \frac{m_{vd}}{m_s} \quad (3.3)$$

gde je:

m_s , m_{vd} – početna suva masa i masa izdrenirane vode

γ_{d0} , γ_d – početna suva zapreminska težina i suva zapreminska težina u određenoj fazi razgradnje

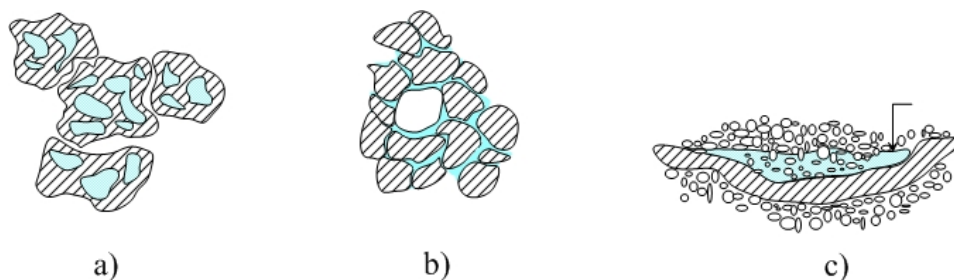
n_0 , n – početna poroznost i poroznost u određenoj fazi razgradnje

w_0 , w – početna vlažnost i vlažnost u određenoj fazi razgradnje

3.2 VLAŽNOST

Prema König & Jessberger (1997), vlažnost komunalnog otpada zavisi od više faktora kao što su: sastav i osobine otpada, lokalni klimatski uslovi, stepen biloškog raspadanja (količine vode proizvedene biloškim procesima) kao i kapacitet i efikasnost samog tehnološkog sistema za sakupljanje i evakuaciju filtrata.

Zornberg i dr., (1999) su vlažnost komunalnog otpada klasifikovali na osnovu mehanizma zadržavanja tečnosti unutar pornog prostora otpada na: a) vlažnost unutar čestica otpada tj. vlažnost u porama unutar čestica, b) vlažnost između čestica tj. u porama između čestica i c) vlažnost koju zadržavaju čestice otpada sa slabom hidrauličkom provodljivošću (Slika 3. 3).



Slika 3.3. Različiti vidovi tečnosti unutar pornog prostora otpada (Zornberg i dr., 1999)

U literaturi se mogu naći veoma široki intervali vlažnosti komunalnog otpada. Ona se menja sa godišnjim dobom tj. padavinama. Po pravilu je vlažnost komunalnog otpada najveća u prolećnom i jesenjem periodu (oko 50%), jer je pored većih padavina i udeo organskih komponenti najveći. U letnjem i zimskom periodu, prosečna vlažnost komunalnog otpada iznosi oko 30% ("Plan upravljanja komunalnim otpadom", 2003). Huitric (1981) i Tchobanoglous (1993) napominju da se kod većine otpada iz domaćinstva u SAD, vlažnost kreće u granicama od 15% do 40%, tj. 45%. Siegel i dr. (1990) su sušenjem malih uzoraka na temperaturi od 60°C, za komunalni otpad deponije Oll, konstatovali interval vlažnosti između 10-45%. Gabr & Valero (1995) su konstatovali da vlažnost raste sa dubinom i naveli su karakterističan profil gde je vlažnost blizu površine terena iznosila 30% dok je na većim dubinama izmerena vrednost od preko 130%. Međutim, ima i drugačijih slučajeva jer Coumoulos i dr. (1995), navode da u deponiji Ano Liosia u Atini u Grčkoj, vlažnost opada sa dubinom, počevši od maksimalne vrednosti od 150 % u površinskom delu, preko prosečne vrednosti od 60 % na dubini od 15 m, a sa porastom dubine smanjuje se na oko 30%.

König & Jessberger (1997) vršili su merenje vlažnosti u dve faze, najpre sušenjem uzoraka na temperaturi od 70°C a kasnije i na temperaturi od 105°C. Zornberg i dr. (1999), određivali su vlažnost posebno na uzorcima mase otpada od oko 22.5 kg, uzetim direktno iz bušačkog pribora pomoću pistona - kašike, a posebno vađenjem manjeg

uzorka iz bušačeg pribora (mase oko 1.3 kg) i odlaganjem u staklene posude. Uzorke su vadili sa različitih dubina i sušili u sušnici na temperaturi od oko 85°C. Rezultati dobijeni na manjim uzorcima (iz staklenih posuda), pokazali su veće rasipanje. Prosečna vrednost vlažnosti iznosila je oko 28 %, bez jasne tendencije njenog povećanja sa dubinom. Gomes i dr. (2002) određivali su vlažnost sveže odloženog otpada koja se kretala u granicama od 61-96%, i otpada starosti od 2 do 3 god., čija je vlažnost iznosila oko 117 %. Veliki uticaj na promenu vlažnosti otpada imaju i klimatski uslovi, pre svega padavine. Tako su Blight i dr. (1992), pokazali da se vlažnost otpada na dubini 3-5 m povećala dva puta za period od svega dve godine (od 1988 do 1990), zbog izraženih padavina. Prema podacima preuzetim iz “Plana upravljanja komunalnim otpadom”, za neke gradove u Srbiji (Subotica) vlažnost iznosi 25 - 30% u letnjem i zimskom periodu dok je u prolećnom i jesenjem periodu, vlažnost dva puta veća, i kreće se oko 60%.

Međutim, iz prethodnog se može videti da su prilikom određivanja vlažnosti otpada, korišćeni i različiti postupci, što otežava poređenje rezultata raznih istraživača. Vlažnost komunalnog otpada, najčešće se definiše kao i vlažnost tla i to preko odnosa gubitka mase i mase preostalog materijala, dobijene sušenjem do konstantne temperature (najčešće od 55-60⁰C zbog opasnosti od sagorevanja nekih materijala na većim temperaturama). Kod ispitivanja vlažnosti otpada, trebalo bi navesti njegov sastav i veličinu čestica. Neki od autora (npr. Zeccos*, 2005), predlažu da se vlažnost određuje na česticama sitnijim od 20 mm i da se naznači temperatura sušenja. Opšti matematički izraz za definisanje vlažnosti komunalnog otpada, može se dati u sledećem obliku:

$$w(T^{\circ}C) = \frac{m_m}{m_s} \cdot 100\% \quad (3.4)$$

gde je:

m_m – gubitak mase materijala tokom sušenja

m_s – masa materijala dobijena sušenjem do konstantne temperature

*Pomenuti autor, vlažnost je označio sa FGM, kao frakciju gubitka materijala na datoj temperaturi

U literaturi se mogu naći i nešto drugačije definicije vlažnosti otpada. Jedna od njih definiše vlažnost odnosom mase izgubljene tokom sušenja i početne mase uzorka (tzv. metoda vlažne mase).

Zornberg i dr. (1999) su prikazali vezu između zapreminskog učešća tečne faze v u odnosu na ukupnu zapreminu, i odnosa tečne mase i i mase dobijene sušenjem do konstantne vrednosti (gravimetrijskog sadržaja vlage):

$$v = \frac{\gamma_d}{\gamma_w} \cdot w \quad (3.5)$$

$$v = \frac{\gamma}{\gamma_w} \cdot \frac{w}{1 + w} \quad (3.6)$$

$$v = (1 - n) \cdot G_s \cdot w \quad (3.7)$$

$$w = \frac{v \cdot \gamma_w}{\gamma - v \cdot \gamma_w} \quad (3.8)$$

gde je:

v - zapreminski sadržaj tečnosti in situ i predstavlja odnos između zapremine tečnosti i ukupne zapremine uzorka ($v = V_w/V$)

γ - zapreminska težina prirodno vlažnog uzorka

γ_d - zapreminska težina suvog uzorka

γ_w - zapreminska težina vode

G_s - specifična težina

w - vlažnost

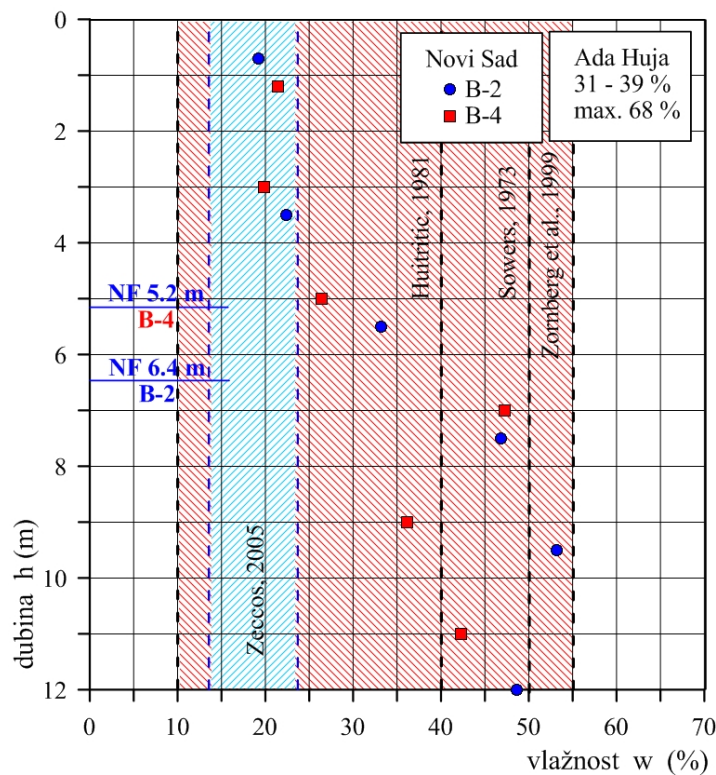
n - poroznost

Treba reći da se prikaz vlažnosti na ovaj način, najčešće upotrebljava u agronomiji i u fizici tla.

Za potrebe istraživanja u disertaciji, vlažnost je određivana na osnovu jednačine 3.4., a sušenje je obavljeno na temperaturi od 60°C. Analiziran je otpad uzet sa zatvorene deponije na Ada Huji i otpad sa aktivne deponije u Novom Sadu. S obzirom da je sa deponije na Ada Huji uzet kompletan otpad iz dve bušotine i pri tom je izmešan, uzorci

su proizvoljno izabrani za određivanje vlažnosti. Dobijene su vrednosti u intervalu od 31 – 39 %, s tim da je na jednom uzorku izmerena vlažnost od 68 %. Ovo ukazuje da zbog izražene heterogenosti otpada, moguće je stvaranje lokalnih zona sa izrazitim promenama vlažnosti u deponiji.

Kada je u pitanju deponija u Novom Sadu, vlažnost je određena na malim uzorcima otpada, koji su uzeti direktno iz bušotina B-2 i B-4. Dobijene su vlažnosti u intervalu od 19.2 – 53.2% a rezultati merenja, u odnosu na dubinu uzetog uzorka, prikazani su na Slici 3.4.



Slika 3.4. Promena vlažnosti u odnosu na dubinu uzetog uzorka

Može se videti da postoje velika odstupanja uglavnom zbog lokalnog sastava tla, i to na delu ispod konstatovanog nivoa deponijskog filtrata, što opet ukazuje na očiglednu promenljivost vlažnosti unutar deponije. Opšti je trend da se zbog povećanja stepena raspadanja sa dubinom, povećava i vlažnost otpada.

Vlažnost otpada dobijena ovim istraživanjima, kao i granične vrednosti vlažnosti prema pomenutim autorima, date su i u Tabeli 3.2.

Tabela 3.2. Intervali vlažnosti komunalnog otpada na deponijama

autor	vlažnost w (%)	autor	vlažnost w (%)	autor	vlažnost w (%)
Sowers, 1973	10 – 50	Siegel, 1990	10 - 45	Gabr & Valero, 1995	30 – 130
Huitric, 1981	15 – 40	Blight i dr., 1992	10 – 100	Zornberg i dr., 1999	10 – 55
Gifford, 1990	14 – 68	Tchobanougous, 1993	15 – 45	Zekkos, 2005	13 – 23
Landva & Clark, 1990	15 – 125	Coumoulos i dr., 1995	30 – 150	D. Rakić, 2013	19 – 68

Na kraju treba napomenuti da pored značajnog uticaja na geotehničke karakteristike otpada, vlažnost komunalnog otpada je od posebnog značaja i kod planiranja procesa njegove dalje prerade (npr. sagorevanja, kompostiranja), kao i kod organizacije transporta i privremenog skladištenja.

3.3 SADRŽAJ ORGANSKIH MATERIJAMA

Najveći deo organskih materija u komunalnom otpadu čine celuloza i hemiceluloza. Barlaz (1990) je konstatovao da je sadržaj organskih materija veći u površinskom delu deponije, jer je na većim dubinama sadržaj celuloze manji zbog potpunog raspadanja. Landva & Clark (1990) su utvrdili da sa povećanjem organskog sadržaja, raste i sadržaj vode. Wall & Zeiss (1995) konstatuju da se sa povećanjem organskog sadržaja, povećava deformabilnost a prema tome i indeks kompresije, pa zato sadržaj organskih materija ima značajnu ulogu kod određivanja stišljivosti komunalnog otpada. Barlaz (1990); Landva & Clark (1990); Gifford i dr., (1990), pokazali su da sadržaj organskih materijala, koji se javljaju na deponijama komunalnog otpada, varira u granicama od 5 - 75%. Gomes i dr. (2002) žarenjem materijala do konstantne mase na temperaturi od 450°C, utvrdili su sadržaj organskih materija kao gubitak mase u odnosu na konačnu masu, u intervalu između 43% i 63%.

Preporuka je da se reprezentativni uzorak materijala, pre žarenja proseje i razdvoji na dve frakcije: sitnije i krupnije od 20 mm. Izmere se njihove mase i nakon toga određuje se gubitak materijala, posebno na česticama sitnijim od 20 mm a posebno na česticama krupnijim od 20 mm, tokom tri faze zagrevanja. Prva faza podrazumeva zagrevanje na

temperaturi od 55°C do konstantne mase. Gubitak mase u odnosu na konstantnu masu u ovoj fazi se definiše kao vlažnost (w). Nakon toga, uzorci se zagrevaju do temperature od 105°C i opet konstatuju mase posebno analiziranih frakcija. Na kraju se samo uzorci materijala sitnijeg od 20 mm stavljaju u peć za žarenje, i zagrevaju na temperaturi od 440°C sve dok materijal ne dostigne konstantnu masu. Ovaj način je u skladu sa ASTM D2974-87 (1995) standardom, prema kome se sadržaj organskih materija (OS), definiše kao odnos mase izgubljenog materijala sitnijeg od 20 mm prema preostaloj masi materijala nakon zagrevanja, na temperaturi od 440°C. U ovom radu je za određivanje sadržaja organskih materija, primenjen isti postupak.

Međutim, posebno određivanje gubitka materijala na česticama sitnijim i krupnijim od 20 mm, može da dovede do zabune. Po pravilu, osnovu otpada sitnijeg od 20 mm, najčešće čini zemljasti materijal. On je po prirodi drugačiji od materijala sa česticama krupnijim od 20 mm jer se na situ pretežno zadržavaju čestice hartije, plastike, drveta, šljunka-šuta i drugih materijala. Treba napomenuti da gubitak materijala na temperaturi od 440°C, na uzorku sa česticama većim od 20 mm, nije iste prirode kao gubitak materijala na uzorku sa česticama manjim od 20 mm. Ukoliko se svaki od izdvojenih materijala posebno ispita žarenjem na temperaturi od 440°C, onda bi sadržaj organskih materija predstavljao zbirni sadržaj za sve izdvojene materijale u zavisnosti od procentualnog učešća mase u odnosu na ukupnu masu ispitanog materijala. Ovaj postupak je primenio Zekkos (2005), na jednoj grupi uzoraka, gde je sadržaj organskih materija odredio kao zbir gubitka različitih materijala nakon zagrevanja na temperaturi od 440°C, prema njihovom procentualnom učešću i to:

$$OS(440^{\circ}C)_{\text{otpad}} = 0.621 OS(440^{\circ}C)_{<19\text{mm}} + 0.14 OS(440^{\circ}C)_{\text{papir}} + 0.112 OS(440^{\circ}C)_{\text{drvo}} + 0.1 OS(440^{\circ}C)_{\text{šljunak}} + 0.027 OS(440^{\circ}C)_{\text{meki plastika}} = 96.2 \%$$

Međutim, sadržaj organskih materija na česticama sitnijim od 20 mm, iznosio je između 12 – 36%, što je znatno manje od vrednosti prikazane u gornjem izrazu.

Sastav otpada koji je korišćen u izradi ove disertacije, detaljnije je prikazan u Poglavljima 4 i 6. Radi se o otpadu koji je uzet sa deponije Ada Huja i deponije u Novom Sadu. Sadržaj organskih materija, određen je prema opisanom ASTM D2974-87

(1995) standardu, na prethodno izabranim reprezentativnim uzorcima koji su prosejani kroz sito sa otvorima 20 mm. Iskorišćena je manja količina prosejanog materijal (50 g) iz obe deponije, a ispitivanje je obavljeno i na jednom uzorku koji je predstavljao mešavinu otpada sa pomenutih deponija. Na svim uzorcima izvršeni su opiti žarenja na temperaturi od 440⁰C. Dobijene su sledeće vrednosti sadržaja organskih materija:

deponija Ada Huja	- 13.2%
deponija Novi Sad	- 13.8%
mešavina	- 14.6%

S obzirom da su vrednosti dobijene na materijalu sa česticama sitnijim od 20 mm, za određivanje sadržaja organskih materija otpada u deponijama, iskorišćen je postupak Zekkosa (2005). Autor je za različite materijale određivao procentualne gubitke mase nakon žarenja na temperaturi od 440⁰C, i dobio je sledeće vrednosti:

OS čestice <19 mm	– 22%
OS papir	– 148%
OS drvo	– 535%
OS šljunak	– 5%
OS meka plastika	– 50%

Na osnovu prikazanog sastava otpada na Slikama 4.21 – 4.23 (Poglavlje 4), određen je procentualni sadržaj pojedinih materijala, s tim da je izvršeno njihovo grupisanje na sledeći način:

tlo + nerazvrstano	= čestice < 20mm
keramika + metal + staklo	= šljunak
tekstil + plastika + guma	= meka plastika
papir	= papir
drvo	= drvo

Na osnovu toga dobijene su sledeće vrednosti sadržaja organskih materija, za pojedine deponije

$$OS_{Ada\ Huja} = 0.735 \times 13.2\% + 0.036 \times 148\% + 0.0098 \times 535\% + 0.129 \times 5\% + 0.09 \times 50\% = 25.4\%$$

$$OS_{\text{Novi Sad}} = 0.695 \times 13.8\% + 0.042 \times 148\% + 0.029 \times 535\% + 0.139 \times 5\% + 0.094 \times 50\% = 36.7\%$$

$$OS_{\text{Izmešan}} = 0.696 \times 14.6\% + 0.039 \times 148\% + 0.024 \times 535\% + 0.146 \times 5\% + 0.095 \times 50\% = 34.2\%$$

Iako su ispitivanja urađena na manjem broju uzoraka, dobijeni podaci pokazuju tendenciju smanjenja sadržaja organskih materija sa starošću otpada.

Landva & Clark (1990) prikazali su zavisnost vlažnosti i sadržaja organskih materija koja je karakteristična za stare deponije u Kanadi. Pored toga, oni su dali i prosečne vrednosti vlažnosti pojedinih komponenti otpada (Tabela 3.3). Ovi podaci su iskorišćeni da bi se na osnovu podataka koji se odnose na procentualni sadržaj izdvojenih materijala, kao i dobijenih podataka za sadržaj organskih materija, sračunala prosečna vlažnost na osnovu sledećeg izraza:

$$w = \frac{\sum w_i \cdot P_i}{100} \quad (3.9)$$

gde je:

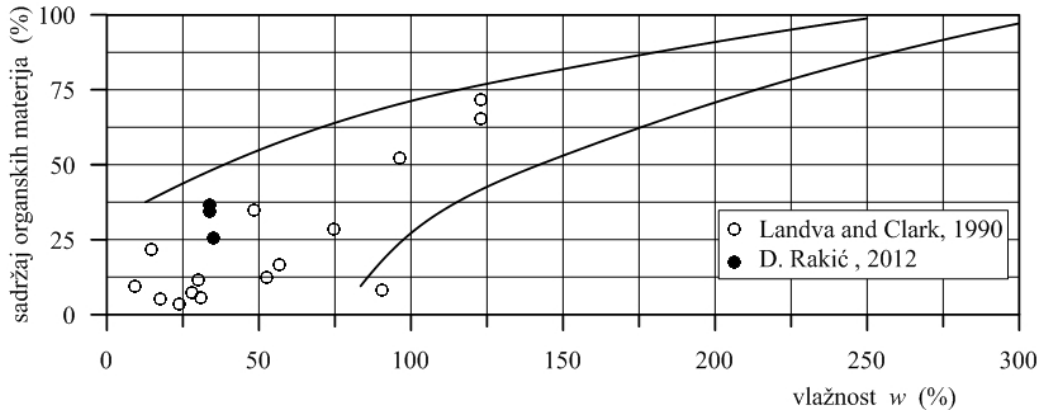
w_i – vlažnost izdvojenih komponenti u otpadu u (%)

P_i – procentualno maseno učešće izdvojenih komponenti (%)

Rezultati su prikazani u Tabeli 3.3 kao i na dijagramu na Slici 3.5.

Tabela 3.3. Prosečne vlažnosti i maseno učešće izdvojenih komponenti komunalnog otpada

izdvojene komponente	vlažnost izdvojenih komponenti w_i (%)	procentualno maseno učešće P_i (%)		
		Ada Huja	Novi Sad	Izmešani otpad
tlo+nerazvrstano	45	73.5	69.5	69.6
papir	20	3.6	4.2	3.9
plastika	10	5.6	6.3	6.3
tekstil	15	2.3	1.8	2.1
drvo	15	1.0	2.9	2.4
metal	2	1.9	2.4	2.2
staklo+keramika	2	10.9	11.6	12.3
ostalo	3	1.2	1.3	1.1
prosečna vlažnost w (%)		35.2	33.8	33.7



Slika 3.5 Veza vlažnosti i sadržaja organskih materija karakteristična za stari komunalni otpad

3.4 ZAPREMINSKA TEŽINA

Zapreminska težina jedan je od osnovnih fizičkih pokazatelja komunalnog otpada i veoma bitan parametar od koga zavisi i njegovo mehaničko ponašanje (utiče na stabilnost kosina deponije, izaziva sleganje podloge pa i samog tela deponije). Pored toga, ona predstavlja i jedan od osnovnih parametara na osnovu kojeg se planira veličina prostora za deponiju, vrste transportnih sredstava, mehanizacije za odlaganje i zbijanje i sl.

Najčešći načini određivanja zapreminske težine otpada su:

- direktna merenja na terenu (iskopom istražne jame na deponiji sa merenjem njene zapremine i težine iskopanog otpada; na uzorcima iz istražnih bušotina, Slika 3.6)
- na uzorcima u laboratoriji
- geodetskim snimanjem geometrije i sračunavanjem zapremine deponije i poznavanjem mase doveženog otpada i materijala za dnevne prekrivke
- na terenu nuklearnim metodama
- merenjem težine pojedinačnih komponenti i njihovog procentualnog učešća

Najpouzdaniji način određivanja zapreminske težine, svakako su terenske metode, jer se s obzirom na izrazitu heterogenost po sastavu, koristi relativno veliki uzorak. Landva & Clark (1990), predložili su određivanje zapreminske težine otpada, koji uzima u obzir

poroznost samih čestica, poroznost između čestica i stepen zasićenja. Prosečnu suhu zapreminsku težinu, odnosno ponderisanu zapreminsku težinu, na osnovu težinskih delova izdvojenih komponenti i njihovih suvih zapreminskih težina, oni su izrazili u sledećem obliku:

$$\gamma_{ds} = \frac{1}{\frac{1}{W_s} \cdot \sum_1^n W_i \cdot \frac{1}{\gamma_i}} \quad (3.10)$$

gde je:

γ_i – zapreminska težina čvrstog dela i -te komponente

W_i – suva težina i -te komponente

W_s – suva težina svih komponenti

n_i – ukupan broj izdvojenih komponenti



Slika 3.6. Određivanje zapreminske težine komunalnog otpada na terenu

Kada je otpad pod uticajem vode, tada zapreminska težina raste zbog komponentata koje su sklone upijanju vode. U tom slučaju je prosečna zapreminska težina komponentata jednaka:

$$\gamma = \gamma_{ds} \left[1 + \frac{1}{W_s} \cdot \sum_1^n W_i \cdot \frac{\Delta\gamma_i}{\gamma_i} \right] \quad (3.11)$$

gde je:

$\Delta\gamma_i$ - povećanje zapreminske težine komponente i

U odnosu na starost komunalnog otpada, razlikuju se tri zapreminske težine i to:

- zapreminska težina neposredno nakon odlaganja

- zapreminska težina odloženog komunalnog otpada (otpad u zatvorenoj ćeliji komunalne deponije - prosečna zapreminska težina dobijena iz odnosa ukupne merene količine tj. težine otpada koja je ugrađena u ćeliju deponije i njene zapremine, utvrđene geodetskim merenjem)
- zapreminska težina odležalog komunalnog otpada (u pitanju je trajno zatvorena deponija pa zbog toga zavisi od proteklog vremena u odnosu na trenutak zatvaranja)

Zapreminska težina komunalnog otpada vrlo je različita zbog različitog sastava, stanja raspadanja tj. starosti otpada, načina odlaganja tj. debljine dnevnog nasipanja, načina zbijanja pri deponovanju, visine-debljine deponije tj. težine nadsloja i kompresije, sadržaja vode ili filtrata i sl. Zato se pri određivanju zapreminske težine, a radi pojednostavljenja, koriste i određene pretpostavke kao što su: poznavanje sastava otpada, procentualno učešće zemljaste prekrivke, vlažnost, način i stepen zbijanja, starost otpada i sl. (Fasset i dr., 1994). Upravo iz tih razloga, u literaturi se susrećemo sa vrednostima koje se kreću u širokim granicama od $\gamma = 3 \text{ kN/m}^3$ pa do preko 15 kN/m^3 (na velikim dubinama). Po pravilu, veće vrednosti su izmerene na deponijama sa većom i češćom upotrebom zemljastih materijala za dnevne prekrivke, kao i na deponijama sa većim sadržajem vode (filtrata). Međutim, vrlo često informacije koje se odnose na količine upotrebljenog zemljastog materijala kao i sadržaj vode, nisu dostupne, pa je to još jedan od razloga za ovako široke granice zapreminske težine otpada.

Sastav komunalnog otpada u velikoj meri utiče na prosečnu zapreminsku težinu. Kao ilustrativan primer za to može se navesti "PET" ambalaža, ili recimo limenka čija je zapreminska težina $\gamma = 2 \text{ kN/m}^3$ kada je prazna, odnosno oko $\gamma = 12 \text{ kN/m}^3$ kada je ispunjena tečnošću, a ispresovana pod velikim pritiscima približna je zapreminskoj težini metala od kojeg je proizvedena.

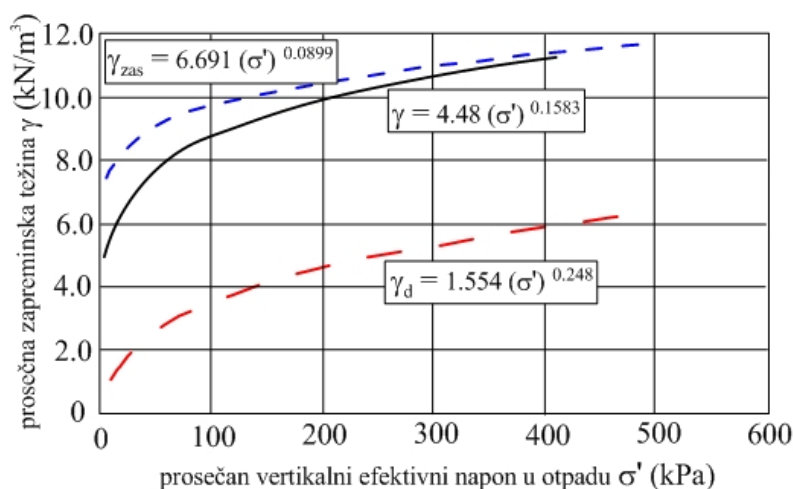
Fassett i dr. (1994), u zavisnosti od zbijenosti, prikazali su prosečne vrednosti zapreminske težine za sveži otpad (Tabela br. 3.4). Kada se radi o slabo zbijenom otpadu (deponije na kojima se praktično ne vrši zbijanje) zapreminska težina se kreće u rasponu od $\gamma = 3 - 9 \text{ kN/m}^3$, dok kod dobro zbijenog otpada (u skladu sa načinom

zbijanja koji se sprovodi u svetu) zapreminska težina je od $\gamma = 8.8 - 10.5 \text{ kN/m}^3$. Autori takođe napominju da na dubinama većim od 10 m, bez obzira na prvobitnu slabu zbijenost, otpad vremenom dostiže vrednost dobro zbijenog. Pri tome, treba imati u vidu činjenicu da je rasipanje rezultata znatno manje kada se primeni propisana tehnologija odlaganja u pogledu zbijanja, uz korišćenje znatnih količina zemljastog materijala koji se koristi za prekrivke. Zavisno od upotrebene mehanizacije, odnos dobro zbijenog otpada prema slabo zbijenom (rastresitom) kreće se između 2-3. Prema Landva & Clark (1990), tipični raspon zapreminske težine starog izmešanog otpada u najrastresitijem i najzbijenijem stanju kreće se od $\gamma = 6.2 - 16.8 \text{ kN/m}^3$. Autori su ove vrednosti dobili na osnovu merenja mase iskopanog materijala i zapremine iskopa.

Tabela 3.4. Zapreminske težine svežeg otpada u zavisnosti od zbijenosti (Fassett i dr., 1994)

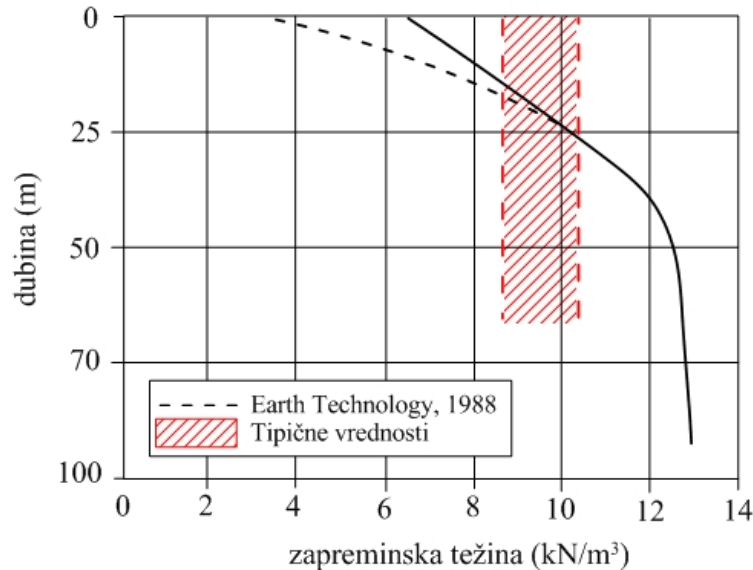
	Slabo zbijen	Srednje zbijen	Dobro zbijen
Uobičajene vrednosti (kN/m^3)	3.0 - 9.0	5.0 - 7.8	8.8 - 10.5
Prosečna vrednost (kN/m^3)	5.3	7.0	9.6
Standardna devijacija (kN/m^3)	2.5	0.5	0.8
Koeficijent varijacije (%)	48	8	8

Vrednosti prikazane u Tabeli 3.3 relativno dobro se slažu i sa vrednostima koje su prikazali Powrie and Beaven (1999), uzimajući u obzir vrednost vertikalnih efektivnih napona u otpadu (Slika 3.7).



Slika 3.7. Zavisnost između zapreminske težine otpada i vertikalnog efektivnog napona (Powrie & Beaven, 1999)

Profil promene zapremine težine sa dubinom, koji su predložili Kavazanjian i dr. (1995), i delimično korigovali (1999), često je citiran u literaturi. Bez obzira na vrednosti koje se kreću u širokim granicama, može se reći da postoji trend povećanja zapremine težine sa dubinom, tj. u funkciji je povećanja efektivnih napona. Autori su predložili interval uobičajenih vrednosti zapremine težine zbijenog otpada od $\gamma = 8.5-10.5 \text{ kN/m}^3$ (Slika 3.8).



Slika 3.8. Zavisnost zapremine težine od dubine (Kavazanjian i dr., 1995)

Ovi podaci, kao i podaci koje su objavili Zekkos i dr., (2006), ukazuju na nelinearan odnos između zapremine težine i dubine deponije. Zekkos je predložio hiperboličku zavisnost izraženu na sledeći način:

$$\gamma = \gamma_i + \frac{z}{a + b \cdot z} \quad (3.12)$$

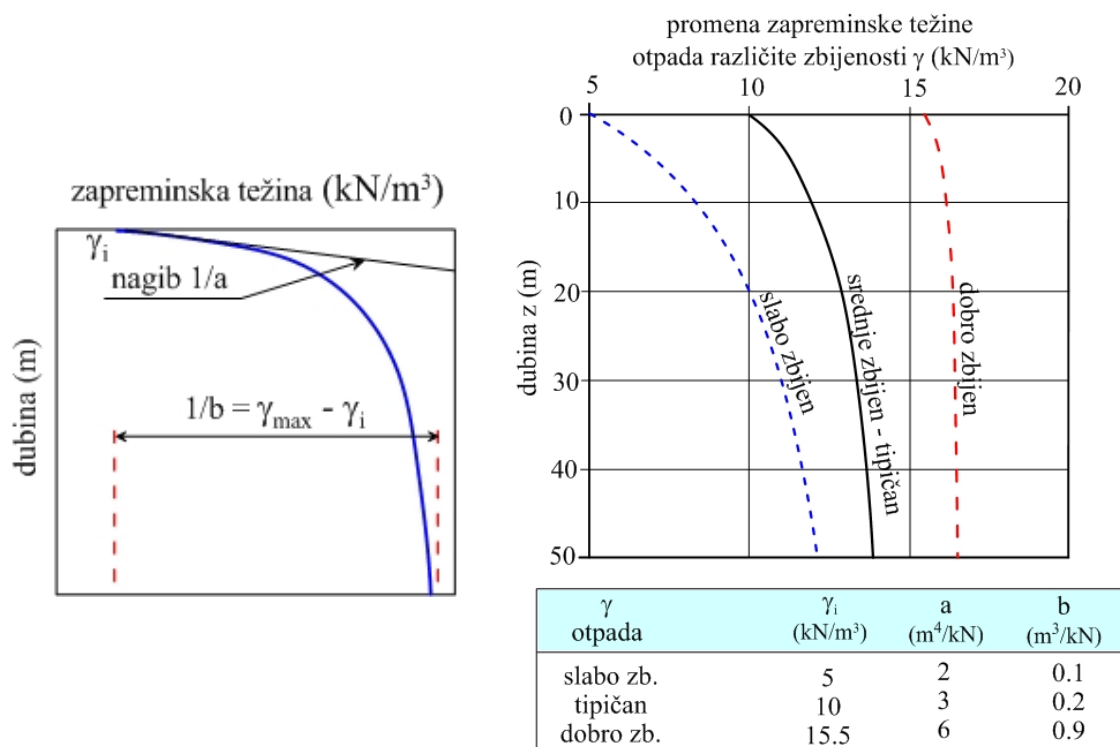
gde je:

γ_i - zapreminska težina blizu površine deponije (početna zapreminska težina) koja se može odrediti iskopom plitkih opitnih jama (kN/m^3)

z - dubina na kojoj se procenjuje zapreminska težina otpada u deponiji – u suštini predstavlja uticaj efektivnih napona na promenu zapremine težine (m)

- a* - parametar u funkciji rasta zapreminske težine od površine terena ka dubini – inverzna vrednost ovog parametra predstavlja početni nagib porasta zapreminske težine blizu površine terena. Vrednosti ovog parametra kreću se od $a = 0 - 10$ (m^4/kN). Ukoliko se zapreminska težina značajno povećava blizu površine terena, treba koristiti manje vrednosti parametra *a*
- b* - parametar u funkciji razlike zapreminskih težina - inverzna vrednost parametra *b* predstavlja asimptotsku vrednost razlike zapreminske težine na velikoj dubini i na površini deponije. Vrednosti ovog parametra kreću se od $b = 0 - 1$ (m^3/kN). Vrednosti parametara *b* za otpad blizu površine imaju veće vrednosti dok za veće dubine manje

Značenje ovih parametara prikazano je na Slici 3.9, kao i krive koje su Zekkos i dr. (2005), preporučili za slabo zbijen, srednje zbijen - tipičan i dobro zbijeni otpad na deponijama.

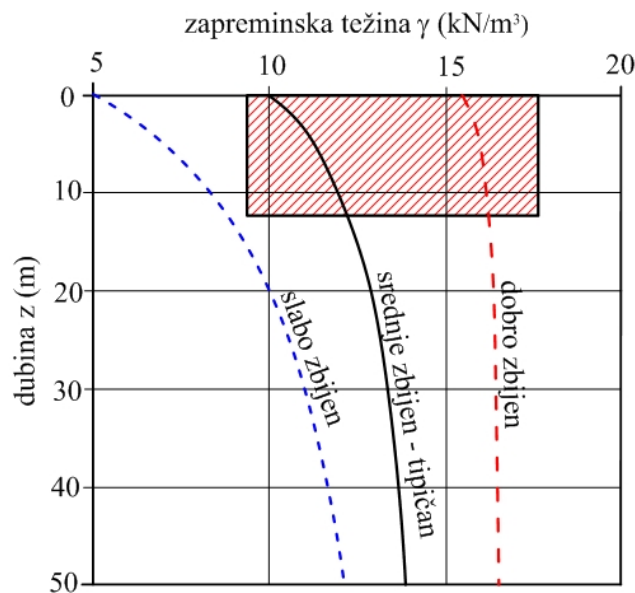


Slika 3.9. Hiperbolička promena zapreminske težine sa dubinom (Zekkos i dr., 2006)

Kada je u pitanju svež komunalni otpad, na zapreminsku težinu utiče i način sakupljanja i transporta. Pa tako komunalni otpad, sabijen u vozilima za transport, ima zapreminsku

težinu od $\gamma = 1.8 - 6.5 \text{ kN/m}^3$, dok isti otpad, nakon zbijanja na deponiji ima zapreminsku težinu i preko $\gamma = 8.5 \text{ kN/m}^3$.

Za potrebe istraživanja u disertaciji, zapreminska težina je unapred definisana. Naime, svi uzorci na kojima su obavljani opiti direktnog smicanja i edometarski opiti, veštački su pripremljeni, sa širokim rasponom zapreminskih težina od $\gamma = 9.8 - 17.6 \text{ kN/m}^3$ kada je u pitanju opit direktnog smicanja, odnosno $\gamma = 9.5 - 11.0 \text{ kN/m}^3$ kada se radi o uzorcima ugrađenim u edometarskim aparatima ($h = 40 \text{ mm}$ i $d = 100 \text{ mm}$, odnosno $h = 80 \text{ mm}$ i $d = 200 \text{ mm}$). Detalji vezani za pripremu uzoraka, objašnjeni su u sledećim poglavljima. U odnosu na dubinu uzetih uzoraka (maksimalne dubine bušotina iz kojih je uzet otpad sa deponije u Novom Sadu je u rasponu od 10 – 12 m, dok je maksimalna dubina bušotina na deponiji Ada Huja iznosila od 6 - 8.5 m), može se videti da se odabrane vrednosti nalaze u ranije spomenutom domenu mogućih vrednosti zapreminske težine otpada, koje najviše odgovaraju srednje zbijenom otpadu (Slika 3.10).



Slika 3.10. Interval zapreminskih težina ispitivanih uzoraka

U Tabeli 3.5, prikazane su prosečne vrednosti zapreminskih težina na osnovu literaturnih podataka, kao i vrednosti koje su korišćene u ovoj disertaciji.

Tabela 3.5. Prosečne zapreminske težine komunalnog otpada

autor	napomena	zapreminska težina (kN/m ³)
Sowers, 1968	u zavisnosti od zbijenosti	4.7 – 9.4
NAVFAC, 1983	slabo zbijen	3.1
	srednje zbijen - tipičan	6.3
	dobro zbijen	9.4
	usitnjen	8.6
NSWMA, 1985	na deponiji tokom odlaganja nakon razgradnje i obavljenog sleganja	6.9 - 7.7 9.9 - 11
Landva & Clark, 1986	odnos otpada i prekrivke od 2 : 1 do 10 : 1	9.0 - 13.2
EMCON Associates, 1989	otpad u odnosu na svakodnevnu prekrivku 6 : 1	7.2
Watts & Charles, 1990 – Velika Britanija	debljina sloja otpada 2 m, zbijan kompaktorom mase 21 t.	6
	debljina sloja otpada 0.6 m, zbijan kompaktorom mase 21 t	8
Manasseto i dr., 1996 – Belgija	uobičajen način zbijanja	5 – 10
Gourc i dr., 2001 – Francuska	gornji slojevi svežeg otpada - nerazgrađen	7
Kavazanjian, 2001 - USA	svež otpad nakon odlaganja raspadnut sa velikim sadržajem tla	6 - 7 14 - 20
Zekkos, i dr., 2006	slabo zbijen	5 - 11.5
	srednje zbijen – tipičan	10 - 13.5
	dobro zbijen	15.5 - 16.0
D. Rakić, 2013	za potrebe istraživanja u ovom radu	
	- opiti direktnog smicamnja	9.8 – 17.6
	- edometarski opiti	9.5 – 11.0

3.5 SPECIFIČNA TEŽINA

Sowers (1973) napominje da je precizno određivanje specifične težine dosta složeno kada je u pitanju komunalni otpad. Landva & Clark (1990) podsećaju da otpad sadrži i pore unutar i između čestica, pa je zato preciznije određivanje specifične težine dosta složeno, i ne mogu se dati tipične vrednosti za komunalni otpad. Gabr & Valero (1994) specifičnu težinu komunalnog otpada, određivali su na frakcijama prosejanim kroz sito No 200 (0.074 mm). S obzirom da su za fino-zrne frakcije, dobili specifičnu težinu od oko 2.4, i da su za raspadnute organske materije, usvojili minimalnu vrednost od 1.0, predložili su vrednost od $G_s = 2.0$ za komunalni otpad. De Haan (1997) je određivao specifičnu težinu celuloze i lignina, i dobio vrednost u intervalu od 1.40 – 1.58. Ovako

niske vrednosti smanjuju specifičnu težinu komunalnog otpada. U literaturi se mogu naći određeni izrazi na osnovu kojih se može odrediti specifična težina u zavisnosti od sadržaja organskih materija. Većina od njih dobijena je istraživanjem treseta.

Skempton & Petley (1970) predložili su dva slična izraza:

$$G_s = \frac{3.78}{\left(1.3 \cdot \frac{OS}{100} + 1.4\right)} \quad (3.13)$$

$$G_s = 1 / (0.358 \cdot OS + 0.357) \quad (3.14)$$

Kaniraj & Joseph (1996) predložili su sledeći izraz:

$$G_s = -1.6281 \cdot OS + 2.6859 \quad (3.15)$$

De Haan (1997) je koristio izraz sličan izrazu 3.14:

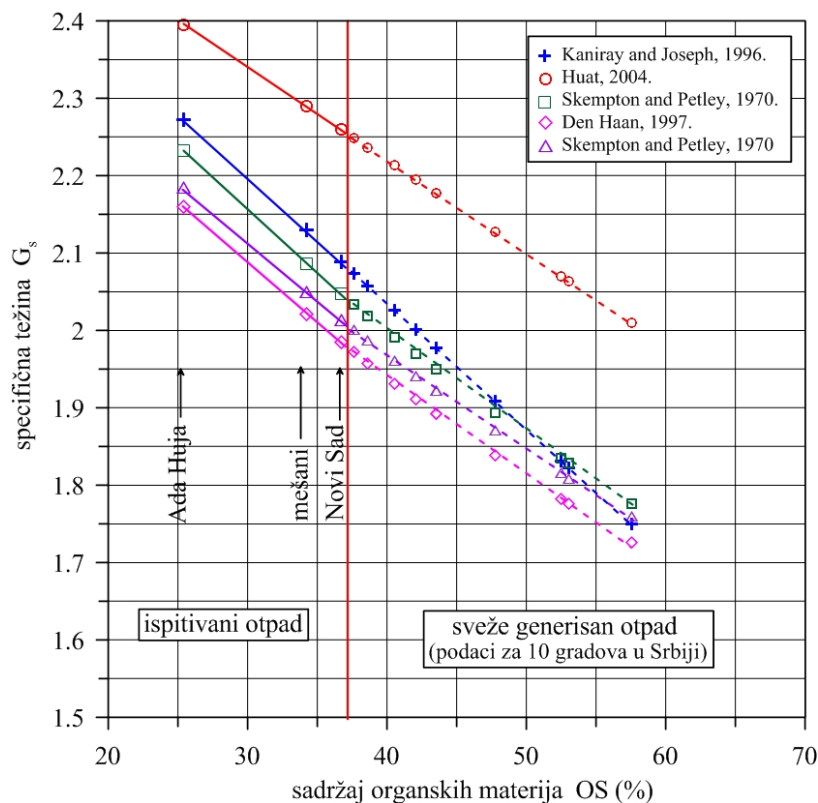
$$G_s = 1 / (0.362 \cdot OS + 0.371) \quad (3.16)$$

Dok je Huat (2004) predložio izraz koji je sličan izrazu 3.15:

$$G_s = -1.2 \cdot OS + 2.7 \quad (3.17)$$

U svim izrazima *OS* predstavlja sadržaj organskih materija.

Na Slici 3.11 prikazane su vrednosti specifične težine, u zavisnosti od sadržaja organskih materija, koje su dobijene na uzorcima otpada uzetog sa deponija na Ada Huji, Novom Sadu i njihovom mešavinom. Na istoj slici prikazane su i vrednosti specifične težine u zavisnosti od sadržaja organskih materija u svežem otpadu (podaci za 10 opština u Srbiji).



Slika 3.11. Specifična težina u zavisnosti od sadržaja organskih materija

Na osnovu prikazanih vrednosti sadržaja organskih materija, za dalje analize usvojene su sledeće vrednosti specifičnih težina

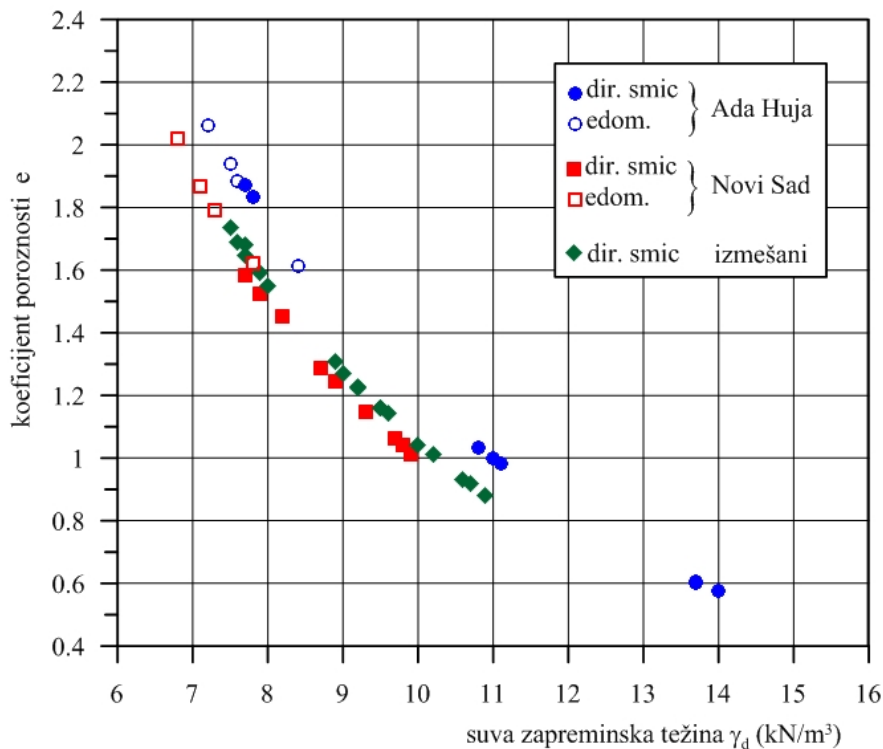
Ada Huja	$G_s = 2.2$
Novi Sad	$G_s = 2.0$
Mešavina otpada	$G_s = 2.05$

3.6. POROZNOST

Otpad ima složenu prirodu građe, jer se između komponenti otpada pa i u okviru samih komponenti otpadnog materijala, nalazi i međuprostor ispunjen vodom (deponijske procedne vode – filtrat, eulat), deponijskim gasom ili, i gasom i vodom, uglavnom slobodnom ali i “zarobljenom”. To znači da poroznost (n) i koeficijent poroznosti (e), zavise od sastava i strukture tj. zbijenosti komunalnog otpada. S obzirom na specifičnu poroznost otpada, Landva & Clark (1990) predlažu da se poroznost otpada razdvoji na poroznost unutar čestica i poroznost između čestica. Time se definisanje faznog sastava, pa i određivanje mehaničkih karakteristika komunalnog otpada dodatno komplikuje, jer

se u deponiji mogu naći čestice koje su unutar zasićene a kontakti između njih suvi i obrnuto.

Za potrebe ovog rada, određivana je samo poroznost između čestica. Naime, određivane su vrednosti koeficijenta poroznosti, a iskorišćeni su uzorci na kojima je obavljeno ispitivanje čvrstoće smicanja (ukupno je pripremljeno 36 uzoraka) kao i ispitivanje deformabilnih karakteristika (izvedeno je 8 edometarskih opita na uzorcima prečnika 10 cm). Treba napomenuti da su svi uzorci veštački pripremljeni i da su, na osnovu lokacije i sastava otpada, grupisani u četiri karakteristične serije sa određenim zapreminskim težinama. Sračunate vrednosti koeficijenta poroznosti, u zavisnosti od promene suve zapremine težine, prikazane su na Slici 3.12. Treba napomenuti da su za određivanje koeficijenta poroznosti e , usvojene specifične težine G_s , prikazane u Poglavlju 3.4.



Slika 3.12. Dijagram zavisnosti suve zapremine težine i koeficijenta poroznosti

Prosečne vrednosti poroznosti i koeficijenta poroznosti, kao i intervali vrednosti određenih pokazatelja faznog sastava koje su se mogle naći u literaturi, prikazane su i u Tabeli 3.6.

Tabela 3.6. Prosečne vrednosti osnovnih pokazatelja faznog sastava

autor	zapreminska težina γ (kN/m ³)	vlažnost w (%)	poroznost n (%)	koeficijent poroznosti e	sračunate vrednosti	
					vlažnost w (%)	specifična težina G_s
Oweis i dr., 1990	6.3-14.1	10-20	40-50	0.67-1.00	11-16.5	1.5-2.4
Zornberg i dr., 1999	10-15	30	49-62	1.02-1.65	25-43	1.8-2.3
Rakić, 2013*	9.5-17.6	19-42	36-67	0.58-2.06	23.3-42.9	2-2.2

* vrednosti su dobijene na osnovu obavljenih ispitivanja

Literaturni podaci iz ove Tabele, iskorišćeni su i za sračunavanje vlažnosti (w) i specifične težine (G_s), a one su poslužile za poređenje sa rezultatima dobijenim na osnovu sprovedenih istraživanja. Može se reći da se dobijene vrednosti dosta dobro slažu, naročito sa podacima koje su objavili Zornberg i dr. (1999), i da su ustvari karakteristične za komunalni otpad, koji pored različitih materijala većih dimenzija, sadrži i određeni procenat sitnozrnih čestica.

3.7 GRANULOMETRIJSKI SASTAV

Određivanje granulometrijskog sastava, neophodno je kod klasifikacije komunalnog otpada, a prema Landva & Clark (1990) čak i delimično urađena granulometrijska analiza, može biti od velike koristi. Pored toga, poznavanje granulometrijskog sastava posebno je važno kod izgradnje postrojenja za razvrstavanje komunalnog otpada u sklopu komunalnih deponija (separacione stanice).

Prilikom granulometrijskih analiza, mogu se izdvojiti sitnozrne čestice koje su najčešće zemljastog porekla – zemljasti otpad (materijal iz prekrivke, razgrađeni materijal i sl.) kao i krupne čestice od različitih materijala u otpadu – ostali otpad. Kada je u pitanju zemljasti otpad, za određivanje granulometrijskog sastava koriste se metode koje su uobičajene u mehanici tla. Međutim, kada je u pitanju ostali otpad, ove uobičajene metode nisu u potpunosti primenljive. U tom slučaju se određuju veličine čestica, odnosno izdvojenih komponenti, najčešće na jedan od sledećih načina:

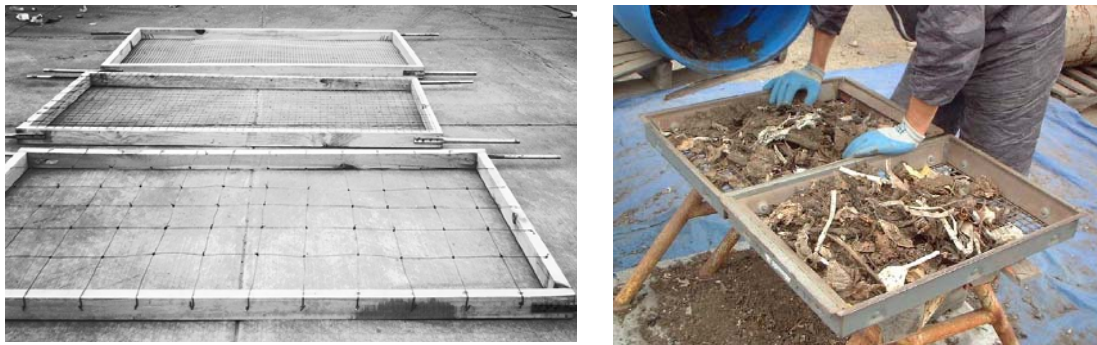
$$d_c = l \quad (3.18)$$

$$d_c = \frac{l+b}{2} \quad (3.19)$$

$$d_c = \frac{l+b+h}{3} \quad (3.20)$$

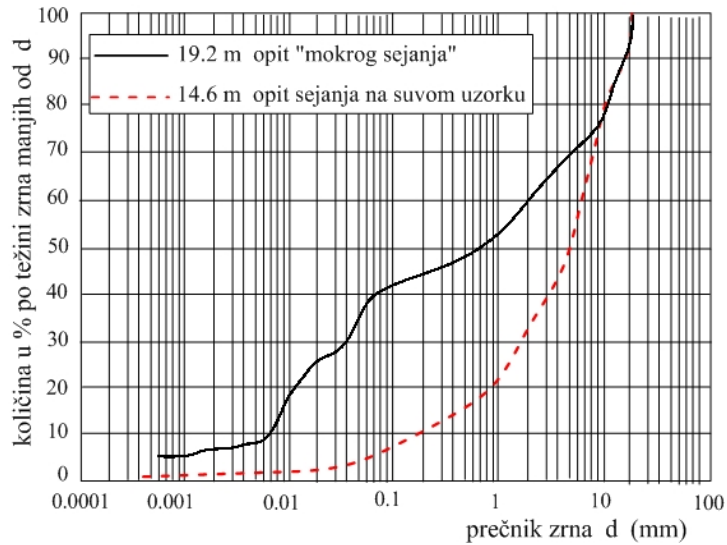
gde je: d_c - veličina čestice - komponente (cm)
 l – dužina čestice (cm)
 b – širina čestice (cm)
 h – visina čestice (cm)

Za čestice čije dimenzije prelaze 40 mm, sejanje se može vršiti i pomoću improvizovanih sita kao što je to prikazano na Slici 3.13 (Solid Waste management, United Nations Environment Programme – UNEP, 2005; Zekkos, 2005)



Slika 3.13. Sita koja se koriste za sejanje krupnijih čestica

Uopšteno se može reći da je granulometrijska kriva, koja se dobija ispitivanjem otpada, slična granulometrijskoj krivoj za tlo. Za razliku od tla, oblik granulometrijske krive komunalnog otpada zavisi od njegove starosti. Za otpad je karakteristično da se količina sitnih čestica povećava sa njegovom starošću. To znači da se na većim dubinama očekuje i veći procenat sitnijih čestica, dok se prisustvo krupnijih čestica javlja na manjim dubinama. Ovo su potvrdili Gabr & Valero (1995), koji su određivali veličinu čestica na uzorcima komunalnog otpada uzetog sa dubina od 14.5 m i 19.2 m. Pliće uzeti uzorak otpada prethodno je osušen u sušnici i nakon toga je izvršeno sejanje. Na uzorku koji je uzet sa veće dubine, izvršen je opit mokrog sejanja. U oba slučaja je na materijalu, koji je prošao kroz sito br. 200 (0.075 mm), izvršen opit hidrometrisanja. Dobijeni rezultati prikazani su na Slici 3.14, na kojoj se može videti da su veličine čestica krupnije na uzorcima sa manjih dubina.



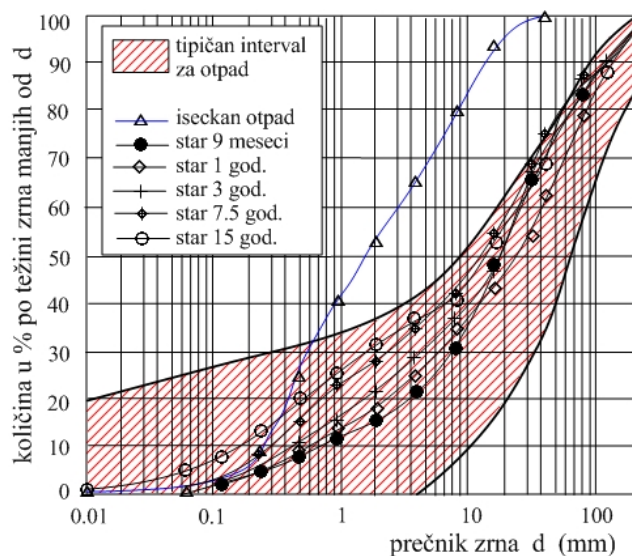
Slika 3.14. Granulometrijski sastav uzoraka otpada sa različitih dubina (Gabr & Valero, 1995)

Osnovni razlog zbog koga su krive granulometrijskog sastava različite, jeste stepen raspadanja, ali razlike su moguće i zbog načina vršenja opita (suvo i mokro sejanje). Naime, primećeno je da analiza sejanja suvog materijala, u poređenju sa mokrim sejanjem, ima tendenciju zanemarivanja količine sitnih čestica. Zato je autor preporučio da se prilikom određivanja granulometrijskog sastava, za krupnije čestice primenjuje metoda „mokrog sejanja“ („pranje otpada“), dok se za određivanje granulometrijskog sastava sitnijih čestice, može koristiti uobičajeni postupak hidrometrisanja.

Slična ispitivanja vršio je i Jessberger (1994), na otpadu različite starosti, i na osnovu dobijenih rezultata predložio je tipični interval granulometrijskog sastava komunalnog otpada (Slika 3.15).

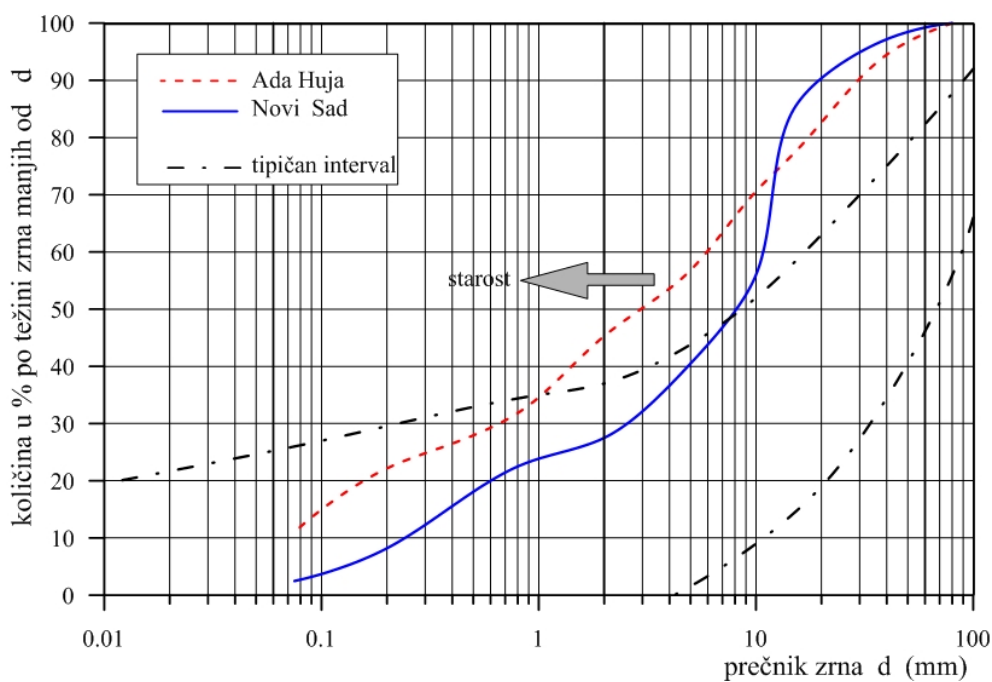
Istraživanja sprovedena u Švedskoj pokazala su da granulometrijski sastav komunalnog otpada, na uređenoj deponiji, sadrži od 55 - 75 % čestica čiji su prečnici manji od 40 mm. U okviru toga oko 15 - 20 % u odnosu na ukupnu zapreminu komunalnog otpada, zauzimaju zemljaste čestice.

Za potrebe ovog rada, granulometrijski sastav komunalnog otpada, određivan je na materijalu koji je donesen sa deponije Ada Huja i deponije u Novom Sadu. Analize su urađene za dva karakteristična slučaja.



Slika 3.15. Granulometrijski sastav otpada različite starosti (Jessberger, 1994)

U prvom slučaju, iskorišćen je kompletan materijal sa odgovarajućih deponija, koji je prethodno izmešan i homogenizovan, tako da nije razmatrana dubina uzetih uzoraka. Napominjemo da je na ovako pripremljenom materijalu izvršeno i razvrstavanje otpada (Poglavlje 4). Četvrtanjem je izvršen izbor uzorka koji je osušen na temperaturi od 60°C , i nakon toga izvršeno je sejanje.

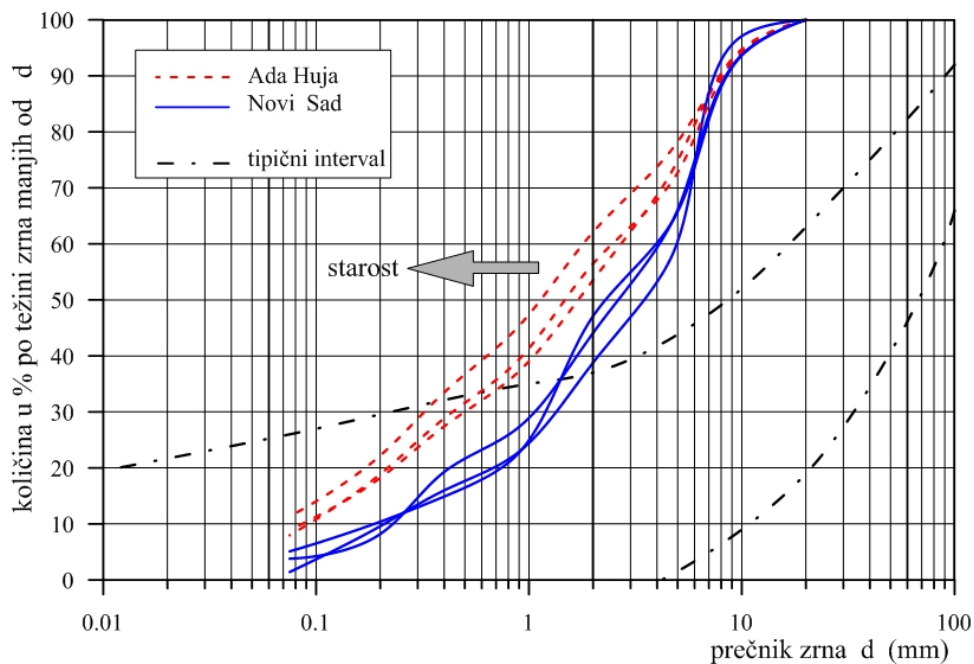


Slika 3.16. Karakteristične krive granulometrijskog sastava otpada različite starosti

Bez obzira što su tokom sortiranja otpada, izdvajane i čestice većih dimenzija, prosejavanje je vršeno serijom sita sa najvećim prečnikom sita od 80 mm odnosno, sa najmanjim prečnikom od 0.075 mm. Opit hidrometrisanja, na materijalu koji je prošao kroz sito 0.075 mm, nije rađen. Rezultati izvršenih analiza prikazani su na Slici 3.16.

Uopšteno se može reći da otpad sa deponije na Ada Huji sadrži veći procenat sitnijih čestica, čime je potvrđena pretpostavka da starost otpada utiče na njegov granulometrijski sastav.

U drugom slučaju, granulometrijske analize su urađene na materijalu na kome su prethodno izvršeni opiti direktnog smicanja. Po završetku opita direktnog smicanja, materijal iz serija A i B je izmešan, osušen i iskorišćen za granulometrijsku analizu. Ovi opiti urađeni su na veštački pripremljenim uzorcima, i to na po tri uzorka za obe deponije. Uzorci su prethodno pripremljeni sa različitim zapreminskim težinama. U ovom slučaju prosejavanje je vršeno u garnituri sa najvećim prečnikom sita od 20 mm (dimenzije čestica su uslovljene dimenzijama aparata). Rezultati ovih ispitivanja su prikazani na Slici 3.17.



Slika 3.17. Granulometrijski sastav otpada na kome su izvedeni opiti direktnog smicanja

3.8 VODOPROPUSTLJIVOST

Vodopropustljivost je značajna osobina komunalnog otpada i, kao kod tla, može da se izrazi preko koeficijenta filtracije k_f . Zavisi od više faktora a najznačajniji su: heterogenost u pogledu sastava, veličina i oblik čestica, veličina i oblik pora, dominantna orijentacija čestica, veličina efektivnih napona, tj. dubina, zbijenost, poroznost, starost otpada i sl. I način odlaganja komunalnog otpada ima značajan uticaj. Ako je tendencija pakovanja čestica komunalnog otpada pretežno horizontalna, onda pojedine komponente otpada, kao što su plastične kese i sl., formiraju nepropusne horizontalne barijere, čime se menja dominantni tok filtrata kroz telo deponije.

Poznavanje koeficijenta filtracije neophodno je kod projektovanja sistema za sakupljanje filtrata ali i kod određivanja stabilnosti kosina deponije, usled mogućeg nekontrolisanog porasta nivoa filtrata. Kada su u pitanju laboratorijske metode određivanja k_f , kod tla se koristi opit sa konstantnim pritiskom za krupnozrna (pesak, šljunak) odnosno, sa opadajućim pritiskom za sitnozrna tla (prašine, gline). Međutim, određivanje koeficijenta filtracije komunalnog otpada, dosta je složeno, jer se zone sa krupnijim komponentama ponašaju slično krupnozrnom tlu, dok se zone sa većim sadržajem sitnih čestica, ponašaju slično sitnozrnom tlu. Problem je u tome što se ove zone u komunalnoj deponiji ne mogu jasno izdvojiti.

U literaturi se nalaze podaci koji dosta variraju, što se može videti u Tabeli 3.7. Međutim, uopšteno se može zaključiti da je prosečna vrednost koeficijenta filtracije, slabo zbijenog komunalnog otpada, oko $k_f = 1 \times 10^{-3}$ cm/s, dok je za zbijeni $k_f = 7 \times 10^{-4}$ cm/s.

Većina istraživača, prilikom određivanja koeficijenta vodopropustljivosti, uvodi pretpostavku o strujanju filtrata kroz zasićenu sredinu. Međutim, ovo je nerealna pretpostavka kada se radi o strujanju kroz telo deponije, jer ono najčešće nije zasićeno. Istraživači kao što su: Landva & Clark (1990); Povrie & Beaven (1999); Jaen i dr. (2006); Reddy i dr. (2008), smatraju da koeficijent filtracije zavisi od dubine tj. od veličine efektivnih napona. Qian i dr. (2001) su vršili dugogodišnja merenja na osnovu

kojih su uspostavili vremensku zavisnost između padavina i zapremine filtrata u sistemu za sakupljanje.

Za potrebe ovog rada nisu vršena laboratorijska ispitivanja za određivanje koeficijenta filtracije, ali se po potrebi mogu iskoristiti podaci iz edometarskih opita, prilikom određivanja parametara stišljivosti. Treba napomenuti da su ovi podaci dobijeni na veštački pripremljenim uzorcima koji ne moraju u potpunosti da reprezentuju strukturu i poroznost komunalnog otpada na deponiji, a time i vrednosti koeficijenta filtracije.

Tabela 3.7. Prikaz publikovanih podataka vezanih za koeficijent filtracije

autor	zapreminska težina γ (kN/m ³)	koeficijent filtracije k_f (cm/sec)	metoda	
Fungaroli et al., 1979	1.1 – 4.1	1×10^{-3} - 2×10^{-2}	Lizimetrijska	Terenski opiti
Oweis and Khera, 1986	6.45	1×10^{-3}	Terenski podaci	
Ettala, 1987	-	5.9×10^{-3} - 2.5×10^{-1}	Opit crpljenja	
Manassero, 1990	8-10	1.5×10^{-3} - 2.6×10^{-2}	Opit crpljenja	
Oweis et al., 1990	6.4	1×10^{-3}	Opit crpljenja	
Oweis et al., 1990	9.4-14.1	1.5×10^{-4}	Opadajući pritisak	
Oweis et al., 1990	6.3-9.4	1.1×10^{-3}	Opit u istražnoj jami	
Landva and Clark., 1990	10.1-14.5	1×10^{-3} - 4×10^{-2}	Opit u istražnoj jami	
Brandl, 1990	11-14 valjanje 13-16 valj+din.zb	7×10^{-4} - 2×10^{-3} 3×10^{-5} - 5×10^{-4}	Opadajući pritisak Opit u istražnoj jami	
Shank, 1993	-	6.7×10^{-5} - 9.8×10^{-4}	Spori opit	
Qian, 1994	-	9.2×10^{-4} - 1.1×10^{-3}	Terenski podaci	
Townsend et al., 1995	-	3×10^{-6} - 4×10^{-6}	Kvašenje	
Blengino et al., 1996	9 - 11	3×10^{-5} - 3×10^{-4}	Duboka bušotina, opadajući pritisak	
Landva et al., 1998	-	1×10^{-2} - 3.9×10^{-2}	Strujna mreža	
Wysocki et al., 2003	-	1.2×10^{-5} - 6.3×10^{-4}	Opit crpljenja	
Korfiatis et al., 1984	8.6	8×10^{-3} - 1.3×10^{-2}	Konstantni pritisak	Laboratorijski opiti
Schroder et al., 1984	-	2×10^{-4}	Zbirni podaci	
Noble and Arnold, 1991	-	8.4×10^{-5} - 6.6×10^{-4}	Konstantni pritisak	
Bleiker et al., 1993	-	1×10^{-8} - 3×10^{-7}	Opadajući pritisak	
Brandl, 1994	9-12	1×10^{-4} - 2×10^{-3}	Konstantni pritisak	
Brandl, 1994	9-12	3×10^{-3} - 5×10^{-2}	Konstantni pritisak	
Brandl, 1994	13-17 jako zbijen	3×10^{-6} - 2×10^{-4}	Konstantni pritisak	
Schroder et al., 1994	-	1×10^{-3}	Zbirni podaci	
Chen and Chynoweth, 1995	-	4.7×10^{-5} - 9.6×10^{-2}	Konstantni pritisak	
Beaven and Powrie, 1995	5-13	1×10^{-5} - 1×10^{-4}	Konstantni pritisak	
Gabr and Valero, 1995	-	1×10^{-5} - 1×10^{-3}	Konstantni pritisak	
Landva et al., 1998	-	2×10^{-6} - 2×10^{-3} vert. 4×10^{-5} - 1×10^{-3} hor.	Konstantni pritisak	
Powrie and Beaven, 1999	-	3.7×10^{-6} - 1.5×10^{-2}	Konstantni pritisak	
Jang et al., 2002	-	2.91×10^{-4} - 2.95×10^{-3}	Konstantni pritisak	

3.9 ZAKLJUČAK

U okviru ovog poglavlja, prikazani su rezultati vezani za određivanje osnovnih pokazatelja fizičkog stanja (vlažnost, sadržaj organskih materija, zapreminska težina, specifična težina, granulometrijski sastav, vodopropustljivost), koji su dobijeni korišćenjem standardne geomehničke laboratorijske opreme. Pored toga, date su i određene preporuke koje su zasnovane pre svega na literaturnim saznanjima, ali i saznanjima stečenim tokom istraživanja vršenim za potrebe ovog rada.

Kada je u pitanju vlažnost komunalnog otpada, dobijene su vrednosti od $w = 19 - 68$ %. Ovako široki interval ukazuje na očiglednu promenljivost vlažnosti unutar deponije. Generalno se može reći da je vlažnost sa deponije na Ada Huji nešto ujednačenija, ukoliko bi se zanemarila jedna vrednost koja je ukazala na postojanje lokalne zone sa povećanom vlažnošću. Bez obzira na ovako širok interval, poređenjem sa literaturnim podacima može se zaključiti da su dobijene vrednosti uobičajene (u literaturi $w = 10 - 150$ %, Coumoulos i dr. 1995).

Žarenjem na temperaturi od 440°C , dobijen je sadržaj organskih materija u intervalu od $13.2 - 14.6$ %. Ove vrednosti su karakteristične za otpad koji je u poodmaklom stadijumu razgradnje. Kako bi se odredio sadržaj organskih materija koji odgovara otpadu u trenutku odlaganja, iskorišćen je postupak koji je predložio Zekkos (2005). Na osnovu toga određen je sadržaj organskih materija u intervalu od $25.4 - 36.7$ %, što je ukazalo na tendenciju smanjenja sadržaja organskih materija sa starošću otpada.

Sve zapreminske težine komunalnog otpada, određene su na veštački pripremljenim uzorcima na kojima su izvršeni edometarski opiti i opiti direktnog smicanja. Dobijene vrednosti su se kretale od $\gamma = 9.5 - 17.6$ kN/m³. Poređenjem sa literaturnim podacima (Zekkos, 2005), može se reći da odabrane vrednosti zapreminske težine, najviše odgovaraju srednje zbijenom otpadu.

Specifična težina komunalnog otpada, određena je na osnovu sadržaja organskih materija. Dobijene su vrednosti u intervalu od $G_s = 1.98 - 2.39$, s tim da su usvojene

prosečne vrednosti u zavisnosti od lokacije (Ada Huja, Novi Sad i izmešani otpad) tj., $G_s = 2.0 - 2.2$. Specifična težina određivana je i za sveže generisani otpad, gde je bio izražen trend njenog opadanja do minimalne vrednosti $G_s = 1.73$.

Poroznost i koeficijent poroznosti, sračunati su na osnovu podataka o suvim zapreminskim težinama uzoraka na kojima je obavljeno ispitivanje čvrstoće smicanja i deformabilnih karakteristika (ukupno 44 uzoraka), kao i prosečnih vrednosti specifičnih težina. S obzirom na širok interval suvih zapreminskih težina, koeficijent poroznosti kretao se od $e = 0.576 - 2.060$.

Granulometrijski sastav komunalnog otpada, određivan je na izabranom materijalu sa obe deponije (Ada Huja i Novi Sad) i to sa najvećim prečnikom sita od 80 mm, odnosno 20 mm tj. materijalu koji je prethodno usitnjen i iskorišćen za formiranje uzoraka na kojima su obavljani edometarski opiti i opiti direktnog smicanja. Ove analize su pokazale da starost opada ima uticaj na granulometrijski sastav, s obzirom da stariji otpad sadrži veći procenat sitnijih frakcija.

Laboratorijska ispitivanja za određivanje koeficijenta filtracije nisu rađena, ali su prikazani literaturni podaci. Na osnovu toga je zaključeno da vrednosti koeficijenta filtracije dosta variraju, u zavisnosti od zbijenosti otpada. Može se reći da je za slabo zbijeni komunalni otpad koeficijent filtracije oko $k_f = 1 \times 10^{-3}$ cm/s, dok je za zbijeni, $k_f = 7 \times 10^{-4}$ cm/s.

POGLAVLJE 4

GEOTEHNIČKA KLASIFIKACIJA KOMUNALNOG OTPADA

Analizom rezultata laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja izvedenih na komunalnom otpadu, ne može se dobiti neka opšta, zajednička osnova za njihovo poređenje. Razlog za to je izrazita heterogenost otpada kao i primena različitih metoda ispitivanja. Otuda je neophodno pronaći odgovarajući sistem geotehničke klasifikacije, koji će obuhvatiti ključne faktore koji utiču na mehaničko ponašanje i fizičke osobine komunalnog otpada. Cilj je da se sistemom klasifikacije obuhvati što više komponenti u otpadu i, na osnovu toga, izaberu pokazatelji koje treba opisati i proveriti u praksi. Osnovni okviri za klasifikaciju i opis materijala otpada, po pravilu, se rade na bazi postojećih (najrazličitijih) klasifikacija koje se koriste za tlo. Međutim, u obzir se uzimaju i neke posebne osobine pojedinačnih komponenti otpada, koje su različite od ponašanja tla. Klasifikacija koja je korišćena u ovom radu, bazirana je na klasifikacionim sistemima dobijenim iz literature, kao i na rezultatima ispitivanja osnovnih fizičkih karakteristika komunalnog otpada, koji su urađeni u laboratoriji za mehaniku tla Rudarsko-geološkog fakulteta u Beogradu.

4.1. SASTAV KOMUNALNOG OTPADA

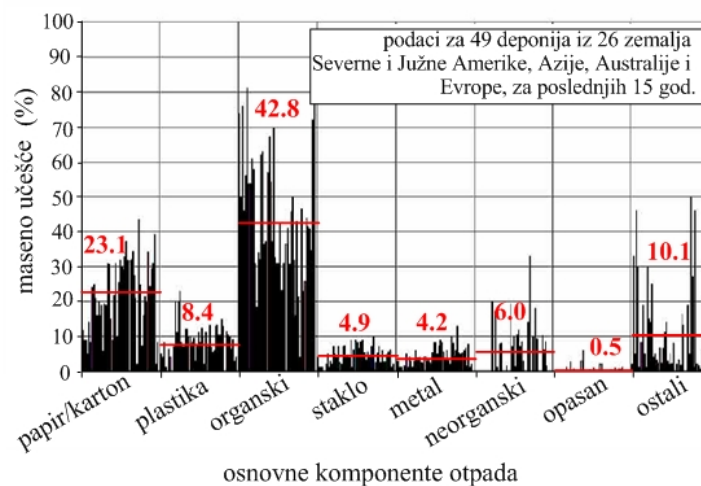
Termin „sastav“ koristi se da opiše pojedine komponente koje čine otpad, ali i njihov raspored i obično se izražava u vidu masenog odnosa. Poznavanje sastava komunalnog otpada važno je kod izbora tehnologije i opreme za transport, potrebne opreme za rukovanje na deponiji (prijem, separaciju, usitnjavanje, sagorevanje), plana i programa upravljanja, ali i kod definisanja geomehaničkih parametara. Saznanja o izvorima i tipovima otpada, zajedno sa podacima o sastavu i brzini nastajanja, predstavljaju osnovu za projektovanje i rad funkcionalnih elemenata koji su uključeni u upravljanje komunalnim otpadom.

Zbog heterogenosti prirode komunalnog otpada, određivanje sastava nije jednostavan zadatak, a striktnu statističku proceduru je teško ili nemoguće primeniti. Značaj poznavanja sastava komunalnog otpada doveo je do toga da se, u nekim zemljama, pripreme posebni nacionalni standardi, a često se koriste i standardi posebnih regiona (u SAD se od 1992. godine koristi metoda Američkog udruženja za ispitivanje materijala - ASTM). Jedna od metoda za određivanje sastava otpada (usvojena je od strane EPA - Environmental Protection Agency), zasniva se na praćenju materijalnog toka. Na ovaj način sastav otpada i njegova količina se procenjuju na osnovu podataka o proizvodnji materijala i produkata, s tim da su uključene korekcije za izvoz, uvoz, reciklažu i životni vek. Nedostatak ove metode je što ostaci produkata sa drugim materijalima nisu uzeti u obzir (na primer, zaostala tečnost u tetrapaku, limenci, PET ambalaži i td.). Često se sprovode i ankete među stanovništvom ispitivanog područja. Iako je ova metoda ekonomski najpovoljnija, neki istraživači je smatraju nedovoljno preciznom.

U okviru Evropske unije, pokrenut je projekat razvoja odgovarajuće metodologije ispitivanja komunalnog čvrstog otpada (Tools for Solid Waste Analysis, SWA-Tool) da bi se popravio kvalitet i omogućilo poređenje podataka o komunalnom otpadu. Prema ovom projektu, postoje tri potencijalna nivoa na kojima može biti uzet uzorak za ispitivanje otpada: kućna kanta za otpad, kontejner za otpad i kamion za odnošenje otpada.

Međutim, sastav grupe organskih i razgradljivih neorganskih pa i zemljastih materijala, na ovaj način ne mogu se eksplicitno definisati za duže vremenske periode. Zbog toga, sa geotehničkog aspekta, terenske procedure za određivanje sastava otpada daju najprihvatljivije podatke, jer su bazirane na uobičajenim i široko rasprostranjenim tehnikama uzorkovanja. Procedura na terenu (deponiji), za identifikaciju komponenata komunalnog otpada, uključuje analizu reprezentativnog uzorka uzetog direktno sa izvora. U tom slučaju je za dobijanje valjanih rezultata, potrebno obezbediti dovoljan broj slučajno odabranih uzoraka. Smatra se da se pažljivim izborom lokacija za uzorkovanje, čak i sa malim brojem uzoraka, može pouzdano odrediti sastav otpada.

U pokušaju da se uopšteno prikaže sastav otpada Langer (2005) je prikupio podatke o sastavu otpada u različitim delovima sveta. Obradeni su podaci sa 49 deponija iz 26 zemalja Severne i Južne Amerike, Azije, Australije i Evrope (EPA, 1995; Coumoulos i dr. 1995; Gabr & Valero, 1995; Gasparini i dr. 1995; Bouazza i dr. 1996; Manassero i dr. 1997; Oweis & Khera, 1998; MoE, 2000; Hull i dr. 2001; CSR, 2002; NSO, 2002; UNSW, 2003; INGUT, 2003; MVRHH, 2003).

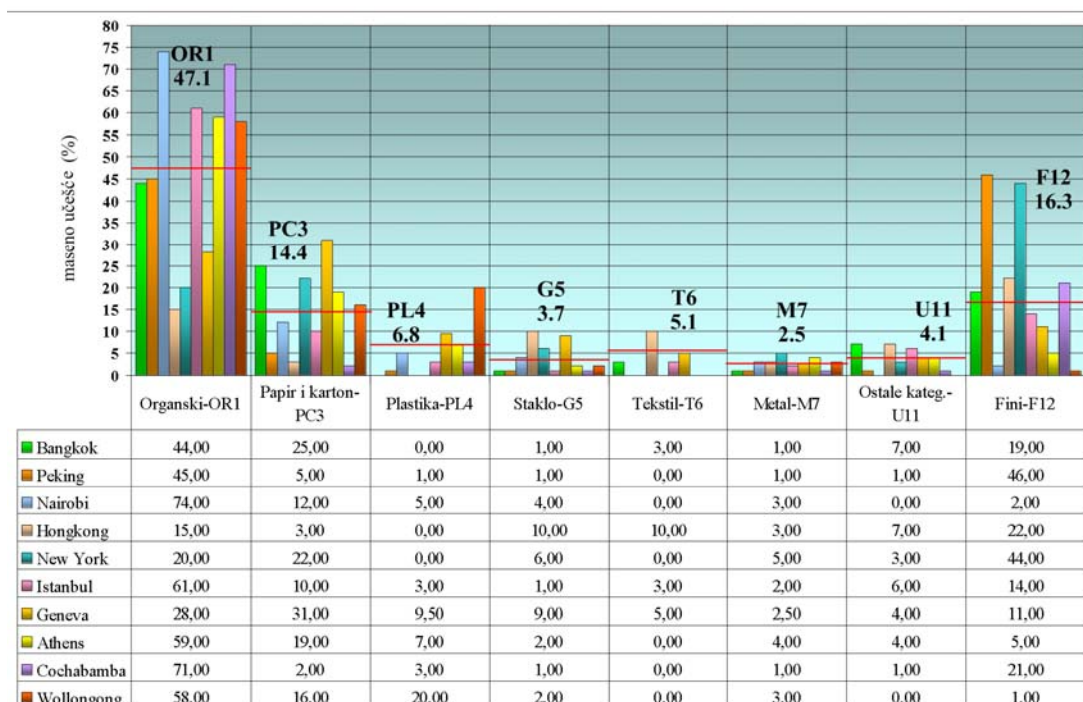


Slika 4.1 Opšti pregled sastava otpada u svetu (Langer, 2005)

Kako sastav otpada zavisi i od stepena industrijskog razvoja, životnog standarda, načina života, specijalnog okruženja, potrošnje i drugih parametara, tj. u direktnoj je korelaciji sa nacionalnim ekonomijama, vršena su određena objedinjavanja pojedinih grupa. Iz tih

razloga se količine nastalog otpada razlikuju među državama, ali i u okviru jedne države (regiona), pa samim tim su realna i odstupanja u sastavu komunalnog otpada. Rezultati su prikazani na Slici 4.1 sa koje se vide izrazita odstupanja u okviru izdvojenih grupa materijala, ali se mogu zapaziti i trendovi.

Westlake (1995) i Manassero i dr. (1997), su prikazivali uporedne podatke sastava komunalnog otpada za različite gradove sveta (u Aziji, Africi, Americi, Evropi i Australiji, Slika 4.2.).



Slika 4.2 Pregled sastava otpada za pojedine gradove u svetu

Zbog činjenice da se komponente otpada ne mogu lako identifikovati, kao i zbog razlike u izboru materijala za određene grupe koje su objavljivali različiti autori, zemlje članice EU, na osnovu iskustva, razradile su i predložile zvaničnu metodu pod nazivom: S.W.A. – Tool, Development of a Methodological Tool to Enhance the Precision & Comparability of Solid Waste Analysis Data (European Commission, 2004).

Osnovni cilj ove metodologije, jeste povećanje preciznosti i uporedljivosti podataka koji se odnose na karakteristike, odnosno količine komunalnog otpada na nivou Evrope. Predloženo je da se nakon uzorkovanja obavi sortiranje i razvrstavanje komunalnog

otpada, prema posebno pripremljenom katalogu. Katalog sadrži 12 obaveznih kategorija – grupa, i 35 podkategorija (sekundarnih kategorija).

Tabela 4.1 Katalog sortiranja komunalnog otpada (European Commission, 2004).

osnovne kategorije otpada	kod/šifra	sekundarne kategorije otpada	kod/šifra	beleške	tipični primeri
Organski	OR1	Biorazgradivi kuhinjski otpad	OR1 01		
		Biorazgradivi baštenski otpad	OR1 02		
		Ostali biorazgradivi	OR1 03		
Drvo	W2	Netretirano	W2 01		
		Tretirano	W2 02		
Papir i karton	PC3	Papir i karton visokog sjaja, plakate	PC3 01		
		Ambalažni papir i karton	PC3 01		
		Novinski papir	PC3 01		
		Ostali papir i karton	PC3 01		
Plastika	PL4	Tanka ambalažna / kese	PL4 01		
		Tanka neambalažna	PL4 02		
		Tvrde plastične boce i tegle	PL4 03		
		Ostala tvrda ambalažna plastika	PL4 04		
		Ostala tvrda neambalažna plastika	PL4 05		
Staklo	G5	Staklene bezbojne ambalažne posude	G5 01		
		Staklene obojene ambalažne posude	G5 02		
		Ostale staklene posude	G5 03		
		Ostala neambalažna stakla	G5 04		
Tekstil	T6	Odeća	T6 01		
		Neodevni predmeti	T6 02		
Metali	M7	Metalna obojena ambalaža	M7 01		
		Metalna neobojena ambalaža	M7 02		
		Raznovrsni obojeni metali	M7 03		
		Raznovrsni neobojeni metali	M7 04		
Opasan otpad iz domaćinstva	H8	Baterije akumulatori	H8 01		
		Ostali opasan otpad	H8 02		
Kompleksni proizvodi	C9	Kompozitni/kompleksna ambalaža	C9 01		
		Kompozit/kompleksni neambalažni	C9 01		
		Mešoviti elektronski otpad	C9 03		
Inertni otpad	IN10	Tlo i stene	IN10 01		
		Ostali inertni	IN10 02		
Ostale kategorije	O11	Pelene	O11 01		
		Medicinski biološki	O11 02		
		Različite kategorije	O11 03		
Fine čestice	F12	Frakcije sitnije od 10 mm	F12 01		

Skraćena verzija kataloga, sa izdvojenim primarnim i sekundarnim kategorijama otpada, prikazana je u Tabeli 4.1. (u tabeli nisu prikazane beleške i tipični primeri za izdvojene kategorije). Ovaj katalog u suštini predstavlja vodič za klasifikaciju komunalnog otpada, jer se u njemu daju karakteristične beleške-opisi kao i tipični primeri širokog spektra predmeta u okviru izdvojenih osnovnih i sekundarnih kategorija. Kako su za pojedine kategorije prikazani i kodovi-oznake, može se reći da se radi o klasifikaciji u kojoj su eksplicitno definisane izdvojene grupe. Preporučeno je da se broj sortiranja otpada obavlja u skladu sa lokalnim okolnostima, a za reprezentativni uzorak, usvojeno je 600 kg otpada. Opšte prihvatanje ove metodologije, omogućilo bi poređenje rezultata, objedinjavanjem izdvojenih grupa u 12 obaveznih kategorija.

4.2. GEOTEHNIČKA KLASIFIKACIJA KOMUNALNOG OTPADA

4.2.1. Pregled literaturnih podataka

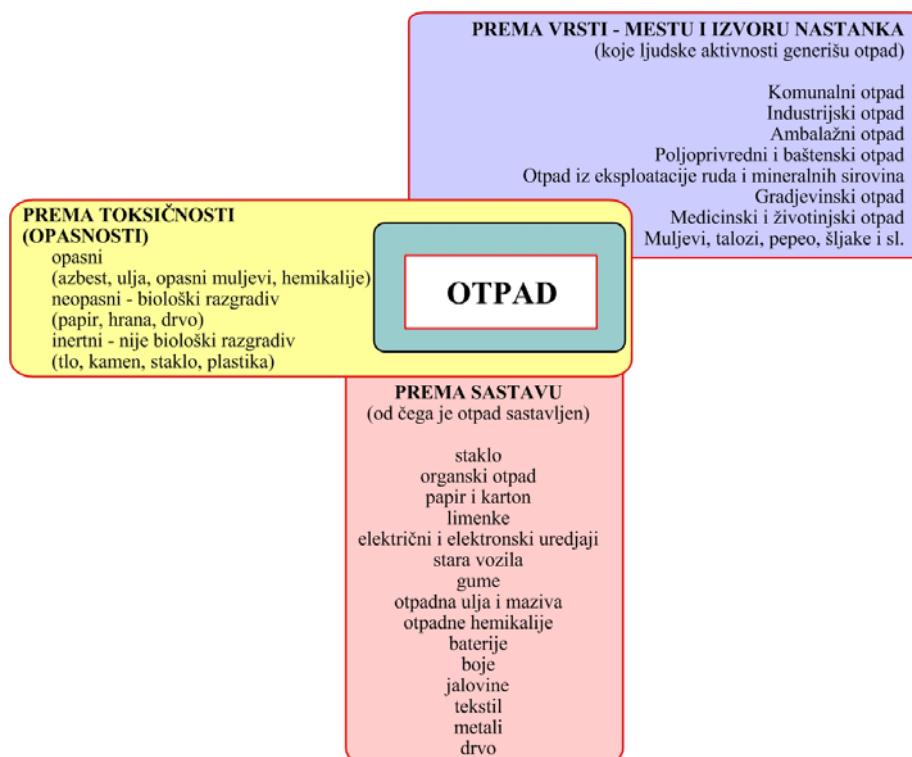
U literaturi se može naći samo poneki pokušaj geotehničke klasifikacije komunalnog otpada. Najčešći literaturni podaci koji se odnose na geotehnička istraživanja komunalnog otpada, vezani su za stabilnost kosina i sleganje deponija, a samim tim i sa ispitivanjem čvrstoće smicanja i stišljivosti. Podaci koji se odnose na sastav otpada, njegovu prethodnu obradu, efekte procesa razgradnje na geotehničke karakteristike, vodopropustljivost otpada i sl., po pravilu se daju kao posredne informacije koje se mogu iskoristiti za klasifikaciju. Za razliku od tla, za koje postoji nekoliko opšte prihvaćenih geotehničkih klasifikacija, za izrazito heterogeni komunalni otpad, uspostavljanje opšteg sistema geotehničke klasifikacije je dosta složeno i još uvek je u fazi formiranja. Kao osnovne razloge za to Manassero i dr. (1997) navode sledeće:

- poteškoće vezane za dobijanje reprezentativnih uzoraka otpada iz komunalnih deponija (ne postoji opšte prihvaćen postupak uzorkovanja)
- izrazita promena sa vremenom kako fizičkih tako i mehaničkih osobina
- izrazita heterogenost komunalnog otpada i njegov sastav koji se razlikuje od lokacije do lokacije u okviru jednog regiona, a još drastičnije razlike javljaju se na različitim geografskim lokacijama

- obrazovanje i obučenosť osoblja zaposlenih na deponijama nije na zadovoljavajućem nivou (po pravilu nisu osposobljeni da vrše merenja i tumače, tj. razumeju dobijene rezultate).

Otpad se najčešće klasifikuje po:

- vrsti tj. po mestu i izvoru nastanka,
- stepenu toksičnosti ili biološki aktivnom sadržaju, kao i
- prema sastavu (Slika 4.3).



Slika 4.3 Opšta klasifikacija otpada

Najveći broj postojećih sistema klasifikacije, baziran je na sastavu tj. grupama materijala (npr. hartija, plastika, metal, staklo, itd.) ili na udelu zemljastog i nezemljastog otpada (Siegel i dr. 1990; Manassero i dr. 1997; Thomas i dr. 1999).

Ovakvi sistemi klasifikacije ne zadovoljavaju opšte potrebe geotehničke klasifikacije otpada. U Tabeli 4.2, prikazani su sistemi klasifikacije pojedinih autora, koji su im poslužili za definisanje određenih geotehničkih parametara.

Tabela 4.2. Pregled postojećih sistema klasifikacije otpada (Langer, 2005; Rakić, 2013)

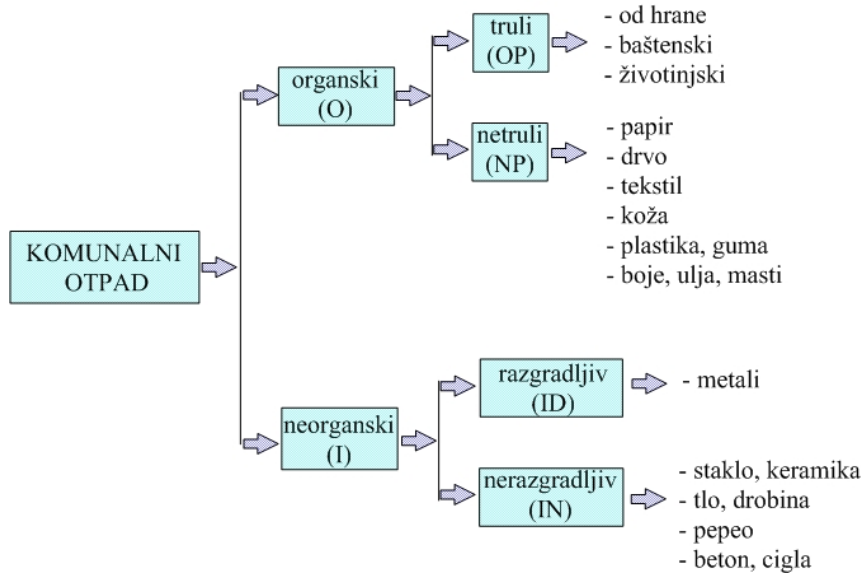
Autor	Osnove za razdvajanje-razlikovanje	Osobine koje se koriste za razdvajanje-razlikovanje
Sowers, 1972	Maseni sadržaj	Mokar, vlažan, suv
Turczynski, 1988	Tip otpada	Zbijenost, parametri čvrstoće smicanja, vodopropustljivost, plastičnost
Siegel et al., 1990	Grupe materijala	Maseni deo u sastavu
Landva and Clark, 1990	Sadržaj organskih i neorganskih materija	Razgradljivost (brza, spora, neraz.) Oblik (šuplji, pločast, izdužen, glomazan)
Barlaz, 1990	Vizuelni pregled	Hemijski sastav i mogućnost stvaranja metana
Westake, 1994	Poređenjem karakteristika otpada u različitim zemljama	Maseni odnos i gustina
Grisolia et al., 1995	Razgradljivost, inertnost i deformabilnost izdvojenih grupa	Čvrstoća, deformabilnost
Kölsch, 1996	Grupe materijala	Veličina, dimenzija
Manassero et al., 1997	Sličnost tlu, ostalo	Indeksne karakteristike
Thomas et al., 1999	Sličnost tlu, različito od tla	Grupe materijala
Kavazanjian, 2003	Promena boje otpada i zbijenosti	Stepen razgradnje i struktura
Zeccos, 2005	Fazni sastav klasifikacija	Sastav, starost, temperatura, vlažnost, veličina i sadržaj zemljastih čestica

Sowers (1973) je analizirao maseni sadržaj tipičnih komponenti komunalnog otpada (ukupno 11, kao što su hrana, papir, plastika, staklo) u telu deponije i njihov uticaj na nosivost.

Landva i Clark (1990) su predložili sistem klasifikacije po biorazgradljivosti otpada u kome se pravi razlika između organskih i neorganskih komponentata. Organske komponente (O) podelili su na komponente koje trule-kvarljive (OP) i na komponente koje ne trule-nekvarljive (NP), dok su kod neorganskih posebno izdvajali razgradljive (korozivne) (ID) i nerazgradljive (IN) (Slika 4.4). Pored toga, napomenuto je da sastojci otpada NP, ID i IN sadrže i krupne predmete-komade, koji obrazuju pore koje utiču na karakteristike otpada u samoj deponiji. Ovaj sistem klasifikacije daje nešto detaljnije informacije o razgradnji, pa samim tim i o potencijalnoj stišljivosti komponentata. Međutim, on ne uzima u obzir oblik komponentata (čestica, komada) pa ni osobine materijala. Autori takođe napominju da, pored vizuelnog pregleda otpada, za ovu klasifikaciju treba poznavati i vlažnost, specifičnu težinu, sadržaj organskih materija i granulometrijski sastav.

Grisolia i dr. (1995) su izdvojili tri različite grupe komponentata otpada: razgradljive, inertne i deformabilne. Na osnovu toga, otpad su klasifikovali prema procentualnom sadržaju svake grupe i grafički prikazivali na trouglom dijagramu. Prednost ovog

sistema je u tome što daje informacije o stišljivosti i razgradljivosti komponenata, pa je na taj način omogućeno poređenje različitih otpada. I u ovoj klasifikaciji se ne uzima u obzir oblik čestica, a takođe, neka komponenta može ponekad da pripada i različitim grupama (npr. ostaci hrane su biorazgradljivi ali i veoma deformabilni).



Slika 4.4 Sistem klasifikacije po biorazgradljivosti otpada (Landva i Clark, 1990)

U okviru sistema klasifikacije koji je predložio Kölsch (1996), analiziraju se izdvojene vrste materijala u okviru pojedinih grupa, veličine i dimenzije komponenata. Ovaj sistem omogućuje detaljnija ispitivanja osobina komponenata otpada. Međutim, ovako detaljan sistem nije pogodan za redovnu praktičnu primenu. Nedostatak sistema je u velikoj količini potrebnih podataka, kao i u odsustvu informacija o potencijalu razgrađivanja.

Kavazanjian (2003) je prikazao sistem klasifikacije, u okviru dokumenta koji se odnosi na „Standardne radne postupke“ (*Standard Operating Procedures*), a koji je razradila firma GeoSyntec za stare deponije. U tom prikazu daje se definicija razgrađivanja otpada u zavisnosti od promene boje. Pa tako postoje: bez razgradnje = nema promene boje otpada; mala razgradnja = promena boje otpada; srednja razgradnja = izražena promena boje; visoka razgradnja = siva do crna boja. Klasifikacija se takođe vrši i na osnovu zbijenosti: mala = otpad lako ispada iz sržne cevi bušaćeg pribora; srednja =

otpad ispada iz pribora pod udarom; velika = otpad ispada iz pribora kad se udari više puta. Na osnovu toga, autor je izdvojio pet različitih vrsta strukture i to:

- slojevita (čestice/komponente otpada su orijentisane u predisponiranom pravcu - npr. horizontalnom)
- uklopljena (čestice otpada su uklopljene u zemljastu frakciju)
- vlaknasta (čestice otpada su upletene)
- isprepletana (čestice otpada se međusobno prepliću - „kompaktna“, „zrnasta“),
- neodređena

Određene preporuke vezane za klasifikaciju komunalnog otpada predložio je i Zekkos (2005). U pitanju je klasifikacija koja se izvodi u tri faze, a autor kao njenu osnovnu prednost navodi relativno kratko vreme koje je potrebno za njeno formiranje. U zavisnosti od raspoloživog budžeta, ali i cilja klasifikacije, drugačiji akcenat se može staviti na svaku od faza. Predložene faze klasifikacije su:

- **Geotehnička klasifikacija komunalnog otpada na terenu:** Istražnim radovima na samim deponijama, prikupljaju se kvalitativni podaci uglavnom vezani za opis otpadnog materijala. To podrazumeva izvođenje istražnih bušotina, raskopa i jama, opšte uzorkovanje materijala iz otpada i po mogućnosti direktno merenje osnovnih fizičkih pokazatelja. Pored toga, prikupljaju se i podaci koji su značajni za rad same deponije. Podaci koji se prikupljaju u ovoj fazi odnose se na:

- *sastav otpada:* podrazumeva vizuelni opis materijala na karakterističnim dubinama, kao na primer: sadržaj i prisustvo zemljaste materije, debljine prekrivki tj. međuslojeva i materijala koji je za to korišćen. Zatim se prikazuje sadržaj pojedinih komponenti otpada (npr. hartije, plastike, drva, kućnog otpada, tekstila, gume, metala, eventualno i građevinskog šuta). Ovi podaci daju opštu sliku o otpadu koji se odlaže na deponiju, a korisne informacije mogu se dobiti i od radnika na deponiji.
- *temperatura:* ovaj podatak treba pribeležiti u trenutku vađenja materijala iz bušotine (sržne cevi, spiralne burgije, iskopom materijala iz jame i sl).
- *starost:* ona se teško utvrđuje direktnim osmatranjem materijala, ali korisni podaci su: bačeni časopisi, novine i drugi dokumenti na kojima po nekad stoji

datum. Na taj način može se uspostaviti odnos između dubine i starosti otpada, duž profila, na mestu bušotine (Slika 4.5).



Slika 4.5 Određivanje starosti otpada na osnovu datuma iz izvađenih novina (Oettle i dr. 2008)

- *uzimanje uzoraka otpada*: u zapisniku bušotine uvek se obeležava i mesto-dubina uzimanja uzoraka. Ako uslovi dozvoljavaju da se na uzorcima izvedu jednostavni terenski opiti (džepni penetrometar, krilna sonda), onda i te podatke treba uneti u zapisnik.
- *vlažnost*: tačna vrednost dobija se laboratorijskim ispitivanjima, ali se terenskim kartiranjem materijala po dubini, vlažnost može vizuelno opisati, recimo: suv, vlažan, mokar ili zasićen.
- *raspadanje*: ovaj podatak je značajan, ali se teško može dokumentovati. Generalno govoreći na starim deponijama se mogu izdvojiti 4 nivoa raspadanja, uglavnom prema promeni boje: nema promene (dokumenti kao što su novine mogu se čitati a otpad nije promenio boju); slaba promena (novine se mogu čitati, ali se zapaža promena boje); srednja promena (novine su delimično čitljive i jako su promenile boju); izrazita promena (novine su nečitljive, sive su do crne boje ili potpuno izbledele).

Navedene informacije mogu se prikupiti iz standardnih geotehničkih bušotina i, na osnovu toga, može se prikazati opšti opis materijala u deponiji.

- **Primarna geotehnička klasifikacija komunalnog otpada**: U ovoj fazi se dobijaju dodatni kvantitativni podaci o otpadu, analizom prikupljenih uzoraka. Primarna

geotehnička klasifikacija komunalnog otpada, može se izvesti u nekom nadkrivenom delu na samoj deponiji ili u dovoljno provetrenoj laboratoriji. Podaci se odnose na mase čestica zemljastog otpada sitnijih i krupnijih od 20 mm, a odgovarajuće zapremine ovih frakcija se vizuelno procenjuju. S tim u vezi se vrši granulometrijska analiza i izdvajaju se:

- čestice koje se, prosejavanjem kroz otvor sita od 20 mm, zadržavaju na njemu i kasnije se na osnovu standardnih geotehničkih analiza vrši klasifikacija
- čestice sitnije od 20 mm, koje se odnose na frakcije sitnog šljunka i druge sitnije čestice, na kojima se klasičnom laboratorijskom opremom mogu vršiti ispitivanja (određivanje vlažnosti, sadržaja organskih materija, a ako je moguće i starosti materijala).

I u ovoj fazi se vrši procenjivanje sastava i stepena raspadanja materijala iz odabranih uzoraka, primenjivanjem principa klasifikacije iz prethodne faze. Mogu se uzimati u obzir i eventualne dodatne informacije, kao što su procene sadržaja materijala sitnijeg od 20 mm koji sadrži dosta čestica drveta ili recimo ima neobičnu boju i sl. Ovi podaci mogu korisno da posluže prilikom izbora sastava otpada za formiranje uzoraka koji će se laboratorijski ispitati.

- ***Sekundarna geotehnička klasifikacija komunalnog otpada:*** U ovoj fazi klasifikacije, detaljno se određuje sastav otpada iz izabranih uzoraka i to za čestice krupnije od 20 mm. Po pravilu se izdvajaju čestice: hartije, plastike (meke-kese i tvrde), drveni otpad, građevinski šut i frakcije šljunka, metala, gume, stakla, biorazgradive materije i sl. Pored toga, izdvajaju se i čestice drugih materijala koje su sitnije od 20 mm a koje su se našle „zarobljene“ u okviru krupnijih čestica, a nisu izdvojene u okviru primarne geotehničke klasifikacije. Ovi podaci se kasnije koriste za pripremu reprezentativnih laboratorijskih uzoraka za posebna ispitivanja.

4.2.2. Opšta metodologija formiranja geotehničke klasifikacije komunalnog otpada

Većina predloga koji se odnose na sistem geotehničke klasifikacije komunalnog otpada i opis materijala u njemu, uglavnom je proistekla iz postojećih klasifikacija tla, mada se

u obzir uzimaju i neke druge njegove osobine. Osnovne principe koje sistem klasifikacije treba da zadovolji kod tla, a koji se mogu primeniti i na komunalni otpad, Whitlow (1983) obrazlaže na sledeći način:

„Usvojeni sistem treba da bude dovoljno širok da obuhvati sve litološke članove [komponente otpada], a da ipak bude logičan, sistematski i koncizan. Bez primene sistema klasifikacije, prikazane informacije ili preporuke koje se odnose na projektovanje ili izgradnju zasnovane na vrsti materijala, mogu se pogrešno tumačiti, a stečeno iskustvo bilo bi teško primeniti u budućim projektima. Osim toga, ukoliko se ne usvoji stalna nomenklatura, protivrečna tumačenja termina koji se koriste, mogu da dovedu do konfuzije. Osnovni uslovi koji se pri tome moraju zadovoljiti su:

- korišćenje kratkih i definitivnih termina koji imaju sasvim jasna značenja*
- definisanje klasa i podklasa kvantitativnim parameterima koji se relativno lako mere*
- grupe klasa i podklasa treba da imaju slične tehničke osobine“*

Kada je u pitanju sastav otpada u literaturi se često mogu pronaći podaci koji se odnose na maseno učešće izdvojenih komponenti. Vrlo retko se sastav otpada analizira kroz zapreminsko učešće, a retki su i podaci koji se odnose na veličinu i oblik izdvojenih komponentata. Kod geotehničke klasifikacije komunalnog otpada, svakako da je informacija o fizičkim osobinama pojedinih komponentata otpada, posebno važna. Zato je za potrebe geotehničke klasifikacije, pored opšteg poznavanja sastava, neophodno odrediti i veličinu i oblik izdvojenih komponenti, jer se na osnovu tih podataka može utvrditi struktura otpada unutar tela deponije. To je posebno važno kod analize mehaničkih karakteristika otpada, s obzirom da struktura otpada utiče na mehaničko ponašanje čitavog tela deponije. Zato, sastav otpada treba da obuhvata: maseno, a ako je moguće i zapreminsko učešće pojedinih komponenti, posebne grupe materijala u okviru izdvojene komponente, kao i veličinu i oblik komponentata. Pored toga, i vizuelni utisak može da pruži značajne informacije, naročito u nekoj kasnijoj fazi istraživanja ako je neophodno uvoditi i određene pretpostavke.

Korak koji prethodi utvrđivanju fizičkih osobina otpada, jeste njegovo sortiranje. Sortiranjem se najpre izdvajaju pojedine komponente otpada, a kasnije se njihovom analizom mogu dobiti i neophodni podaci koji se odnose na oblik i veličinu njihovih

čestica. Opšti principi sortiranja otpada i njegove klasifikacije, na osnovu izdvojenih komponenata, opisani su u poglavlju koje se odnosi na sastav otpada. Međutim, geotehnička klasifikacija otpada nije samo klasifikacija na osnovu izdvojenih komponenata (tj. na osnovu sastava otpada), već je neophodno da se kroz sistem uključi i njegovo ponašanje u masi otpada. Za tako nešto, neophodno je verifikovati određene parametre sistema i proveriti njihovu logičnost u praksi.

4.2.3. Osnovni elementi sistema geotehničke klasifikacije

Već je naglašeno da je sastav otpada različit u zavisnosti od geografske oblasti, regiona i lokacije deponije. Ako se izuzme organski otpad, može se reći da na deponijama preovlađuju hartija, plastika i fine frakcije. U nekim regionima i čestice metala mogu da čine znatan maseni udeo, ali po pravilu one predstavljaju malu količinu materijala posmatrano zapreminski, zbog svoje velike zapreminske težine.

4.2.3.1. Izdvajanje komponenata po vrsti materijala

Jedan od elemenata geotehničke klasifikacije komunalnog otpada jeste izdvajanje osnovnih komponenata otpada na osnovu vrste materijala. Zbog izrazite heterogenosti otpada, moguće je izdvajanje grupa koje u sebi sadrže većinu sličnih materijala (papir: hartija, karton ... plastika: kese, ambalažna, tvrda...). Ovde je primenjen predlog Evropske komisije (European Commission, 2004), koji je prikazan u katalogu sortiranja komunalnog otpada. Sadržaj otpada se utvrđuje merenjem procentualnog učešća mase, za svaku izdvojenu grupu materijala.

4.2.3.2. Mehaničke osobine izdvojenih grupa materijala

Osnovne mehaničke osobine koje bi trebalo analizirati za sve izdvojene grupe su:

- čvrstoća smicanja
- čvrstoća zatezanja
- čvrstoća na pritisak
- deformacija pri kidanju
- modul elastičnosti

Ako se posmatra čvrstoća na pritisak, pojedine komponente bi mogle da se grupišu na sledeći način: keramika i inertni materijali imaju veliku čvrstoću na pritisak; staklo i metali srednju; hartija, drvo i plastika malu, dok bi organski i zemljasti materijali imali zanemarljivo malu čvrstoću na pritisak. Međutim, ako se u zemljaste materijale uvrste tlo ili stene iz iskopa, onda se za njih ne može reći da imaju zanemarljivu čvrstoću na pritisak. Ovde treba napomenuti da se mehaničke osobine izdvojenih grupa menjaju tokom vremena, pre svega zbog: promene oblika i veličina komponenata, uslova odlaganja otpada (npr. sabijanje, prekrivanje), promene naponskog stanja, deformisanja određenih čestica, a dugoročno i zbog procesa degradacije. Zato je neophodno da se prethodno definiše početno stanje koje odgovara stanju komponenata kakve su bile pri dopremanju na deponiju. Treba napomenuti da se mehaničke osobine, u okviru jedne grupe, mogu znatno da razlikuju što ukazuje i na raznovrsnost unutar izdvojenih grupa. Sa druge strane, izdvojene grupe sa sličnim mehaničkim karakteristikama, mogu se spajati čime se pojednostavljuje klasifikacija. Međutim, zbog vremenskih promena mehaničkih osobina izdvojenih grupa, sistem klasifikacije treba da omogući i promenu grupe. Takođe, treba naglasiti da ponašanje tela deponije ne zavisi od ponašanja pojedinih grupa, već od ukupnog sastava otpada i njegovih mehaničkih karakteristika, strukture i promene naponskog stanja.

4.2.3.3. Oblik izdvojenih komponenata

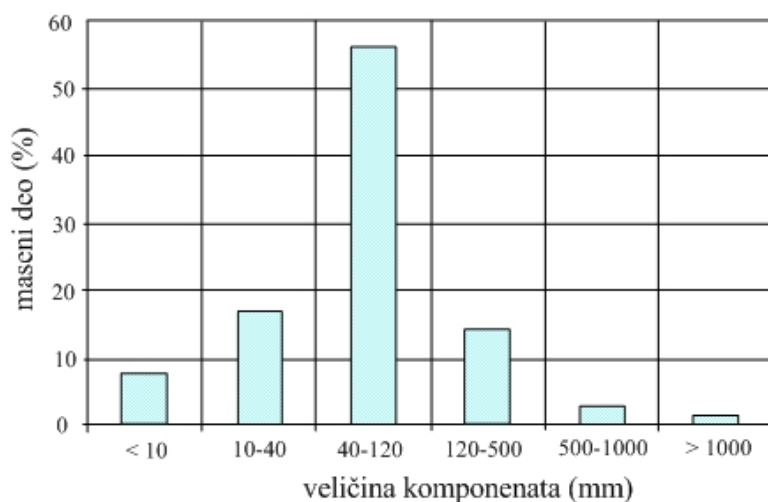
Jedna od potencijalnih karakteristika mehaničkog ponašanja otpada jeste i oblik komponenata. Na osnovu vizuelnog posmatranja oblika izdvojenih komponenti i njihovog uticaja na mehaničke osobine, one bi mogle da se grupišu na:

- jednodimenzionalne i dvodimenzionalne komponente sa dominantnom armirajućom ulogom (npr. čestice plastike, papira, gume) i
- trodimenzionalne komponente koje se mogu podeliti na one koje su:
 - stišljive* i to: velike stišljivosti (npr. materijali koji brzo trule-kvarljivi, plastična ambalaža u izvornom obliku i sl.) i male stišljivosti (npr. limenke)
 - nestišljive* komponente koje se praktično ne deformišu pod dejstvom efektivnih napona od sopstvene težine deponije ili usled sabijanja (npr. komadi metala).

Podela komponenata u odnosu na stišljivost pojedinih komponenata, može da bude korisna prilikom analize mogućih promena u telu deponije nakon odlaganja otpada, kako kratkoročnog za vreme samog odlaganja i sabijanja, tako i dugoročnog pod dejstvom sopstvene težine.

4.2.3.4. Izdvajanje otpada po krupnoći

Krupnoća otpada je jedan od bitnijih elemenata klasifikacije otpada. S obzirom da masa otpada može značajno da utiče na njegovo fizičko-mehaničko ponašanje, Kölsch (1996) je na primeru svežeg otpada iz urbanih sredina prikazao raspodelu masenog učešća komponenata, u zavisnosti od njihovih dimenzija. Kako se radi o svežem otpadu, učešće zemljastih frakcija i organskog otpada koji se posebno prikuplja, nije analiziran. Na Slici 4.6 se može videti da komponente veličine između 40 - 120 mm, obrazuju najveći maseni deo uzorka. Tu spadaju tzv. "teške" komponente kao što su: lomljeno staklo, keramika, metali, komadi stena itd., kao i komponente koje imaju "armirajuća" svojstva: npr. papir, guma i plastika. Frakcije sitnije od 40 mm, zastupljenije su na deponijama kod kojih se ne vrši prethodna obrada radi smanjenja organskih materija.



Slika 4.6 Raspodela mase otpada u zavisnosti od dimenzija izdvojenih komponenata (Kölsch, 1996)

4.3. REZULTATI KLASIFIKACIJE OTPADA SA DEPONIJAMA U SRBIJI

4.3.1 Opšte o sastavu otpada na komunalnim deponijama u Srbiji

U Srbiji se do skoro nije vršilo evidentiranje sastava komunalnog otpada, kao ni procentualnog učešća pojedinih komponenti. Međutim, u junu 2009 god, od strane Departmana za inženjerstvo zaštite životne sredine, Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, urađen je Projekat pod nazivom „*Utvrdjivanje sastava otpada i procene količine u cilju definisanja strategije upravljanja sekundarnim sirovinama u sklopu održivog razvoja Republike Srbije*“, za potrebe Agencije za zaštitu životne sredine Republike Srbije.

Za izradu Projekta, izabrano je deset reprezentativnih opština na teritoriji Republike Srbije, na čijim lokacijama je izvršeno utvrđivanje generisanih količina i sastava otpada. Analiza je urađena za šest opština centralne Srbije (Beograd, Niš, Kragujevac, Šabac, Bor i Topola) i za četiri opštine u Vojvodini (Novi Sad, Inđija, Sombor i Novi Kneževac). Uglavnom je korišćena pomenuta metodologija (S.W.A. – Tool), s tim da su kod nekih od osnovnih kategorija izdvajane i sekundarne kategorije a šifriranje, odnosno kodiranje nije rađeno. Procedura sortiranja urađena je u dva koraka. Prvi je obuhvatio procenu generisanih količina komunalnog otpada u odabranim opštinama, za period od sedam dana, merenjem količine komunalnog otpada pre njegovog odlaganja na deponije. Drugi korak je podrazumevao uzorkovanje i analizu morfološkog sastava otpada za referentne opštine, u skladu sa prikazanim katalogom za razvrstavanje komunalnog otpada. Opšta metodologija sortiranja otpada, koja je primenjena od strane Departmana za inženjerstvo zaštite životne sredine, na fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, uopšteno je prikazana i na Slikama 4.7 – 4.9.

U sklopu Projekta za sve analizirane opštine, izdvojno je po 16 osnovnih kategorija otpada. Pri tome treba reći da su u okviru osnovnih kategorija, svrstane i pojedine sekundarne kategorije.



*Slika 4.7 Nepovoljni uslovi za sortiranje otpada na terenu
(fotografije preuzete sa sajta fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu; Projekat: Utvrđivanje sastava otpada i procene količine u cilju definisanja strategije upravljanja sekundarnim sirovinama u sklopu održivog razvoja Republike Srbije)*



*Slika 4.8 Razvrstan komunalni otpad prema katalogu sortiranja
(fotografije preuzete sa sajta fakulteta tehničkih nauka u Novom Sad; Projekat: Utvrđivanje sastava otpada i procene količine u cilju definisanja strategije upravljanja sekundarnim sirovinama u sklopu održivog razvoja Republike Srbije)*

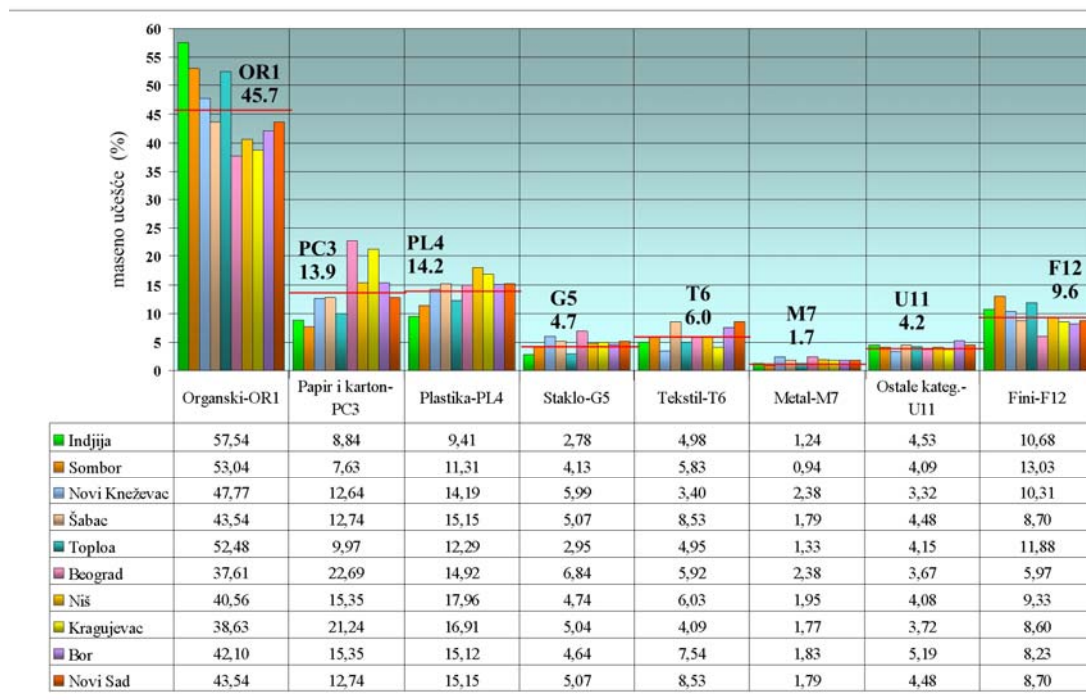


Slika 4.9 Sortiranje otpada u hali – deponija u Novom Sadu

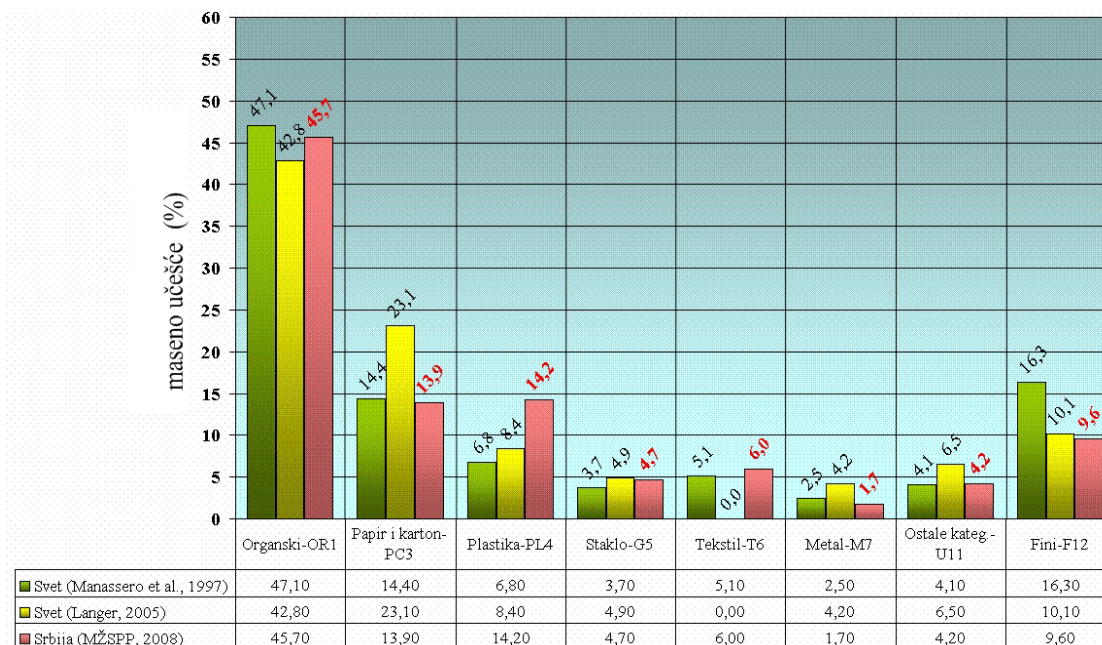
(fotografije preuzete sa sajta fakulteta tehničkih nauka u Novom Sad; Projekat: Utvrđivanje sastava otpada i procene količine u cilju definisanja strategije upravljanja sekundarnim sirovinama u sklopu održivog razvoja Republike Srbije)

Za potrebe ovog rada, izvršeno je objedinjavanje određenih sekundarnih kategorija, prema preporukama koje su prikazane u S.W.A. – Tool. Tako je: baštenski i ostali biorazgradivi otpad, svrstan u kategoriju organski – OR1; papir, karton, karton sa voskom i karton sa aluminijumom, svrstani su u kategoriju PC3 (papir i karton); plastične kese, tvrda plastika i plastična ambalaža, svrstani su u kategoriju PL4 (plastika); metal ambalažni i ostali i metal aluminijumski, u kategoriju M7 (metal), dok su pelene izdvojene kao ostale kategorije (U11). Na ovaj način dobijeni su podaci za 8 osnovnih kategorija koji se mogu upoređivati sa podacima koji se odnose na sastav otpada u svetu (Slike 4.1 i 4.2). Ovako objedinjene kategorije otpada, za karakteristične opštine, ilustruju prosečan sastav otpada u Srbiji (Slika 4.10).

Na Slici 4.11, izvršeno je poređenje podataka vezanih za sastav otpada u Srbiji sa podacima koji se odnose na sastav otpada u svetu. Uopšteno se može reći da sastav otpada u Srbiji, uglavnom, odgovara sastavu otpada u svetu. Prema morfološkom sastavu otpada, najzastupljeniji je organski otpad (baštenski otpad i ostali biorazgradivi otpad) koji zauzima gotovo 50 % u masi komunalnog otpada, i dobro se slaže sa podacima koji se odnose na sastav otpada u svetu. Značajnije odstupanje je karakteristično za kategoriju PL4 – plastiku, za koju se može reći da je njen maseni udeo, u odnosu na prosečan u svetu, skoro dva puta veći.



Slika 4.10 Prikaz sastav otpada za pojedine gradove u Srbiji (osnovni podaci preuzeti sa sajta fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu)



Slika 4.11 Uporedni podaci sastava otpada u Srbiji i u svetu prema katalogu Evropske komisije

Ovde treba naglasiti da se primenjena metodologija određivanja sastava otpada odnosi na sveže generisani otpad tj. otpad koji se direktno sa izvora nastanka odlaže na deponije.

4.3.2. Opis deponija sa kojih su uzeti uzorci za ispitivanje

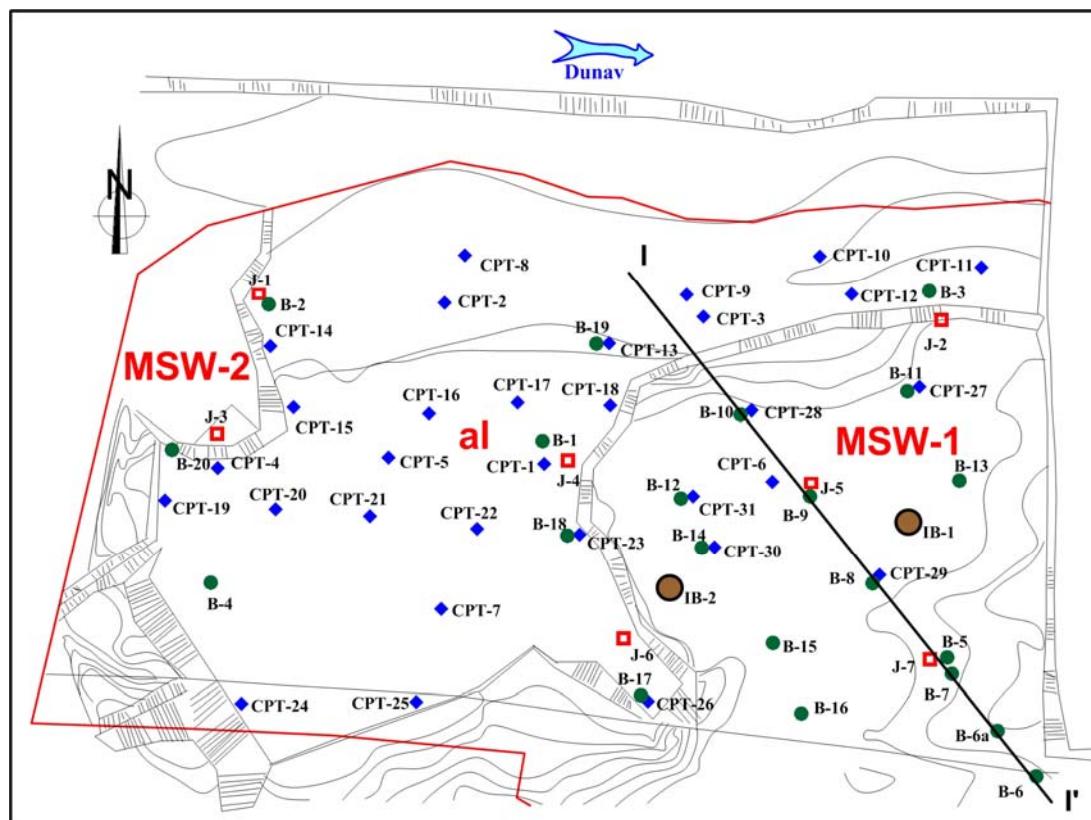
Za potrebe izrade ove disertacije, korišćen je otpad koji je uzet sa jedne zatvorene deponije (Ada Huja u Beogradu) i jedne deponija koja se trenutno koristi za odlaganje otpada (aktivne deponije za grad Novi Sad).

Lokacija stare deponije komunalnog otpada, za područje grada Beograda na Adi Huji, zvanično je zatvorena 1978 god. Zatvaranje je podrazumevalo samo prekrivanje otpada inertnim materijalom, bez rekultivacije i primene savremenih materijala i tehnika zatvaranja. Zbog toga je praksa nekontrolisanog odlaganja nastavljena i nakon zatvaranja, pa se na pojedinim njenim delovima i danas uglavnom deponuje građevinski šut.

Područje stare deponije komunalnog otpada na Ada Huji, geotehnički je istraživano u više faza, počev od: Inženjerskogeoloških istraživanja za potrebe izrade DUP područja Ada Huje (Kosovoprojekt, 1984); Ispitivanja za potrebe izrade platoa železničke stanice Karaburma (CIP, 1989); Istraživanje terena za potrebe izgradnje tržnog centra na staroj deponiji Ada Huja (Građevinski fakultet iz Beograda - Institut za saobraćajnice i geotehniku, 2003 i 2004); Istraživanja za potrebe izgradnje nove Dunavske saobraćajnice od Pančevačkog mosta do Ada Huje i deo rekonstrukcije puta za Ada Huju (Geosonda-geomehanika, 2005); Istraživanja za potrebe remedijacije degradiranog prostora na području katastarskih parcela predviđenih za izgradnju tržnog centra (EnviTech, 2007).

Pomenuta istraživanja su obuhvatila veći broj istražnih radova. Izvedeno je preko 45 istražnih bušotina sa ukupnom dužinom svih izvedenih istražnih bušotina od preko 600 m, 48 opita statičke penetracije (CPT), preko 100 opita standardne penetracije (SPT) i veći broj istražnih jama. Materijal komunalnog otpada, koji je korišćen za potrebe ove disertacije, dobijen je iz kompletnog jezgra dve istražne bušotine koje je izvelo preduzeće Geoput iz Beograda. Lokacija deponije Ada Huja, sa rasporedom izvršenih geotehničkih istraživanja od strane Građevinskog fakulteta u Beogradu kao i

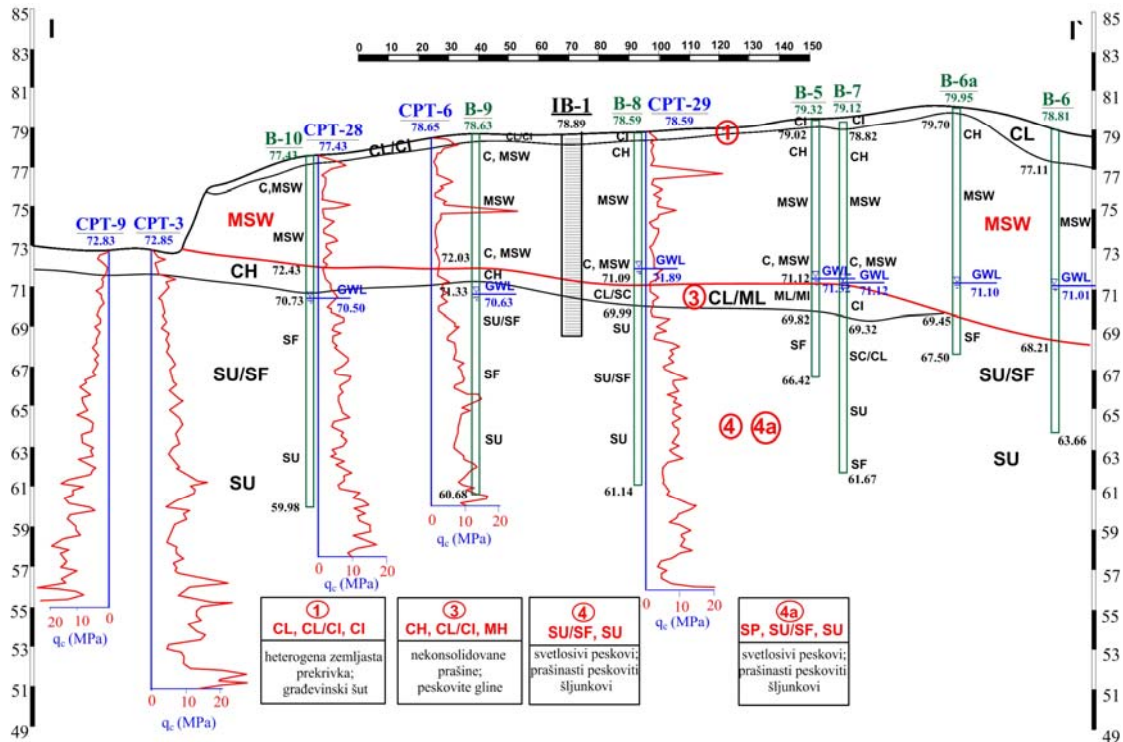
istraživanja koja su obavljena od strane preduzeća Geopot iz Beograda, prikazana je na Slici 4.12.



Slika 4.12 Situacija zatvorene deponije na Ada Hugi sa koje su uzeti uzorci komunalnog otpada

Lokacija je približno pravougaonog oblika sa dužom stranom od preko 500 m, dok je kraća strana dužine oko 300 m. Sa severne strane, lokacija je ograničena Dunavom na odstojanju od oko 100 m. Granicu između deponije i prirodnog terena čine relativno strme kosine deponije sa nagibima od 30 – 40⁰. Prirodni teren na samoj lokaciji deponije, izgrađen je od povodanjskih sedimenata koji su istaloženi u vodenoj sredini pri povremenom plavljenju terena visokim vodostajem Dunava. U površinskom delu terena naizmenično se, kako u vertikalnom tako i horizontalnom pravcu, smenjuju nekonsolidovane prašinate i peskovite gline (CH, CL-CI, MH), koje su u pojedinim intervalima obogaćene organskim materijama. Ispod njih su istaloženi sedimenti facije korita, predstavljeni svetlosivim peskovima i prašinasto-šljunkovitim peskovima (SP, SU-SF, SU) u okviru kojih se povremeno javljaju proslojci organskih materija u vidu polustrulelih ostataka flore. Lokalno su na samoj lokaciji konstatovani i sedimenti

starača, koji su stvarani u napuštenom rukavcu Dunava. Karakterističan geotehnički presek terena deponije na Ada Huji, sa lokacijom jedne bušotine iz koje je uzet otpad za ispitivanja u ovoj disertaciji, prikazan je na Slici 4.13.

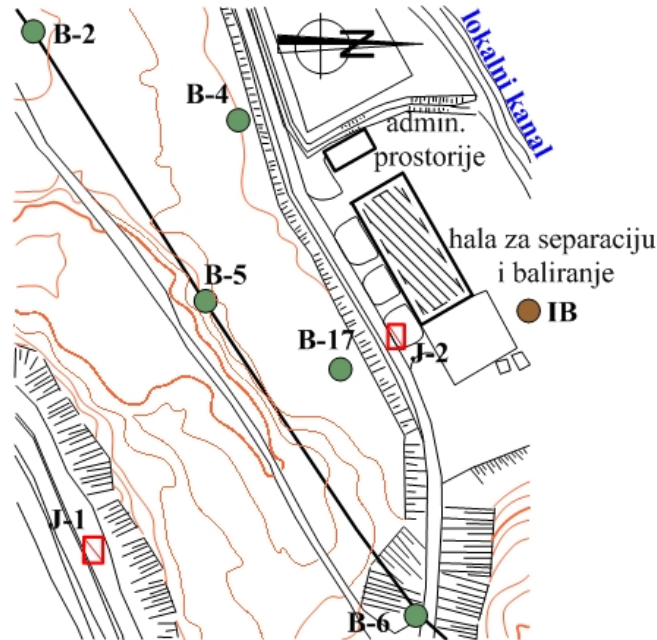


Slika 4.13 Karakteristični geotehnički presek deponije sa lokacijom bušotine iz koje je uzet material za ispitivanje

S obzirom da je debljina otpada iznosila od 6 do 9 m, a da je deponija na Ada Huji zatvorena 1978 godine, može se reći da je orijentaciona starost materijala, koji je uzet istražnim bušenjem sa ove lokacije, između 35 i 40 godina.

Za potrebe izrade projekta sanacije komunalne deponije u Novom Sadu, od strane preduzeća Geoinženjering iz Niša, izvedeno je 16 istražnih bušotina sa ukupnom dužinom bušenja od 256 m i 7 istražnih jama. Materijal koji je iskorišćen za laboratorijska ispitivanja, uzet je iz četiri istražne bušotine (B-2, B-4, B-5 i B-17) i iz istražne jame J-2 izvedene u zoni platoa pratećih objekata, kao i iz jedne istražne bušotine (IB) sa mikrolokacije na kojoj su izgrađeni prateći objekti deponije (sala za separaciju i baliranje otpada i kontejner u kome su smeštene administrativno tehničke

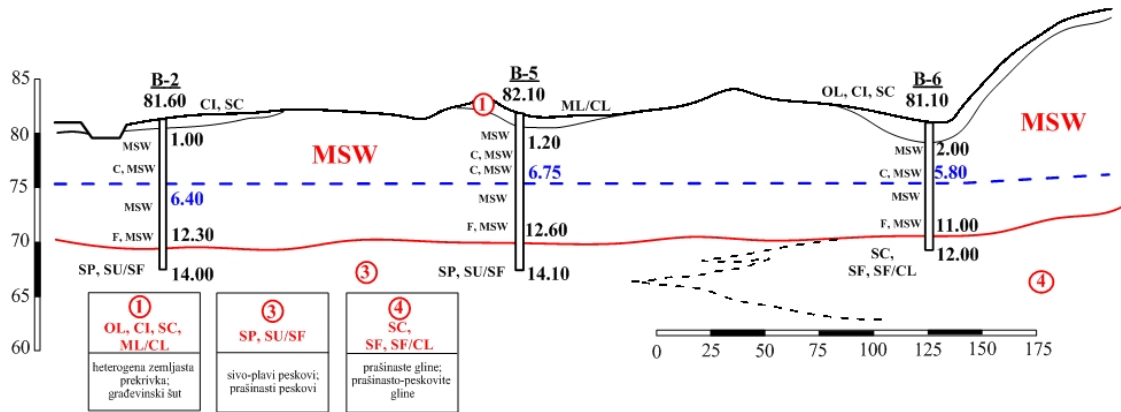
prostorije). Deo lokacije ove deponije komunalnog otpada, sa rasporedom istražnih bušotina iz kojih je uzet materijal za ispitivanje, prikazan je na Slici 4.14.



Slika 4.14 Deo situacije aktivne deponije komunalnog otpada u Novom Sadu sa rasporedom istražnih bušotina iz kojih su uzeti uzorci komunalnog otpada

Lokacija deponije se nalazi na oko 1 km severno od Novog Sada u pravcu Srbobrana, sa desne strane magistralnog puta Novi Sad - Subotica (Temerinski put). Prirodni teren na kojem je formirano telo deponije, blago je zatalasan sa generalnim nagibom prema jugu – jugoistoku. Izgrađuju ga aluvijalni stariji sedimenti u vidu povodanjske facije peskova prašinih do srednjeznih različito zaglinjenih i lesoidnih (SP, SU/SF, SC). Sa porastom dubine, prelazi se u faciju korita koja istražnim radovima nije konstatovana jer je na dubini većoj od 20 m.

Ranijim istraživanjima, konstatovano je da facija korita ima razviće na celom istražnom području. Preko povodanjske facije istaloženi su mlađi aluvijalni sedimenti facije starača stvarani u rukavcima i meandrima Dunava. U okviru ove facije izdvojeni su pripovršinski prašinski i zaglinjeni peskovi sa organskim ostacima i lesoidne prašinate gline (OL, CI, ML-CL, SC). Karakterističan geotehnički presek terena, sa lokacijama bušotina iz kojih je uzet otpad za ispitivanja, prikazan je na Slici 4.15.



Slika 4.15 Karakteristični geotehnički presek deponije sa lokacijom bušotina iz kojih je uzet material za ispitivanje

4.3.3. Izbor uzoraka

Svaki inženjerski zahvat, na deponovanom otpadnom materijalu, uključuje i problem izbora reprezentativnih uzoraka tj. područja posmatranja. Da bi se za potrebe klasifikacije izvršio izbor reprezentativnog uzorka iz deponije, od velike koristi mogu biti sledeće informacije:

- poznavanje oblika čestica, kako bi se razlikovale one nalik tlu (na primer zrnaste) i one koje ne liče na tlo (na primer listići i vlakna). Na osnovu toga, moguće je izvršiti klasifikaciju čestica prema njihovom potencijalnom uticaju na mehaničko ponašanje otpada (npr. stišljivosti, čvrstoći smicanja)
- razlika između grupa materijala, na osnovu karakterističnih osobina čestica. Na osnovu toga, moguće je utvrditi dominantne grupe u odnosu na veličinu i mehanička svojstva pojedinih čestica (na primer, prema poznavanju sadržaja mase čestica različite krupnoće u svakoj izdvojenoj grupi - metal, papir, plastika)
- granulometrijski sastav za sve izdvojene grupe
- utvrđivanje deformabilnosti čestica tj. potencijal pojedinih čestica da promene oblik i zapreminu za vreme odlaganja i kasnije nakon zatvaranja deponije
- procena potencijala degradacije, kako za organske tako i za neorganske elemente

S obzirom na starost otpada, uticaj degradacije, izrazitu heterogenost materijala otpada pa samim tim i promenu sastava tokom vremena, vodio sam računa o izboru materijala za ispitivanje. Iz tih razloga, koristio sam otpad različite starosti koji je uzet iz aktivne deponije koja se trenutno koristi za odlaganje otpada (gradska deponija u Novom Sadu) kao i iz deponije koja je zatvorena (Ada Huja, Beograd). Sva laboratorijska ispitivanja, izvršena su na otpadnom materijalu koji je istražnim bušenjem i/ili kopanjem istražnih jama, uzet iz samih deponija. Otpadni materijal (uzorci otpada) sa deponije na Ada Huji, uzet je iz istražnih bušotina, dok je otpad sa deponije u Novom Sadu, uzet i iz istražnih bušotina i iz istražnih jama (Slike 4.16 i 4.17).



Slika 4.16 Komunalni otpad iz istražne bušotine na deponiji Ada Huja



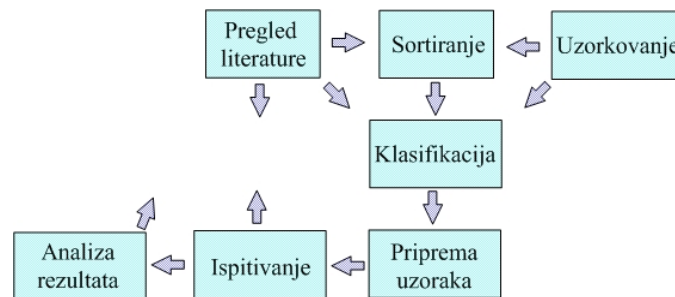
Slika 4.17 Komunalni otpad iz istražne bušotine i istražne jame sa deponije u Novom Sadu

Nakon vizuelnog pregleda otpada na terenu, pristupio sam izboru uzoraka. Sa deponije Ada Huja uzet je kompletan materijal iz istražnih bušotina koji je sakupljen u 4 plastične kante sa poklopcem, na kojima je stavljena oznaka i dopremljene su u laboratoriju za mehaniku tla Rudarsko-geološkog fakulteta. Uzorci sa deponije u

Novom Sadu uzeti su iz četiri bušotine i to sa različitih dubina i iz jedne istražne jame. Za prikupljanje, pakovanje i transport ovih uzoraka, korišćeni su plastični džakovi.

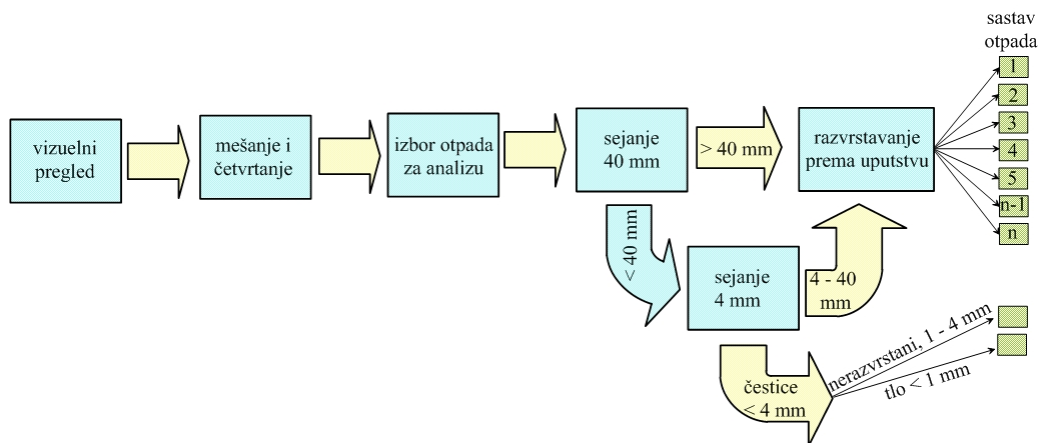
4.3.4. Razvrstavanje otpada

Na dopremljenim uzorcima u laboratoriji obavljeno je razvrstavanje otpada, njegova klasifikacija i priprema uzoraka za dalja ispitivanja (Slika 4.18).



Slika 4.18 Primenjena metodologija ispitivanja.

Razvrstavanje otpada izvršio sam na osnovu delimično modifikovane procedure koju je predložila Evropska komisija 2004, i koja je prikazana na Slici 4.19.



Slika 4.19 Delimično modifikovana procedura razvrstavanja komunalnog otpada

Treba naglasiti da sam materijal sa deponija prethodno razastro preko najlonske folije i homogenizovao, a nakon toga sam izvršio vizuelni pregled i obavio razvrstavanje otpada (Slika 4.20). Postupak razvrstavanja je podrazumevao fizičko izdvajanje karakterističnih grupa zastupljenih materijala u komunalnom otpadu i merenje mase izdvojenih grupa. Izdvojio sam sledeće grupe: drvo -W2, papir i karton - PC3, plastika -

PL4, staklo - G5, tekstil - T6, metal - M7, guma - O11 03, keramika - IN10 02, zemljasti-inertni materijal - IN10 01 i nerazvrstani materijal - F12.



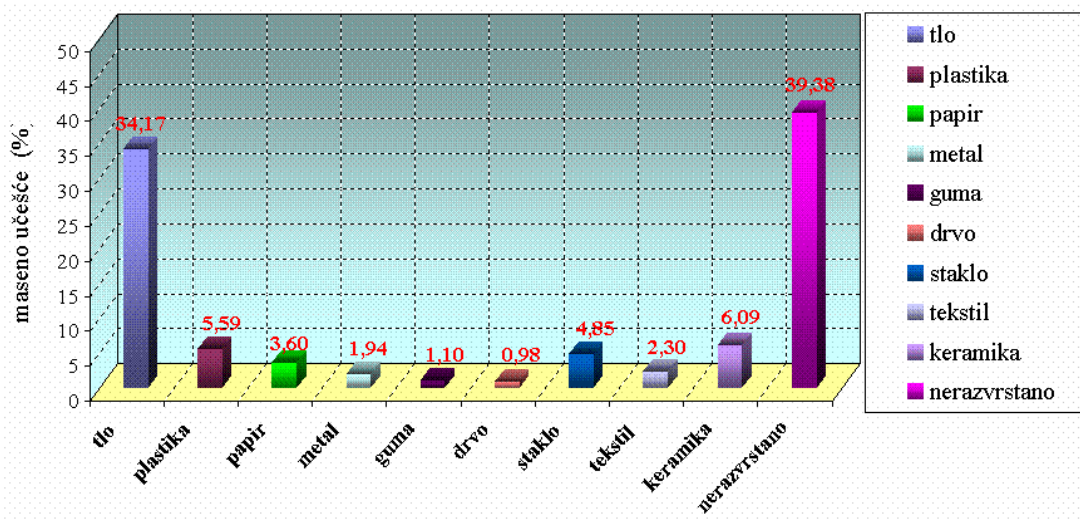
Slika 4.20 Postupak mešanja i pripreme materijala za sortiranje

Prilikom razvrstavanja na terenu, zastupljeni materijali nisu posebno izdvajani po obliku i po krupnoći. Osnovni razlog za to je način vađenja uzoraka istražnim bušenjem, čime su u startu ograničene dimenzije zastupljenih materijala na maksimalnu veličinu koja odgovara prečniku bušenja (izuzetak su materijali čija je orijentacija u telu deponije približno paralelna osi bušenja).

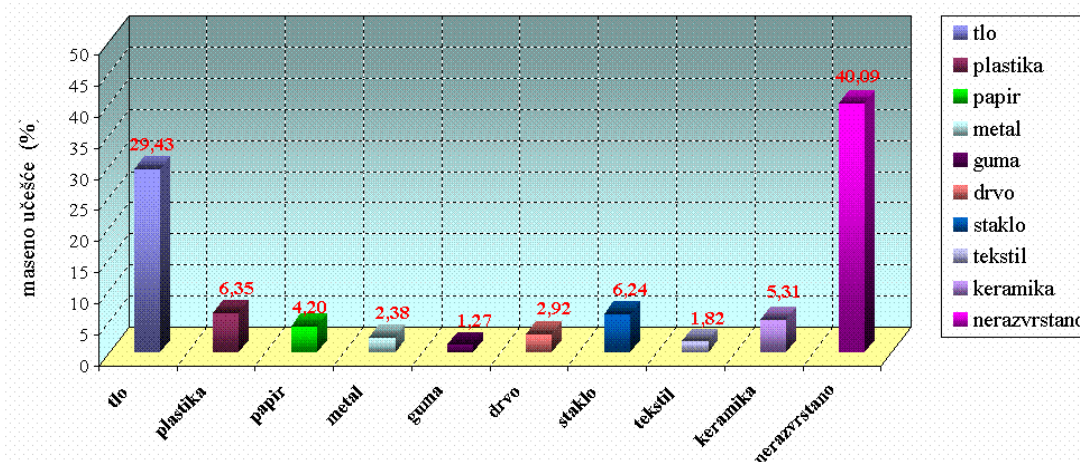
Nakon toga, obavio sam sušenje (na 60⁰C) i merenje masa izdvojenih grupa, radi određivanja njihovog učešća u odnosu na ukupnu masu analiziranog uzorka, čime sam odredio sastav otpada. Ovako definisan sastav otpada, upoređivao sam sa podacima koji se odnose na sastav otpada koji su objavljeni u "Nacionalnoj strategiji upravljanja otpadom" iz 2003 god., kao i "Strategiji upravljanja otpadom za period 2010 – 2019 god." (Službeni Glasnik RS br. 36/09). Pored toga, analizirao sam i podatke iz pomenute studije koju je uradio Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu. Pri tome treba reći da sam koristio šire kategorije koje se odnose na pojedine materijale, kao na primer: papir - obuhvata i hartiju i karton; plastika - obuhvata polietilen i velike i male gustine; tekstil - obuhvata i tekstil, kožu i pelene; metal – obuhvata sve metale i aluminijumske konzerve i sl. U sklopu nerazvrstanog otpada, izdvojio sam materijal sa česticama između 1 i 4 mm, gde su dominirale zemljaste materije (u koje sam uključio čestice peska, prašine i gline, dok sam čestice šljunka ranije svrstao u stene sa keramikom) i

sitne čestice već izdvojenih materijala koje fizički nije bilo moguće izdvojiti (plastike, metala, papira...). Čestice sitnije od 1 mm, razvrstao sam posebno i njih sam okarakterisao kao tlo.

Prosečan materijalni sastav otpada pojedinih deponija, koji je iskorišćen za pripremu uzoraka za laboratorijske opite, prikazan je na dijagramima (Slike 4.21 i 4.22). Iz dijagrama se može videti da je procentualno učešće mase nerazvrstanog i mase zemljastog materijala najveće, što je i uobičajeno kada je u pitanju stariji otpad, jer se proces biodegradacije nalazi u završnoj fazi (deponija na Adi Huji zatvorena je 1978 god.).

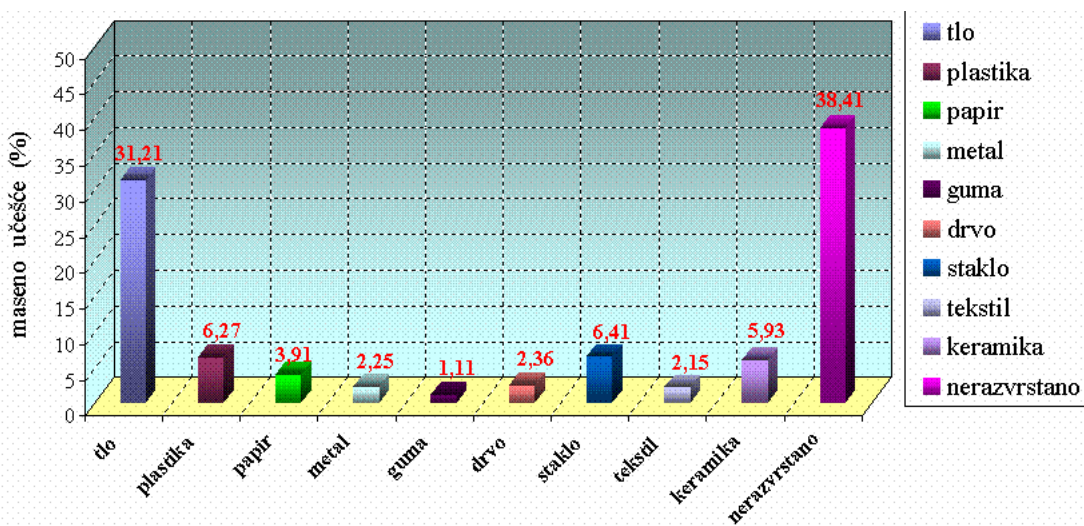


Slika 4.21. Sastav komunalnog otpada za pripremu uzoraka sa deponije Ada Huja – Beograd



Slika 4.22. Sastav komunalnog otpada za pripremu uzoraka sa deponije Novi Sad

Jedan deo materijala sa deponije u Novom Sadu i sa deponije Ada Huja je izmešan i na tako izmešanom materijalu određen je sastav (Slika 4.23). Isti materijal je kasnije iskorišćen za formiranje uzoraka na kojima su izvedeni edometarski opiti i opiti direktnog smicanja.



Slika 4.23. Sastav izmešanog komunalnog otpada sa deponija Ada Huja i Novi Sad

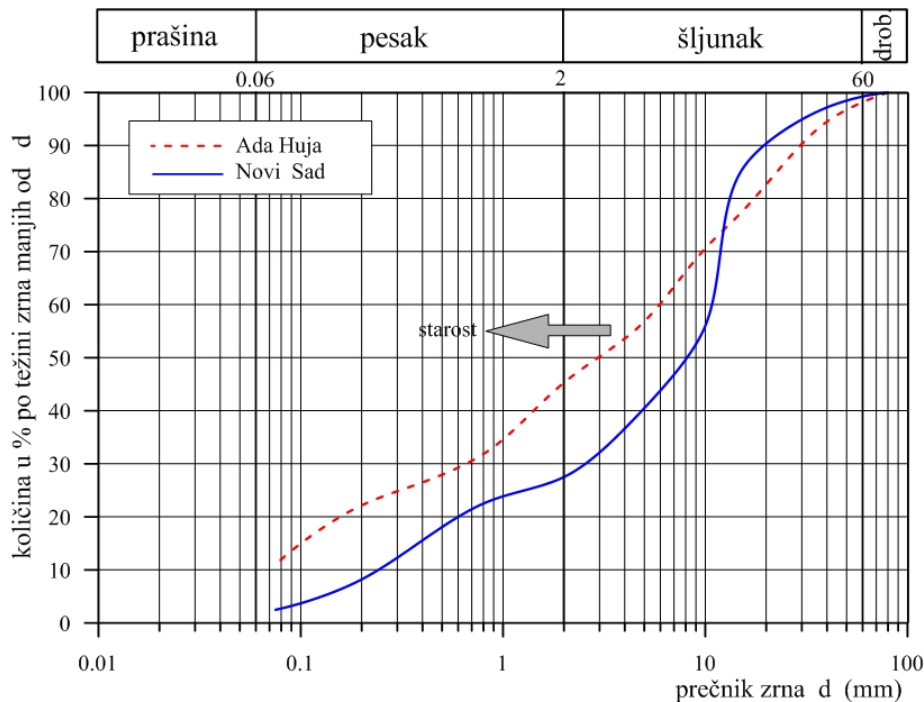
Ovakvo razvrstan otpad, nešto je drugačiji u odnosu na sastav koji je prikazan na dijagramima (Slike 4.10 i 4.11). Naime, ranije prikazana analiza sastava otpada u Srbiji, odnosila se na sveži otpad koji tek treba da se odloži na deponiju, dok se za otpad koji je uzet za potrebe ovih ispitivanja može reći da je znatno stariji i sadrži znatan procenat nerazvrstanog i zemljastog materijala (bilo od materijala koji je korišćen za prekrivanje ili zbog podmakle faze biorazgradnje). S obzirom na prosečni eksploatacioni period deponija u Srbiji od preko 30 god., za ovakav sastav otpada se može reći da je reprezentativan za već formirane deponije, jer je u pitanju stariji otpad.

4.3.5. Predlog geotehničke klasifikacije otpada

Za razliku od tla, otpad se sastoji od komponenata koje se veoma mnogo razlikuju po osobinama, što komplikuje njegov prikaz. Zato je i postupak geotehničke klasifikacije naporan i iziskuje dosta podataka, pa su neophodne i određene pretpostavke. To podrazumeva i izmenjeni način prezentacije podataka o otpadu (vrsti, obliku, veličini,

homogenosti i njihovom uticaju na mehaničke karakteristike pa i potencijalnoj biorazgradivosti).

Za geotehničku klasifikaciju, iskoristio sam otpad čiji su tipični dijagrami granulometrijskog sastava prikazani na Slici 4.24. Kao što se sa Slike može videti, najveći prečnik čestica koje su korišćene za klasifikaciju otpada, je 80 mm, a frakcije sitnije od 10 mm predstavljaju preko 55 % ispitivanog materijala.



Slika 4.24. Granulometrijski sastav otpada koji je korišćen za geotehničku klasifikaciju

Najvažniju ulogu kod geotehničke klasifikacije imaju razvrstavanje i opis komponenata otpada. Postupak sortiranja je urađen prema proceduri prikazanoj na Slici 4.19 i izdvojeno je deset grupa različitih materijala. Na ovaj način je definisan sastav komunalnog otpada (Slike 4.21; 4.22 i 4.23).

Jedna od osnovnih razlika između izdvojenih grupa, koja može značajno da utiče na mehaničke karakteristike otpada, jeste oblik čestica. Vizuelnim pregledom, izdvojio sam tri karakteristična oblika:

- „trodimenzionalni“ (kabasti, kompaktni)
- „dvodimenzionalni“ (pljosnati, pločasti, ljuspasti, folije) i
- „jednodimenzionalni“ (izduženi, igličast, vlaknast)

Prvoj grupi pripadaju čestice kod kojih su dužina (l), širina (b) i debljina-visina (h), približno istog reda veličine (odnos ekvivalentnog prečnika čestice R i karakteristične dimenzije: R/l , R/b i R/h je približno 1). Kada je odnos debljine, prema širini i dužini čestice, mali (h/l i $h/b < 1/100$), čestice pripadaju drugoj grupi. Trećoj grupi pripadaju čestice kod kojih je odnos debljine i širine prema dužini mali (h/l i $b/l < 1/100$).

Oblik čestica sam uzeo u obzir iz dva razloga. Prvi, zbog praktičnosti izdvajanja, a drugi zbog kasnije procene uticaja izdvojenih oblika na mehaničke karakteristike otpada. Ovakav način razvrstavanja nije moguće izvršiti na osnovu određivanja granulometrijskog sastava, pa je za sve izdvojene grupe materijala, procentualno učešće vizuelno procenjeno, a rezultati su prikazani u Tabeli 4.3.

Podaci o vrsti materijala i obliku njihovih čestica, poslužili su za njihovo dalje grupisanje prema mehaničkim karakteristikama. Vrste materijala grupisane su u odnosu na tri najbitnije mehaničke karakteristike i to:

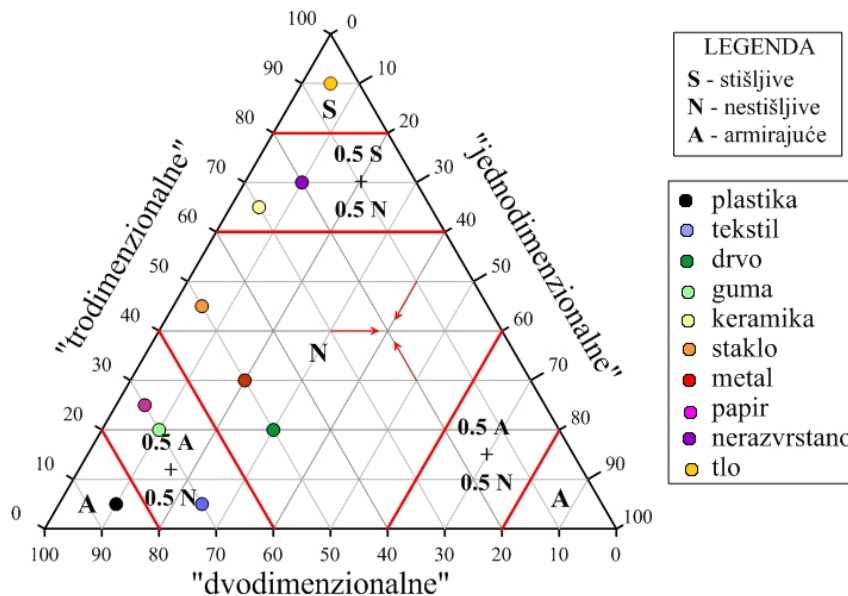
- materijale koji imaju armirajuću funkciju
- stišljive materijale i
- nestišljive materijale

Najčešće se klasifikacijama procenjuje ponašanje materijala koji se klasifikuje. Međutim, grupe su na ovaj način formirane jer su, s obzirom na geotehničke uslove, od mehaničkih karakteristika najinteresantnije otporane i deformabilne. Karakteristična armirajuća svojstva su specifična i značajna za razumevanje čvrstoće smicanja upravo kod komunalnog otpada. Ovakvim pristupom klasifikaciji komunalnog otpada, mogu se sagledati konkretne mehaničke karakteristike, a ne samo njegova globalna procena. Treba naglasiti da u vezi sa tim postoji i analogija sa tlom (na osnovu konsistencije kod fino-zrnih, odnosno, relativne zbijenosti kod grubozrnih materijala).

Tabela 4.3. Vizuelna procena oblika čestica izdvojenih materijala

Vrsta materijala	Izgled analiziranog uzorka	Zastupljenost izdvojenih oblika (%)		
		„trodim.“	„dvodim.“	„jednodim.“
Plastika		5	85	10
Tekstil		5	70	25
Drvo		20	50	30
Guma		20	70	10
Keramika+stene		65	30	5
Staklo		45	50	5
Metal		30	50	20
Papir+karton		25	70	5
Nerazvrstano		70	20	10
Tlo		90	5	5

S obzirom da se za jedan isti materijal, neke od izdvojenih mehaničkih karakteristika preklapaju (npr. tekstil, guma i papir mogu imati i armirajuću funkciju a mogu biti i nestišljivi kao što i nerazvrstani materijal može biti i nestišljiv i stišljiv), dat je predlog definisanja dominantnog uticaja u vidu trouglog dijagrama (Slika 4.25). Za formiranje trouglog dijagrama iskorišćeni su podaci prikazani u Tabeli 4.3.



Slika 4.25. Trouglovi dijagram oblika materijala sa procenom mehaničkih karakteristika

Sa slike se može videti da je dominantna funkcija plastičnih materijala, armirajuća. Međutim, treba imati u vidu da je armirajuća funkcija uslovljena i odnosom veličine potencijalno armirajuće komponente prema susednim komponentama. U grupu nestišljivih materijala izdvojio sam čvrste komponente, kao što su sitni, komadi metala i stakla. Za ove materijale se može reći da ne menjaju svoj oblik i ne deformišu se pod efektivnim opterećenjem deponije i usled sabijanja. Stišljivi materijali se mogu klasifikovati u dve podgrupe, u kojima bi se posebno mogli izdvojiti jako i slabo stišljivi. Međutim, ovu granicu je teško kvantifikovati. Jedan od načina za to je vizuelni pregled na osnovu grube procene materijala, ali se i tu može naići na određene poteškoće. Tako npr. tanki ambalažni materijali, kao što su plastična folija ili papir, mogu imati i „trodimenzionalni“ oblik (recimo kada su izgužvani) koji ove materijale svrstava u jako stišljive, za razliku od njihovog prvobitnog izgleda kada se mogu svrstati u slabo stišljive, pa čak i u nestišljive (ako je njihova orijentacija upravna na

opterećenje). To znači da je granica između jako i slabo stišljivih materijala različita od slučaja do slučaja, pa zbog pojednostavljanja postupka klasifikacije, podgrupe nisu izdvajane.

Prema predloženom kriterijumu, izdvojeni materijali su dalje grupisani na osnovu podataka iz trouglog dijagrama koji je posebno prikazan i u Tabeli 4.4. Na ovaj način, svi izdvojeni materijali su zastupljeni sa celokupnim učešćem.

Tabela 4.4 Predlog grupisanja materijala prema mehaničkim karakteristikama

Mehanička karakteristika	Vrsta materijala - maseno učešće (%)
Armirajuće komponente – A	1 x plastika
	0.5 x tekstil
	0.5 x guma
	0.5 x papir
Nestišljivi materijali – N	1 x drvo
	1 x metal
	1 x staklo
	0.5 x tekstil
	0.5 x guma
	0.5 x papir
	0.5 x nerazvrstano
	0.5 x keramika + šljunak + stena
Stišljivi materijali - S	1 x tlo + fine frakcije
	0.5 x nerazvrstano
	0.5 x keramika + šljunak + stena

Postupak prikazan u Tabeli 4.4, primenjen je na otpad sa deponije Ada Huja i otpad sa deponije u Novom Sadu, a rezultati su prikazani u Tabelama 4.5 – 4.7.

Tabela 4.5 Grupisanje materijala prema sadržaju armirajućih komponenti

Vrsta materijala	Armirajuće komponente – A			
	Ada Huja		Novi Sad	
	maseno učešće (%)	učestalost	maseno učešće (%)	učestalost
1 x plastika	5.59	61.5	6.35	63.5
0.5 x tekstil	1.15	12.6	0.91	9.1
0.5 x guma	0.55	6.1	0.64	6.4
0.5 x papir	1.80	19.8	2.10	21.0
Σ	9.09	100	10.0	100

Prikazana podela po obliku čestica, ne uzima u obzir i njihovu veličinu, koja je takođe bitna za klasifikaciju otpada a posebno za procenu mehaničkih svojstava i podelu na

stišljive, nestišljive i armirajuće komponente. Tako na primer, da bi se uzeo u obzir uticaj armiranja, čestice izdvojenih materijala ove grupe, treba da su većih dimenzija od čestica koje ih okružuju, kako bi vezivanje recimo folija, plastike, ili vlakana bilo moguće. To je jedan od preduslova efekta armiranja.

Tabela 4.6 Grupisanje materijala prema sadržaju nestišljivih materijala

Vrsta materijala	Nestišljivi materijali – N			
	Ada Huja		Novi Sad	
	maseno učešće (%)	učestalost	maseno učešće (%)	učestalost
1 x drvo	0.98	2.9	2.92	7.7
1 x metal	1.94	5.7	2.38	6.3
1 x staklo	4.85	14.3	6.24	16.5
0.5 x tekstil	1.15	3.4	0.91	2.4
0.5 x guma	0.55	1.6	0.64	1.7
0.5 x papir	1.80	5.3	2.10	5.5
0.5 x nerazvrstano	19.69	57.9	20.01	52.9
0.5 x keramika+šljunak+stena	3.05	8.9	2.66	7
Σ	34.01	100	37.86	100

Tabela 4.7 Grupisanje materijala prema sadržaju stišljivih materijala

Vrsta materijala	Stišljivi materijali - S			
	Ada Huja		Novi Sad	
	maseno učešće (%)	učestalost	maseno učešće (%)	učestalost
1 x tlo + fine frakcije	34.17	60	29.43	56.5
0.5 x nerazvrstano	19.69	34.6	20.05	38.5
0.5 x keramika+šljunak+stena	3.05	5.4	2.66	5
Σ	56.91	100	52.14	100

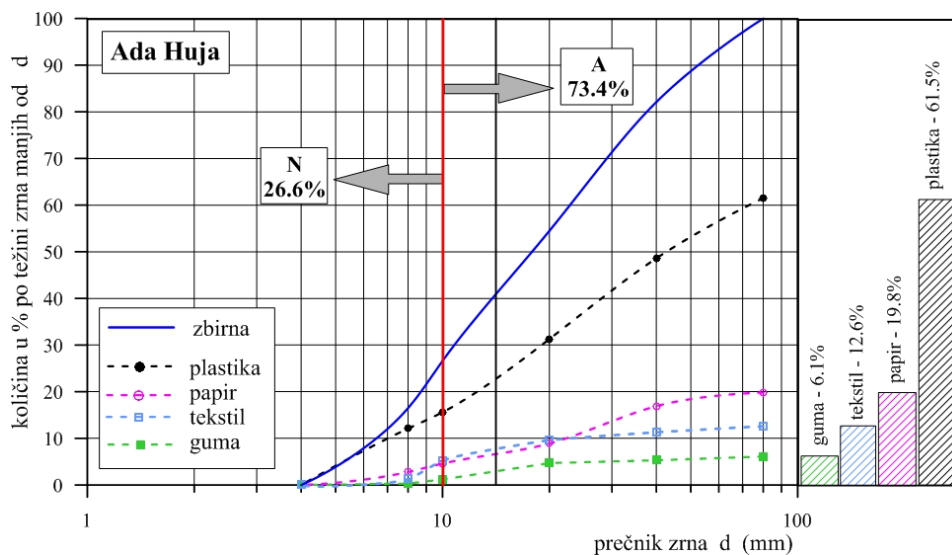
Na Slici 4.6 je prikazan jedan od načina sortiranja otpada po krupnoći. Međutim, on daje profil krupnoće koja je zastupljena na samoj deponiji. S obzirom da se ova klasifikacija vrši na česticama znatno manjih dimenzija, predložio sam nešto drugačiji kriterijum koji se zasniva na granulometrijskom sastavu. Rezultati iz prikazanih tabela poslužili su za dobijanje kriva učestalosti, odnosno granulometrijskih krivih izdvojenih grupa. Na osnovu njih, analiziran je uticaj veličine čestica, koji je takođe uključen u klasifikaciju otpada. Pri tome sam usvojio sledeća dva kriterijuma:

- armirajuću funkciju imaju samo čestice veličine preko 10 mm, a sitnije čestice pridodate su grupi nestišljivih materijala za koje se smatra da ne ispoljavaju efekat armiranja;

- čestice veličine preko 2 mm su stišljive a sitnije čestice su pridodate grupi nestišljivih materijala.

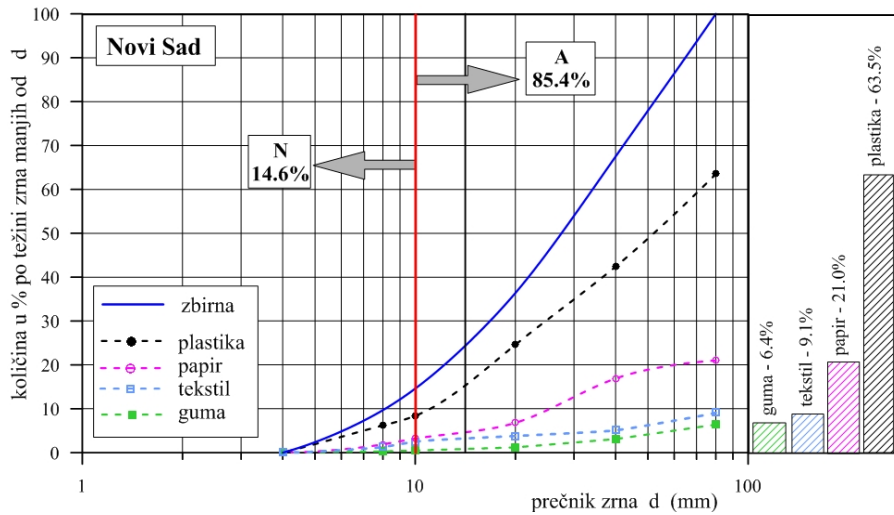
Ovi kriterijumi su predloženi za analizirani otpad sa najvećim prečnikom čestica od 80 mm. Može se reći da je on laboratorijskog karaktera. Za slučaj da se klasifikacija izvodi na terenu i da se izdvajaju materijali znatno većih dimenzija, ove kriterijume bi svakako trebalo promeniti.

Zbirne granulometrijske krive, sa krivama zastupljenosti pojedinih materijala u okviru izdvojenih grupa, prikazane su na Slikama 4.26 – 4.31. U okviru dijagrama prikazani su i usvojeni kriterijumi (Rakić i dr. 2012c).

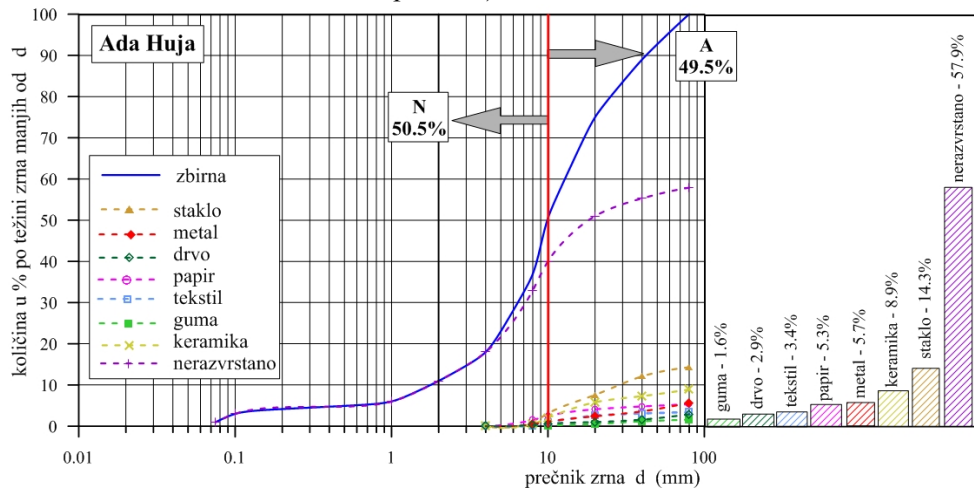


Slika 4.26. Zbirna granulometrijska kriva i krive zastupljenosti materijala (armirajuće komponente) - Ada Huja

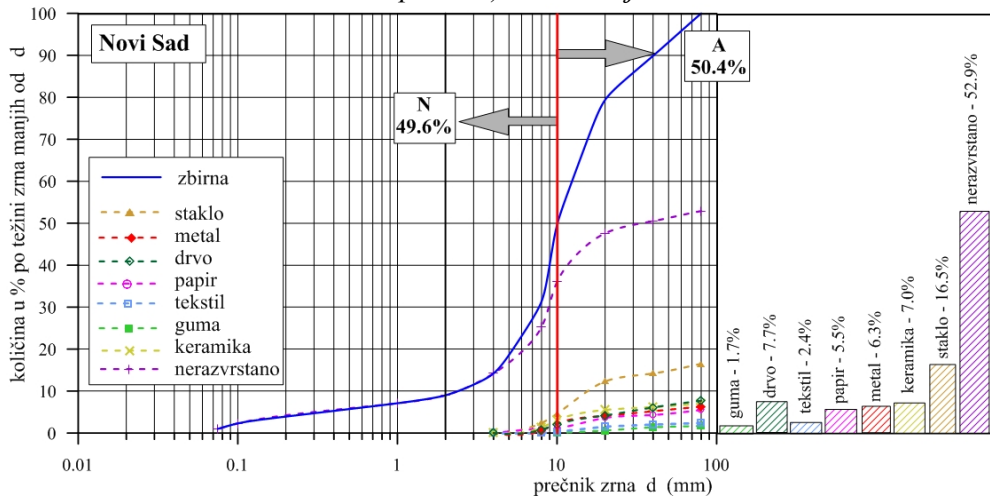
Na Slikama 4.26 i 4.27, punom linijom je prikazana zbirna granulometrijska kriva izdvojene grupe, koju čine četiri različite vrste materijala koje imaju armirajuću funkciju (podaci iz Tabele 4.5). Ova kriva je dobijena na osnovu zbirnog procenta suve mase zastupljenih vrsta materijala za odgovarajuću krupnoću. Može se reći da ona predstavlja razliku između zbirnih vrednosti izdvojenih vrsta materijala predstavljenih isprekidanom linijom. Tako na primer, veličina čestica većih od 10 mm za analizirani otpad sa deponije Ada Huja, predstavlja 26.6% ukupne mase materijala i sastoji se od 15.6 % plastike, 4.6 % papira, 1.2 % gume i 5.2% tekstila. Isti princip, primenjen je i za ostale grupe.



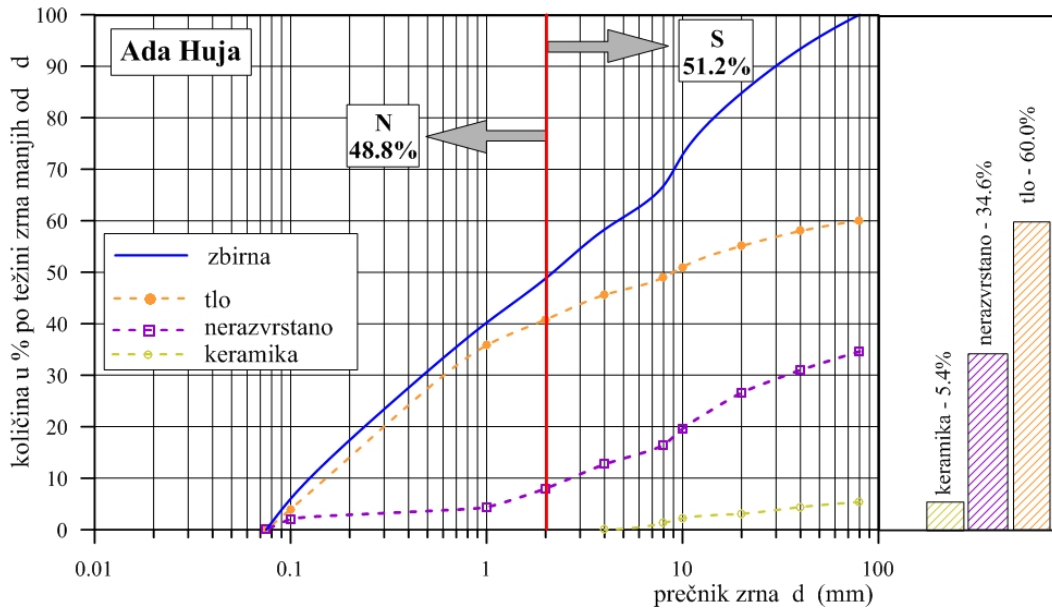
Slika 4.27. Zbirna granulometrijska kriva i krive zastupljenosti materijala (armirajuće komponente) - Novi Sad



Slika 4.28. Zbirna granulometrijska kriva i krive zastupljenosti materijala (nestišljive komponente) - Ada Huja

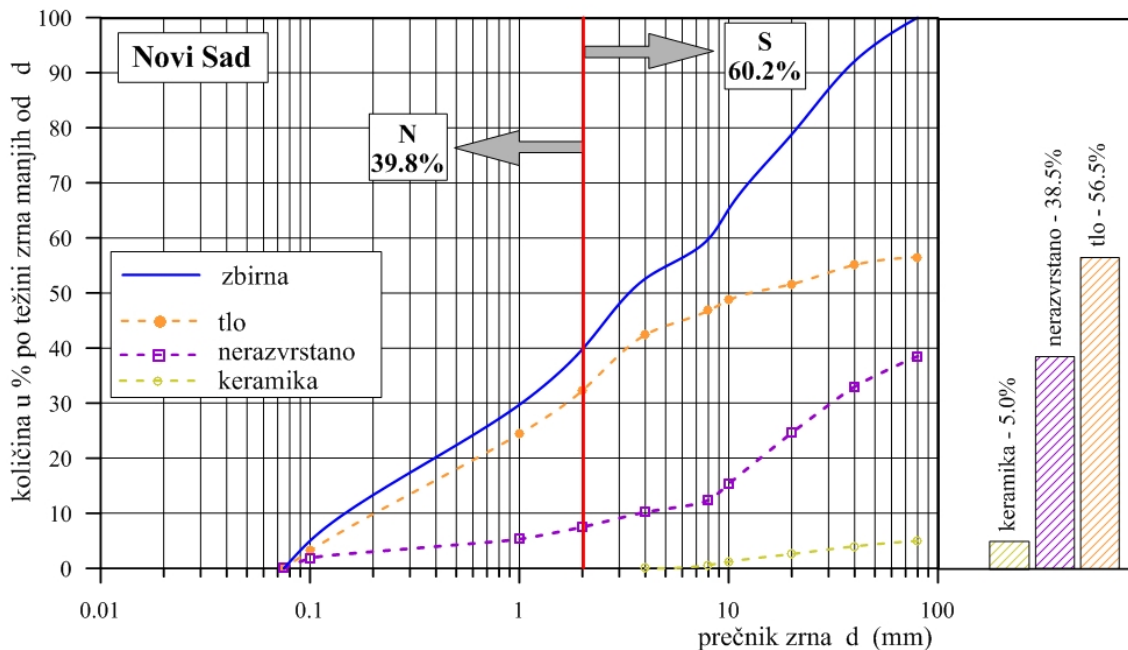


Slika 4.29. Zbirna granulometrijska kriva i krive zastupljenosti materijala (nestišljive komponente) - Novi Sad



Slika 4.30. Zbirna granulometrijska kriva i krive zastupljenosti materijala (stišljive komponente) - Ada Huja

Ovako sračunate vrednosti treba korigovati, u odnosu na ukupno maseno učešće izdvojenih grupa. Na osnovu ovih podataka i podataka iz Tabela 4.5 – 4.7, može se izvršiti klasifikacija otpada prema osnovnim mehaničkim karakteristikama (Tabele 4.8 i 4.9).



Slika 4.31. Zbirna granulometrijska kriva i krive zastupljenosti materijala (stišljive komponente) - Novi Sad

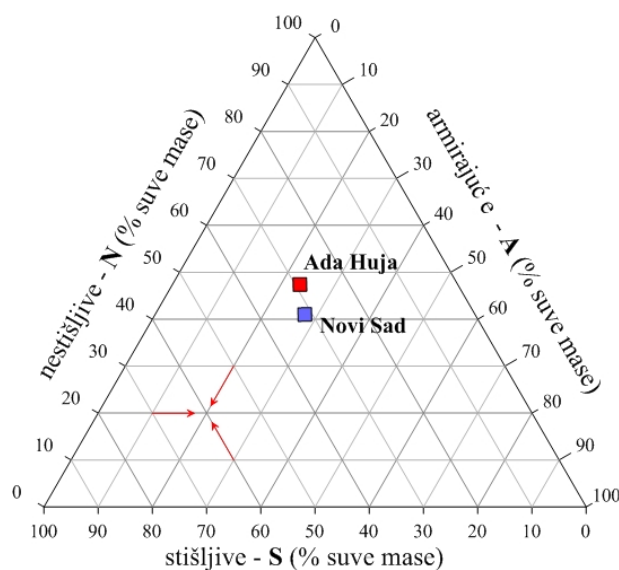
Tabela 4.8 Predložena klasifikacija otpada prema mehaničkim karakteristikama – Ada Huja

Ada Huja			
karakteristika	zastupljenost (%)	maseno učešće (%)	zbirno učešće (%)
armirajuće komponente – A	A = 73.4	9.09	6.7
	N = 26.6		2.4
nestišljivi materijali – N	N = 50.5	34.01	17.2
	A = 49.5		16.8
stišljivi materijali – S	S = 51.2	56.91	29.1
	N = 48.8		27.8
klasifikacija	A	N	S
Σ (%)	23.5	47.4	29.1

Tabela 4.9 Predložena klasifikacija otpada prema mehaničkim karakteristikama – Novi Sad

Novi Sad			
karakteristika	zastupljenost (%)	maseno učešće (%)	zbirno učešće (%)
armirajuće komponente – A	A = 85.4	10.0	8.5
	N = 14.6		1.5
nestišljivi materijali – N	N = 49.6	37.86	18.8
	A = 50.4		19.1
stišljivi materijali – S	S = 60.2	52.14	31.4
	N = 39.8		20.7
klasifikacija	A	N	S
Σ (%)	27.6	41.0	31.4

Podaci iz Tabela 4.8 i 4.9 poslužili su da se postupak klasifikacije komunalnog otpada, prikaže trouglim dijagramom (Slika 4.32).



Slika 4.32. Klasifikacija prema različitim vidovima mehaničkog ponašanja komunalnog otpada

Rezultati izvršene klasifikacije ukazuju na to da se otpad sa deponije Ada Huja i otpad sa deponije u Novom Sadu unekoliko razlikuju. Otpad sa deponije Ada Huja je svakako stariji, pa je otuda sadržaj stišljivih komponenti nešto manji. Takođe je manji i sadržaj armirajućih komponenti, što se opet može povezati sa starošću otpada.

U okviru predloženog sistema klasifikacije, nije analizirano pitanje procene bidegradacije tj. razgradnje pojedinih materijala. Međutim, treba naglasiti da je stanje komponenata otpada vremenski uslovljeno i može se posmatrati kroz tri faze odlaganja na deponiju: početno stanje (odgovara karakteristikama otpada koji se doprema do deponije), stanje nakon određenog vremena po odlaganju i stanje tokom dugotrajne razgradnje - degradacije. Zato, informacije o potencijalnoj razgradljivosti pojedinih materijala, mogu da posluže kod utvrđivanja eventualnog stanja komponenata u karakterističnim fazama odlaganja. One su naročito bitne za dugoročne uslove, kada dolazi do potpune razgradnje - degradacije otpada.

Uvodeći određene pretpostavke, koje će u nastavku teksta biti objašnjene, u Tabeli 4.10 je prikazan jedan okvirni predlog za definisanje stanja komponenata u odnosu na faze odlaganja. Ovaj predlog se bazira samo na potencijalnoj razgradljivosti komponenata otpada, i ne uvodi uticaj promene krupnoće-veličine i oblika čestica. On, u suštini, predstavlja izmenjeni predlog Langer-a (2005).

Tabela 4.10. Pretpostavke za definisanje stanja komponenata u odnosu na faze odlaganja

grupa	materijali	stanje		
		početno (p)	nakon odlaganja (o)	konačno - dugotrajna razgradnja (k)
I	papir-karton, meka i tvrda plastika	S_i	$S_o = 0.5S_i$	$S_k = 0$
		N_i	$N_o = N_i$	$N_k = N_o$
		A_i	$A_o = A_i + 0.5S_i$	$A_k = A_o + S_o$
II	metali, staklo, drvo, koža, tekstil	S_i	$S_o = 0.5S_i$	$S_k = 0$
		N_i	$N_o = N_i + 0.5S_i$	$N_k = N_o + S_o$
		A_i	$A_o = A_i$	$A_k = A_o$
III	organske materije	S_i	$S_o = 0.8S_i$	$S_k = 0$
		N_i	$N_o = N_i$	$N_k = N_o + 0.5(A_o + S_o)$
		A_i	$A_o = A_i + 0.2S_i$	$A_k = 0.5(A_o + S_o)$
IV	nerazvrstan - ostali otpad	S_i	$S_o = 0$	$S_k = 0$
		N_i	$N_o = N_i + S_i$	$N_k = N_o + 0.5(A_o + S_o)$
		A_i	$A_o = A_i$	$A_k = 0.5(A_o + S_o)$

S – stišljivi; N – nestišljivi; A – armirajući; (p) – početno; (o) – odložen; (k) - konačno

Iz Tabele 4.10 se vidi da su predložene vrednosti za stanje nakon odlaganja i za konačno stanje, bazirane na određenim pretpostavkama. Ove pretpostavke trebalo bi dokumentovati i detaljnije utvrditi analizama na samim deponijama u njihovim različitim stadijumima razgradnje, odnosno, različitim fazama (sortiranjem odloženog otpada sa različitim dubina deponije). S obzirom da su na Slici 4.10 prikazani podaci za karakteristične opštine u Srbiji i to za sveže generisani otpad (početno stanje), primenom postupka prikazanog u Tabeli 4.10, dobijeni su podaci koji su prikazani u Tabeli 4.11.

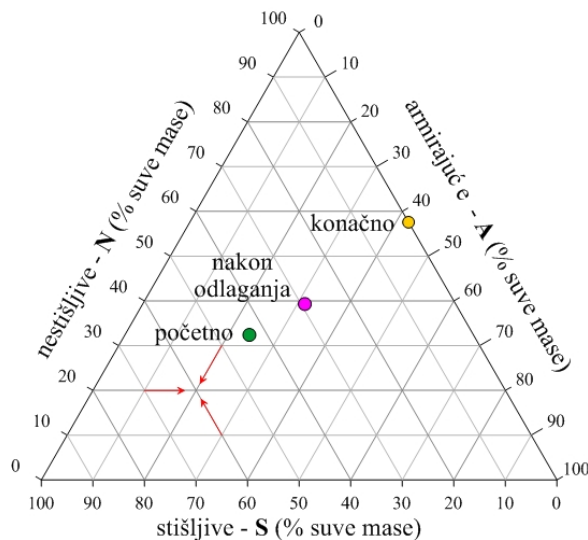
Tabela 4.11. Stanje komponentata u odnosu na faze odlaganja za otpad sa deponija u Srbiji

grupa	maseno učešće (%)	stanje		
		početno (p)	nakon odlaganja (o)	konačno - dugotrajna razgradnja (k)
I	PC3 + PL4 13.9+14.2	$S_i = 0$	$S_o = 0.5S_i = 0$	$S_k = 0$
		$N_i = 0.5 \times 13.9 = 6.95$	$N_o = N_i = 6.95$	$N_k = N_o = 6.95$
		$A_i = 14.2 + 0.5 \times 13.9 = 21.15$	$A_o = A_i + 0.5S_i = 21.15$	$A_k = A_o + S_o = 21.15$
II	G5+T6+M7 4.7+6.0+1.7	$S_i = 0$	$S_o = 0.5S_i = 0$	$S_k = 0$
		$N_i = 4.7 + 1.7 + 0.5 \times 6 = 9.4$	$N_o = N_i + 0.5S_i = 9.4$	$N_k = N_o + S_o = 9.4$
		$A_i = 0.5 \times 6 = 3.0$	$A_o = A_i = 3.0$	$A_k = A_o = 3.0$
III	OR1 45.7	$S_i = 0.8 \times 45.7 = 36.56$	$S_o = 0.8S_i = 29.25$	$S_k = 0$
		$N_i = 0.2 \times 45.7 = 9.14$	$N_o = N_i = 9.14$	$N_k = N_o + 0.5(A_o + S_o) = 27.42$
		$A_i = 0$	$A_o = A_i + 0.2S_i = 7.31$	$A_k = 0.5(A_o + S_o) = 18.28$
IV	U11+F12 4.2+9.6	$S_i = 0.5 \times 4.2 + 0.5 \times 9.6 = 6.9$	$S_o = 0$	$S_k = 0$
		$N_i = 0.5 \times 4.2 + 0.5 \times 9.6 = 6.9$	$N_o = N_i + S_i = 13.8$	$N_k = N_o + 0.5(A_o + S_o) = 13.8$
		$A_i = 0$	$A_o = A_i = 0$	$A_k = 0.5(A_o + S_o) = 0$
$S_{i,o,k} (\%)$		43.46	29.25	0
$N_{i,o,k} (\%)$		32.39	39.29	57.57
$A_{i,o,k} (\%)$		24.15	31.46	42.43

Pretpostavka koju sam ovde usvojio, a koja ranije nije definisana, odnosi se na organski otpad. Naime, usvojio sam da 80% organskog otpada u početnoj fazi čine stišljivi materijali, dok je preostalih 20% svrstano u grupu nestišljivih. Ostala grupisanja urađena su prema mehaničkim karakteristikama na osnovu podataka prikazanih u Tabeli 4.4 odnosno, trouglog dijagrama koji je prikazan na Slici 4.25. Podaci iz Tabela 4.11 su prikazani i trouglim dijagramom (Slika 4.33).

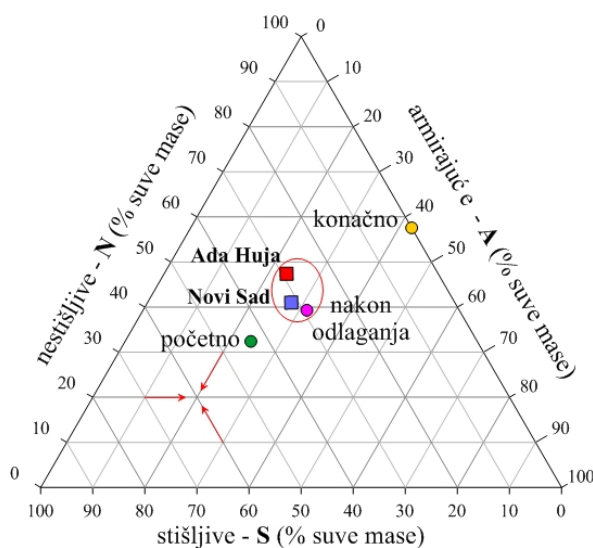
Razlike, na početku i nakon odlaganja, su očigledne, ali se može videti i opšti trend. U početku otpad ispoljava veliku stišljivost (preko 40% stišljivih komponentata). Količina

armirajućih komponenti vremenom raste i najveća je u završnoj fazi, u kojoj više nema stišljivih komponenti. U konačnoj fazi, stanje svih stišljivih komponenata je promenjeno u armirajuće ili u nestišljive. Prema tome, opšti trend pokazuje smanjenje stišljivih i porast nestišljivih i armirajućih komponenata u nekoj fazi nakon odlaganja otpada, sve do konačnog stanja u kojem više nema stišljivih komponenti.



Slika 4.33. Klasifikacija prema različitim vidovima mehaničkog ponašanja komunalnog otpada u odnosu na faze odlaganja

Na osnovu prikazanih trouglatih dijagrama (Slike 4.32 i 4.33), za analizirani otpad sa deponija na Ada Huji i u Novom Sadu, može se reći da se nalazi u fazi nakon odlaganja i to je predstavljeno trouglatim dijagramom na Slici 4.34.



Slika 4.34. Klasifikacija prema različitim vidovima mehaničkog ponašanja analiziranog komunalnog otpada u odnosu na faze odlaganja

4.4. ZAKLJUČAK

Zbog složenog i raznovrsnog sastava komunalnog otpada, teško je generalizovati njegove fizičko-mehaničke osobine u deponiji, i dobiti neku zajedničku osnovu za njihovo kasnije poređenje. Zato podaci o sastavu, obliku i veličini čestica u deponiji, mogu biti od velike koristi i oni se mogu upotrebiti pri geotehničkoj klasifikaciji komunalnog otpada. S tim što se, pri formiranju geotehničke klasifikacije komunalnog otpada uglavnom polazi od postojećih klasifikacija tla. Pored toga, u obzir se uzimaju i neke od posebnih osobina pojedinačnih komponenata otpada, koje su bitno različite od ponašanja tla. Najčešće su to fizičke osobine otpada, ali i ključni faktori koji utiču na njegovo mehaničko ponašanje tj. različite vidove mehaničkog ponašanja, kao što su sadržaj stišljivih i nestišljivih čestica i čestica koje imaju armirajuću funkciju u otpadu. To je vrlo važno kod dugoročne analize ponašanja deponija, kada se u određenoj fazi daju predlozi i rešenja za zatvaranje i kasnije njihovo eventualno korišćenje.

U okviru ovog poglavlja, prikazana je jedna nova geotehnička klasifikacija komunalnog otpada, bazirana na određenim preporukama iz literature, ali i na praktičnim rezultatima ispitivanja za potrebe istraživanja u ovoj disertaciji. Klasifikacija podrazumeva nekoliko faza. Prethodno je izvršena analiza sastava otpada, koja je pokazala da otpad u Srbiji, po sastavu, uglavnom odgovara otpadu u svetu. Nakon definisanja sastava, izvršeno je sortiranje za koje je iskorišćen kompletan materijal iz dve bušotine sa deponije na Ada Huji i odabrani uzorci iz bušotina i jedne istražne jame sa deponije u Novom Sadu. Razvrstavanjem je izdvojeno deset karakterističnih grupa zastupljenih materijala i to: drvo, papir i karton, plastika, staklo, tekstil, metal, guma, keramika, zemljasti-inertni materijal a u posebnoj grupi se nalazi nerazvrstani materijal. Razvrstani materijal je vizuelnim pregledom prvo grupisan po obliku čestica, a nakon toga, predložen je dominantni uticaj izdvojenih materijala u odnosu na tri najbitnije mehaničke karakteristike (stišljive, nestišljive i materijale sa armirajućom funkcijom) i to u vidu trouglog dijagrama. S obzirom da oblik čestica ne uzima u obzir i njihovu krupnoću, predloženo je da se ovaj uticaj definiše na osnovu granulometrijskog sastava, i tu su usvojena dva kriterijuma. U vezi sa tim, analizirane su zbirne krive granulometrijskog sastava izdvojenih grupa, dobijene na osnovu kriva učestalosti svih materijala koji

karakterišu izdvojenu grupu. Dobijene vrednosti su korigovane u odnosu na ukupno maseno učešće. Na osnovu sračunatih vrednosti, izvršena je geotehnička klasifikacija prema osnovnim mehaničkim karakteristikama i ona je prikazana trouglim dijagramom.

Rezultati klasifikacije su pokazali da se otpad iz deponije na Ada Huji i deponije u Novom Sadu unekoliko razlikuju. Sadržaj armirajućih frakcija, veći je na deponiji u Novom Sadu za oko 4 % (Novi Sad – 27.6%; Ada Huja – 23.5%). Takođe je i sadržaj stišljivih komponenti neznatno veći za oko 2 % (Novi Sad – 31.4%; Ada Huja – 29.1%). Ovi podaci, kao i podaci o sadržaju nestišljivih komponenti, koje su u zatvorenoj deponiji na Ada Huji veći za 6.4% (Novi Sad – 41.0%; Ada Huja – 47.4%), potvrđuju da je otpad sa deponije Ada Huja stariji.

Kako je stanje komponentata otpada vremenski uslovljeno, uvodeći određene pretpostavke, dat je i predlog klasifikacije otpada prema mehaničkim karakteristikama, ali na osnovu razgradljivosti izdvojenih komponentata otpada. U vezi sa tim, izdvojene su tri osnovne faze njegovog odlaganja na deponiju: početno stanje, stanje nakon određenog vremena i konačno stanje nakon završetka razgradnje.

Ova klasifikacija izvršena je na osnovu postojećih podataka o sastavu sveže generisanog otpada u Srbiji. Uočene su određene razlike ali i opšti trend koji ukazuje da sveži otpad ispoljava veću stišljivost (sadrži oko 45% stišljivih komponentata), koja opada sa starošću otpada - sve do konačnog stanja u kojem više nema stišljivih komponenti. Sadržaj armirajućih i nestišljivih komponenti vremenom raste i najveći je u završnoj fazi, u kojoj više nema stišljivih komponenti (oko 42% armirajućih i 58% nestišljivih komponentata).

Na kraju ovog poglavlja bi trebalo reći da je predlaganje jednog univerzalnog sistema geotehničke klasifikacije komunalnog otpada, veliki izazov za inženjere geotehnike koji se bave zaštitom životne sredine i određivanjem geotehničkih osobina komunalnog otpada.

POGLAVLJE 5

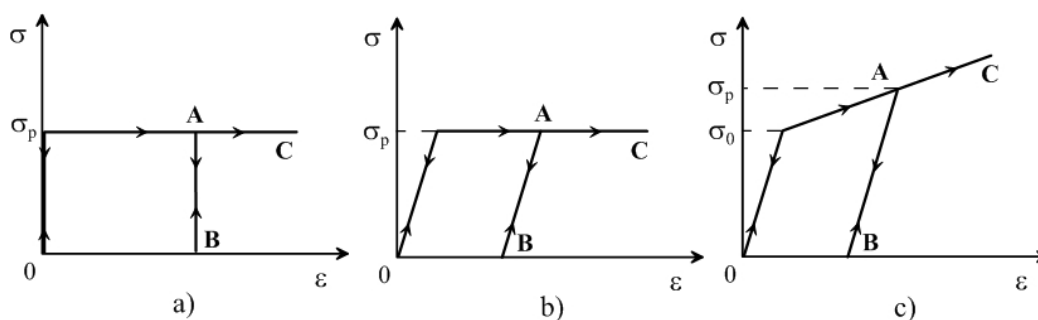
NAPONSKO-DEFORMACIJSKE KARAKTERISTIKE KOMUNALNOG OTPADA

Naponsko-deformacijsko ponašanje tla, pa i komunalnog otpada je nelinearno i vrlo složeno. Ono se može izraziti analitički, preko konstitutivnih modela, koji sa manje ili više uspeha, opisuju njihovo ponašanje u različitim naponsko-deformacijskim uslovima. Konstitutivni modeli međutim, obuhvataju samo određena svojstva, koja su po mišljenju njihovih autora, bitna za mehaničko ponašanje odgovarajućih sredina (S. Ćorić, 1987). Razvoj računarske tehnologije, omogućio je primenu kompleksnih konstitutivnih modela, koji zahtevaju veći broj ulaznih parametara, od kojih se neki ne mogu dobiti iz standardnih laboratorijskih ili terenskih opita, već se jednostavno pretpostavljaju. Pored toga, vrše se i određene idealizacije pa i pretpostavke, kako bi se sa jedne strane dobio što jednostavniji model za praktičnu primenu, a sa druge strane dobila i dobra saglasnost između matematički opisanog modela i opitom dobijenog naponsko-deformacijskog ponašanja.

U poslednjih dvadesetak godina, konstitutivni modeli se sve češće koriste kako bi se u analitičkom obliku opisalo i ponašanje komunalnog otpada. Za razliku od tla, gde je teško nabrojati sve konstitutivne modele i broj parametara koji oni sadrže, kod komunalnog otpada je broj predloženih modela znatno manji. Međutim, kao i kod tla, za sada ne postoji univerzalni konstitutivni model za komunalni otpad, pa se može reći da ova tema ostavlja još mnogo prostora za buduća istraživanja.

5.1. OPŠTE O MODELIMA TLA

Na mehaničko ponašanje tla utiču brojni činioci kao što su: zapreminska težina, poroznost, vlažnost, uslovi dreniranja, prethodna istorija opterećenja, uslovi napreznja i dr., i praktično se ne mogu svi uključiti u neki prihvatljiv analitički model realnog tla. Iz tih razloga, velika se pažnja posvećuje izradi analitičkih modela, koji u suštini predstavljaju pokušaj da se određene pojave i procesi, izazvani promenom naponskih stanja u tlu, prikažu na način koji će predvideti njegovo ponašanje. Zato se vrše određene idealizacije, koje uključuju samo određena svojstva tla, koja su po mišljenju njihovih autora najbitnija. Na taj način dobijaju se matematički jednostavniji konstitutivni modeli koji su pogodni za praktičnu primenu (Slika 5.1). Pri tome se najčešće ne uzima u obzir vremenski faktor, iako i on ima određeni uticaj na izbor parametara za geotehničke proračune, što je od posebnog interesa kada je u pitanju komunalni otpad.

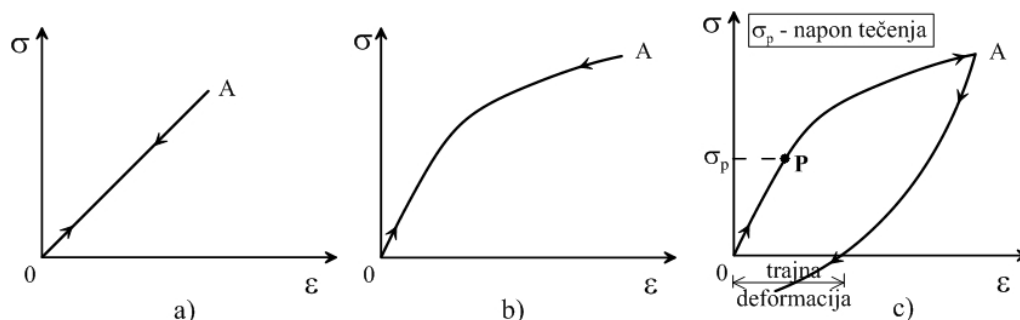


Slika 5.1. Uobičajene idealizacije naponsko-deformacijskog ponašanja u mehanici tla:
a) krto idealno plastična; b) elastično idealno plastična; c) elastična sa deformacijskim ojačanjem (Bardet, 1997)

Analogno klasičnoj mehanici, i u mehanici tla, razlikuju se dva odvojena stanja ponašanja pod opterećenjem:

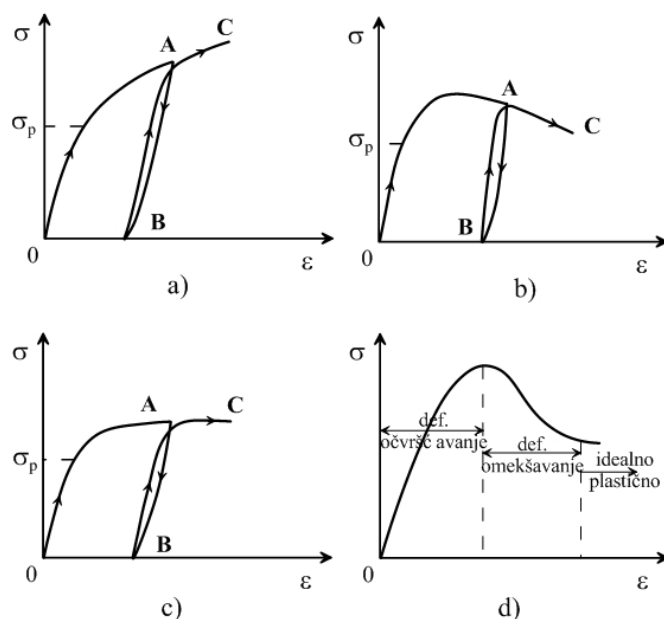
- stanje malih deformacija (izučava se pomoću teorije elastičnosti) i
- stanje velikih deformacija (izučava se metodom graničnog stanja plastične ravnoteže).

Najjednostavniji prikaz, predstavlja prava linija u pravouglom koordinatnom sistemu napon – deformacija i to je najjednostavniji linearno elastični model ponašanja (Slika 5.2).



Slika 5.2. Idealizovani tipovi naponsko-deformacijskog ponašanja a) linearno elastičan; b) nelinearno elastičan; c) elasto-plastičan

Elastični model je zbog svoje jednostavnosti pogodan kod određivanja konstitutivnih naponsko-deformacijskih veza. Međutim, na osnovu rezultata laboratorijskih ispitivanja, ponašanje tla se može tačnije prikazati pomoću elasto-plastičnih modela, koji daju realniju sliku o deformacijama koje nastaju pre konačnog - plastičnog loma. Tipični oblici elasto-plastičnih modela, prikazani su na Slici 5.3.



Slika 5.3. Tipični oblici elasto-plastičnog ponašanja tla pri smicanju: a) deformacijsko očvršćavanje; b) deformacijsko omekšavanje; c) savršeno plastično; d) kombinacija prethodno opisanih ponašanja tla (Bardet, 1997)

5.1.1. Elastični modeli

Teorija elastičnosti ima dugu tradiciju primene kod rešavanja geotehničkih problema, a iz elastičnih modela moguće je definisati sve elastične parametre tla (modul elastičnosti - E , modul zapreminske deformacije - K , modul smicanja - G , Modul stišljivosti M_v i

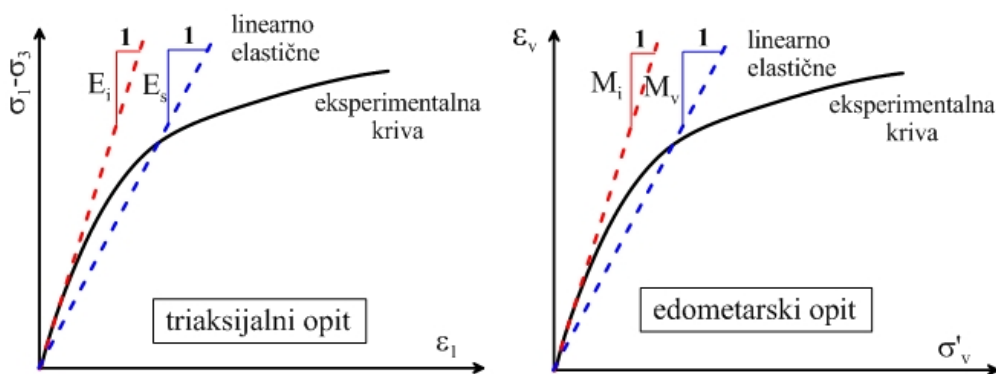
Poasonov koeficijent - ν). U nastavku teksta, opisaću linearno elastični model i nelinearni hiperbolički model Duncan & Chang (1970).

Linearno elastični model

Ovo je jedan od najjednostavnijih modela tla i najčešće se koristi u proračunima sleganja, jer odgovara pretpostavci da se tlo pri malim deformacijama ponaša linearno-elastično. Proistekao je iz Hooke-ovog zakona, a sadrži dva parametra materijala koji se mogu dobiti iz jednoaksijalnog opita: modul elastičnosti E i Poissonov koeficijent ν . Za potpuni opis materijala, dovoljna su ova dva parametra. Kada bi tlo bilo elastično i izotropno, ove konstante bi se mogle upotrebiti i za opisivanje veza napona i deformacija u opitima druge vrste ili u rešavanju praktičnih problema naponsko-deformacijske analize. Kada je u pitanju tlo, pa i komunalni otpad, ovako jednostavan pristup nije moguć. Zbog toga se u svakodnevnoj geotehničkoj praksi, za određivanje naponsko-deformacionog ponašanja, koristi nekoliko opita u kojima se uzorci izlažu kontrolisanim priraštajima napona uz definisanje takvih graničnih uslova da tumačenje eksperimentalnih rezultata bude relativno jednostavno. U ovom modelu, konstante su modul elastičnosti (E) i Poissonov koeficijent (ν).

Modul elastičnosti (E) se koristi kao osnovni parameter kod elastičnog modela ponašanja tla. Vrednosti parametra, koje se usvajaju, treba posebno analizirati. Naime, pokazalo se da pretpostavka o linearnom ponašanju tla pri malim deformacijama često nije ispravna, jer materijali pokazuju nelinearno ponašanje već na samom početku opterećenja. U osnovi postoje dve vrste nelinearnosti: materijalna i geometrijska. Materijalna (fizička) nelinearnost proizilazi iz nelinearnosti veze između napona i deformacija, dok geometrijska nelinearnost obuhvata nelinearne veze između deformacija i pomeranja, kao i konačne promene u geometriji deformisanog tela. Uobičajeno je da se početni nagib deformacione krive obeležava kao E_i (inicijalni modul), a vrednost sekantnog modula za određenu veličinu deformacije obeležava kao E_s (Slika 5.4).

Ovi moduli kod tla imaju tendenciju da rastu sa povećanjem izotropnog napona, a poznato je da sa povećanjem devijatora, njihova vrednost opada.



Slika 5.4. Definicije inicijalnih i tangenčnih modula za standardne laboratorijske opite

Poisson-ov koeficijent (ν) po definiciji predstavlja odnos horizontalne i vertikalne deformacije:

$$\nu = - \frac{\epsilon_{\text{hor.}}}{\epsilon_{\text{ver.}}} \quad (5.1)$$

Ovaj odnos kod tla nije ni približno jednoznačan, kao na primer kod čelika ili betona. Prilikom analize Poissonovog koeficijenta, uvek treba imati na umu da se u tlu neuporedivo više deformišu pore (međusobnim pomeranjem: klizanjem i kotrljanjem čestica), dok čvrste čestice, prema osnovnoj pretpostavci, ne menjaju svoj oblik u domenu razmatranih napona. Poissonov koeficijent može da se odrediti iz dreniranog triaksijalnog opita, za svaki odabrani nivo napona, odnosno inkrement devijatora napona $\Delta\sigma$, prema izrazu:

$$\nu = \frac{\Delta\epsilon_{\text{vert}} - \Delta\epsilon_{\text{zap}}}{2\Delta\epsilon_{\text{vert}}} \quad (5.2)$$

gde je: $\Delta\epsilon_{\text{vert}}$ – vertikalna, osna deformacija

$\Delta\epsilon_{\text{zap}}$ - zapreminska deformacija

Obe ove vrednosti deformacija mogu se izmeriti tokom smicanja u triaksijalnom opitu, prilikom ispitivanja uzoraka tla. Može se primetiti da standardni drenirani triaksijalni opiti mogu da daju značajniji koeficijent smanjenja zapremine, na samom početku osnog opterećenja, pa se zbog toga dobija mala početna vrednost Poisson-ovog koeficijenta. Ova vrednost može biti realna kada se analiziraju slučajevi vezani za

rasterećenje, međutim, kada se koristi Mohr-Coulomb-ov model tla, preporučuje se upotreba većih vrednosti Poissonovog koeficijenta.

Duncan - Chang model

Nelinearni modeli se baziraju na funkcionalnim zavisnostima koje su proistekle iz jedne ili više naponsko-deformacijskih krivih. Najčešće su u upotrebi hiberbolički modeli (Kondner, 1963; Duncan & Chang, 1970; Desai & Siriwardane, 1984; Fahey & Carter, 1993). Duncan & Chang (1970) su predložili nelinearni model tla za određivanje deformacija nasipa i brana. Naponsko - deformacijska kriva predstavljena je hiperbolom, koja povezuje devijator napona ($\sigma_1 - \sigma_3$) i aksijalnu deformaciju ε_1 prema izrazu (Kondner, 1963; Kondner i dr., 1963):

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_1}{a + b \cdot \varepsilon_1} \quad (5.3)$$

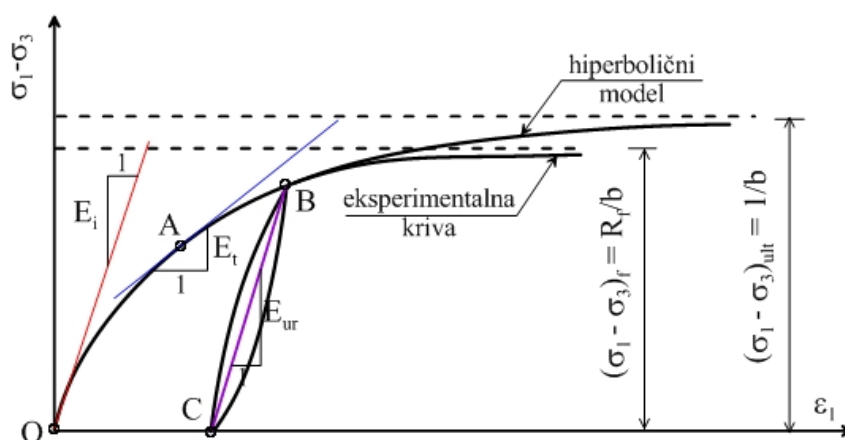
pri čemu su:

σ_1 i σ_3 - veći i manji glavni napon

ε_1 – aksijalna deformacija

„ a ” i „ b ” - konstante materijala čije se vrednosti određuju eksperimentalno

Konstanta „ a ” predstavlja recipročnu vrednost inicijalnog tangentnog modula E_i , a konstanta „ b ” recipročnu vrednost razlike napona za beskonačnu deformaciju (Slika 5.5). U zavisnosti od stanja napona i deformacija, mogu se odrediti tri modula i to: inicijalni modul E_i , tangentni modul E_t i modul iz krive opterećenje - rasterećenje E_{ur} .



Slika 5.5. Nelinearna naponsko-deformacijska zavisnost – Kondnerov hiperbolički model

Postoji nekoliko varijanti hiperboličnog modela tla, a svi pomenuti parametri mogu se dobiti iz triaksijalnog opita. Izbor modela uključuje:

- promenljivu vrednost modula elastičnosti, uz konstantnu vrednost Poissonovog koeficijenta
- promenljive vrednosti modula elastičnosti i Poissonovog koeficijenta
- promenljivu vrednost modula elastičnosti uz konstantnu vrednost modula zapreminske deformacije

Inicijalni tangentni modul E_i - veza između inicijalnog modula (E_i) i manjeg glavnog napona (σ_3), može se prema Janbu (1963) izraziti u sledećem obliku

$$E_i = K_L \cdot p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad (5.4)$$

gde je:

E_i - inicijalni tangentni modul

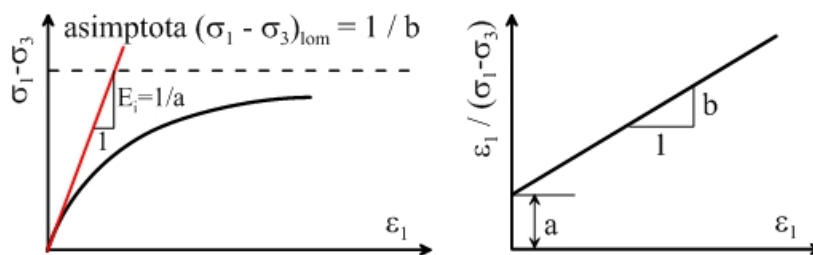
K_L - “modulski broj” (koeficijent modula primarnog opterećenja)

p_a - atmosferski pritisak ($p_a = 100$ kPa - koristi se kao referentni parameter, a izražava se u istim jedinicama kao σ_3)

σ_3 - manji glavni napon

n - eksponent kojim se određuje uticaj bočnog pritiska na inicijalni tangentni modul

Pri tome su n i K_L konstante koje se dobijaju iz rezultata triaksijalnih opita. Rezultati triaksijalnog opita se prikazuju kao odnos $\sigma_3 - E_i$ u vidu logaritamskog dijagrama, sa kojeg se određuju konstante n i K_L . Na Slici 5.6, prikazan je način određivanja početnog tangentnog modula koji je potreban za određivanje konstanti n i K_L .



Slika 5.6. Hiperbolička naponsko-deformacijska kriva sa parametrima transformisane hiperbole

Tangentni modul E_t – Od tačke O do tačke A (Slika 5.5), definiše se tangentni modul u Duncan-Chang modelu, preko funkcije $(\sigma_1 - \sigma_3)$. Kada je vrednost manjeg glavnog napona konstantna, onda je od posebnog značaja njegovo određivanje, a može se dobiti diferenciranjem:

$$E_t = \frac{d(\sigma_1 - \sigma_3)}{d\varepsilon_1} = \frac{\frac{1}{E_i}}{\left[\frac{1}{E_i} + \frac{R_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \cdot \varepsilon_1 \right]^2} \quad (5.5)$$

Usvajanjem Kulon-Morovog (Coulomb-Mohr) uslova loma, dobija se:

$$E_t = \left[1 - \frac{R_f \cdot (1 - \sin \varphi) \cdot (\sigma_1 - \sigma_3)}{2 \cdot c \cdot \cos \varphi + 2 \cdot \sigma_3 \cdot \sin \varphi} \right]^2 \cdot K_L \cdot p_a \cdot \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad (5.6)$$

gde su:

φ - ugao unutrašnjeg trenja

c - kohezija

Modul opterećenje - rasterećenje E_{ur} - Kada se tlo rastereti od tačke B do tačke C (Slika 5.5) za nelinearni model se koristi modul opterećenje - rasterećenje E_{ur} . Oblik jednačine sličan je kao za inicijalni modul E_i i izražava se u funkciji manjeg glavnog napona σ_3 , na sledeći način:

$$E_{ur} = K_{ur} \cdot p_a \cdot \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^{n_{ur}} \quad (5.7)$$

Ovde je modulski broj opterećenja K_L , zamenjen modulskim brojem opterećenje-rasterećenje K_{ur} , koji je uvek veći od K_L . Vrednost koeficijenta n_{ur} je skoro uvek ista kao i koeficijenta n , pa se gotovo uvek u jednačini 5.7 umesto n_{ur} piše samo n .

Kod nelinearnog elastičnog modela *Poissonov koeficijent* može da se definiše kao konstanta (jednačina 5.1) ili može da se izračuna preko modula kompresije, koji zavisi od manjeg glavnog napona i izražava se kao:

$$B_m = K_m \cdot p_a \cdot \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^m \quad (5.8)$$

gde je:

B_m - modul kompresije

K_m - modulski broj

m - eksponent modula kompresije

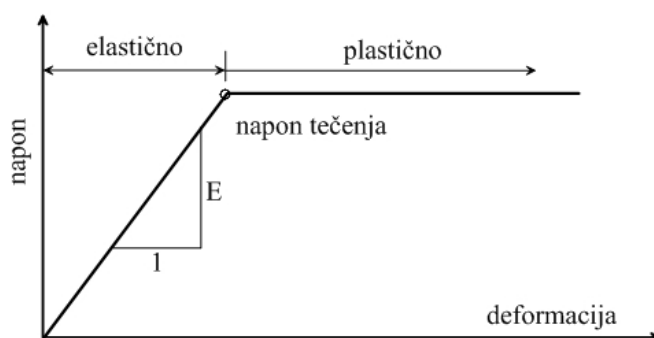
Veza između modula kompresije i Poissonovog koeficijenta, može se odrediti iz teorije elastičnosti i to:

$$\nu = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{E_t}{3 \cdot B_m} \right) \quad (5.9)$$

5.1.2. Elasto-plastični modeli

Pomoću ovih modela najuspešnije se prikazuje ponašanje realnog tla. U ovu grupu modela spadaju: idealno elastični – idealno plastični model; Cam-Clay i modifikovani Cam-Clay model; deformacijsko – omeđavajući model. U nastavku teksta će se dati samo kraći osvrt na pomenute modele.

Idealno elastični – idealno plastični model. Karakteristična naponsko-deformacijska kriva linearno elastičnog – idealno plastičnog modela, prikazana je na Slici 5.7. Kao što se vidi naponi su proporcionalni deformacijama sve dok se ne dostigne tačka tečenja, a nakon toga naponsko-deformacijska zavisnost je horizontalna (konačan priraštaj napona proizvodi beskonačnu deformaciju).



Slika 5.7. Idealno elastični - idealno plastični model

Teorija elasto-plastičnosti, koja opisuje ponašanje materijala sa Slike 5.7, sastoji se od sledećih elemenata:

- relativnih deformacija (sadrži elastičnu – ε_e i plastičnu komponentu - ε_p)

$$d\varepsilon = d\varepsilon_e + d\varepsilon_p \quad (5.10)$$

- funkcije tečenja (ako je $f < 0$, funkcija opisuje elastično svojstvo a kada je $f = 0$ opisuje zakon čvrstoće ili plastičnosti

$$f = f(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}) \quad (5.11)$$

- funkcije plastičnog potencijala (smer inkrementa plastične deformacije određen je zakonom tečenja)

$$g = g(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}) \quad (5.12)$$

$$d\varepsilon_p = \lambda \cdot \left\{ \frac{dg}{d\sigma} \right\} \quad (5.13)$$

gde su:

g – funkcija plastičnog potencijala

λ – plastični skalarni faktor (λ uvek mora biti pozitivno, a dobija se iz uslova da je funkcija popuštanja konstantna pri lomu)

Cam-Clay i modifikovani Cam-Clay model - Ovi modeli spadaju u grupu elastoplastičnih modela sa očvršćavanjem (Britto & Gunn, 1987; Atkinson, 1993). Oni zadovoljavaju kriterijume i pravila plastičnosti, pa se uz izbor odgovarajućih parametara upotrebljavaju za opis ponašanja različitih vrsta tla, iako su razvijeni po teoriji koja važi za normalno konsolidovane i slabo prekonsolidovane gline.

Originalni Cam-Clay model definiše:

- ravan tečenja koja se izražava jednačinom

$$q = M \cdot p' \cdot \ln \frac{p'_x}{p'} \quad (5.14)$$

- tečenje

$$p' \cdot d\varepsilon_v^p + q \cdot d\varepsilon^p = M \cdot p' \cdot d\varepsilon^p \quad (5.15)$$

- očvršćavanje određeno parametrom p'_x koji ujedno definiše i ravan tečenja

$$p'_x = \exp\left(\frac{\Gamma - v - \kappa \ln p'}{\lambda - \kappa}\right) \quad (5.16)$$

pri čemu je:

$q = (\sigma'_1 - \sigma'_3)$ - devijator napona u konvencionalnom triaksijalnom opitu

$p' = \frac{\sigma'_1 + 2\sigma'_3}{3}$ - srednji efektivni napon u konvencionalnom triaksijalnom opitu

$d\varepsilon_v^p$ - inkrement zapreminske plastične deformacije

$d\varepsilon^p$ - inkrement smičuće plastične deformacije

M - konstanta materijala kojom se definiše linija kritičnog stanja koja je prikazana u p' - q koordinatama

λ - nagib linije normalne konsolidacije

κ - nagib linije prekonsolidacije

v - specifična zapremina

Γ - specifična zapremina tla na liniji kritičnog stanja pri $p' = 1$ kPa, odnosno $\ln p' = 0$ (odgovara vrednostima N na Slici 5.11) .

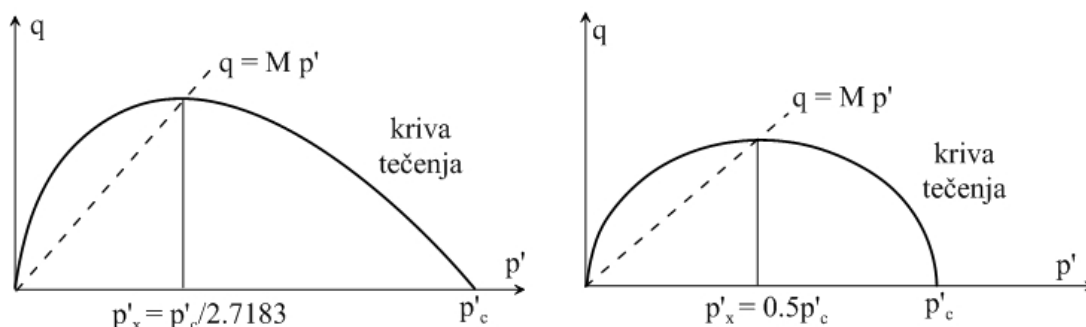
Vrednost konstante M zavisi od ugla unutrašnjeg trenja prema izrazu:

$$M = \frac{6 \cdot \sin \varphi'}{3 - \sin \varphi'} \quad (5.17)$$

Površina graničnog stanja definisana je izrazom:

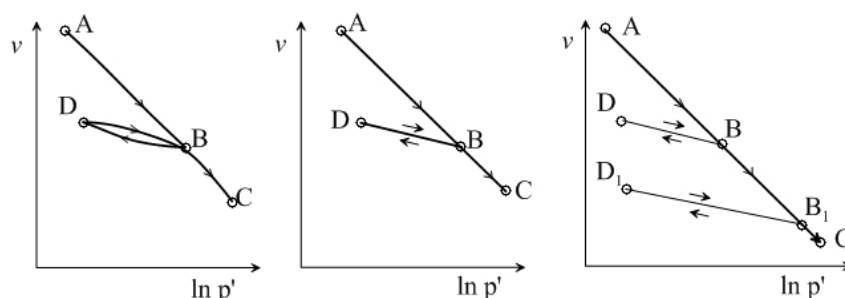
$$v = \Gamma + \lambda - \kappa - \lambda \cdot \ln p' - \frac{(\lambda - \kappa) \cdot q}{M \cdot p'} \quad (5.18)$$

Osnovna razlika između originalnog i modifikovanog Cam-Clay modela (Slika. 5.8) je u obliku krive tečenja, s obzirom da je kod originalnog Cam-Clay modela ona definisana elipsastom krivom tečenja dok je kod modifikovanog modela definisana kružnom linijom.



Slika 5.8. Cam-Clay model i modifikovani Cam-Clay model

U nastavku teksta će se dati obrazloženje postupka na primeru izotropne kompresije, odnosno, edometarskog opita, iz kojih se dobijaju potrebni podaci za formiranje Cam-Clay modela. Rezultati izotropne kompresije, mogu se prikazati odnosom efektivnih napona p' i promenom zapremine v , pri čemu je $v = 1 + e$ (Slika 5.9).



Slika 5.9. Idealizovani prikaz izotropne kompresije

U cilju dobijanja što jednostavnijeg modela ponašanja, vrši se idealizacija pravim linijama uz zanemarivanje histerезisne petlje, koja nastaje pri rasterećenju i ponovnom opterećenju. Linija AC predstavlja liniju normalne konsolidacije (λ - linija) a linija BD liniju prekonsolidacije (linija bubrenja ili rekompresije, odnosno κ - linija). Podrazumeva se da su moguća stanja napona, samo na liniji AC i ispod nje, dok su stanja iznad ove linije, fizički nemoguća.

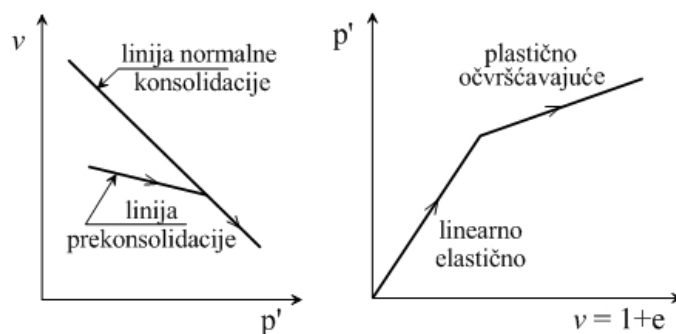
Na Slici 5.10, prikazano je kako se ove krive koriste za dobijanje podataka koji su neophodni za formiranje Cam-Clay modela. Slika 5.10b je u suštini dobijena okretanjem koordinatnih osa, tako da pravac prekonsolidacije i pravac normalne konsolidacije prikazuju svojstva elastično-plastično-očvršćavajuće krive naponsko-deformacijskih odnosa. Pravac prekonsolidacije odgovara linearno elastičnom delu, a pravac normalne konsolidacije plastično - očvršćavajućem delu.

U slučaju izotropne kompresije, jednačina linije normalne konsolidacije je

$$v = N - \lambda \ln p' \quad (5.19)$$

Položaj niza mogućih κ - linija nije jedinstven, jer zavisi od veličine maksimalnog prethodnog napona p'_m , a može se napisati u sledećem obliku

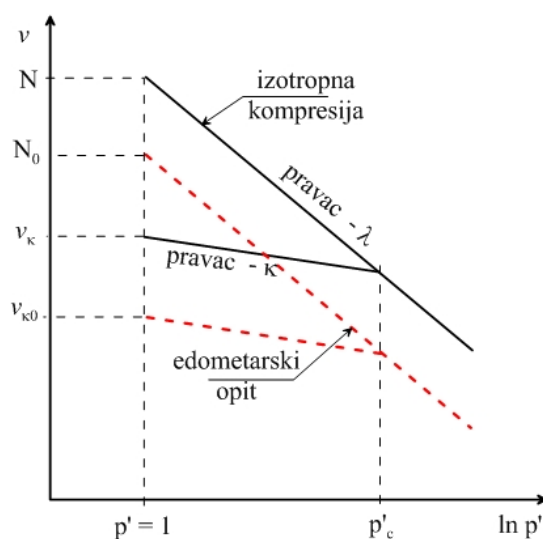
$$v = v_{\kappa} - \kappa \ln p' \quad (5.20)$$



Slika 5.10. Odnos konsolidacije i naprezanja

U edometarskom opitu, poznat je samo vertikalni napon $\sigma'_v = \sigma'_l$, dok se veličina horizontalnih napona može proceniti na osnovu koeficijenta pritiska tla u stanju mirovanja (K_0). Ispitivanja su pokazala da su nagibi λ i κ linija, isti kao i u opitima izotropne kompresije (Slika 5.11). Jednačina pravca normalne konsolidacije u edometarskim uslovima je

$$v = N_0 - \lambda \ln p' \quad (5.21)$$



Slika 5.11. Promene zapremine kod izotropne kompresije u edometarskom opitu

I u ovom slučaju položaj κ linija nije jedinstven i takođe zavisi od maksimalnog prethodnog napona, pa se može napisati u obliku

$$v = v_{\kappa 0} - \kappa \ln p' \quad (5.22)$$

Parametri prikazani na Slici 5.11 i u prethodnim jednačinama imaju sledeće značenje:

v - specifična zapremina definisana preko koeficijenta poroznosti e , $v = 1 + e$

N, N_0 - specifična zapremina normalno konsolidovanog tla pri veličini $p' = 1$ kPa

$v_{\kappa}, v_{\kappa 0}$ - specifična zapremina prekonsolidovanog uzorka za $p' = 1$ kPa

λ - nagib pravca koji predstavlja odnos specifične zapremine v i prirodnog logaritma srednjeg efektivnog napona $\ln p'$

κ - nagib pravca koji predstavlja odnos v i $\ln p'$ u elastičnom području

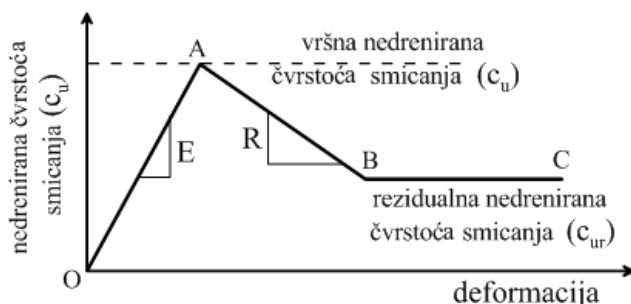
Sve ove veličine se određuju eksperimentalno i mogu se smatrati konstantama za određenu vrstu tla.

Deformacijsko – omekšavajući model - Ovaj model je elastično - omekšavajući - plastični i sastoji se od tri linearna dela (Slika 5.12). Prvi, linearni deo raste do maksimalne vršne čvrstoće smicanja (OA), drugi omekšavajući deo odnosi se na opadanje smičuće čvrstoće od maksimalne do rezidualne (AB), i treći u kojem čvrstoća smicanja ostaje konstantna tj. rezidualna čvrstoća (BC). Funkcija popuštanja za ovaj model definiše se preko smičućih napona q i nedrenirane čvrstoće c_u

$$f = f(\sigma, \varepsilon_p) = q - \sqrt{3c_u} \quad (5.23)$$

Lom pri smičućoj čvrstoći c_u , jednak je $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$. Smičući napon q , može da se izrazi preko druge invarijante napona J_2 (P.I.S.A.).

$$q = \sqrt{3J_2} \quad (5.24)$$



Slika 5.12. Deformacijsko omekšavajući model

5.1.3. Plastični modeli

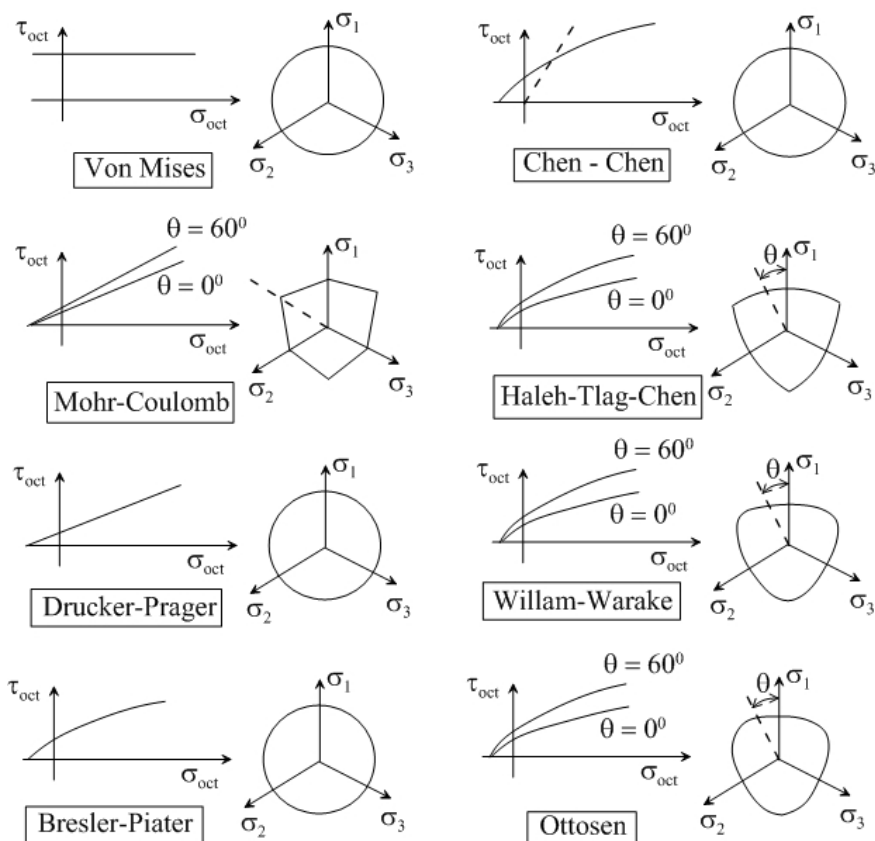
Klasična teorija plastičnosti je nastala je tridesetih godina devetnaestog veka, zahvaljujući pre svega teoretskim radovima Coulomba, Rankina i Trescae, koji su se odnosili na plastično ponašanje materijala, odnosno eksperimentalnim radovima Saint Venanta, von Misesa, Henckya, Prandlta, Nadaia i drugi (Hill, 1950). Po ovoj teoriji, osnovna veza između napona i deformacija predstavlja nepovratan proces deformisanja koji je vremenski nezavisan i koji nastaje nakon određenog nivoa napona.

Osnovni koncept teorije plastičnosti sastoji se od tri osnovne veze: uslova tečenja, zakona tečenja i očvršćavanja i uslova loma. Plastični konstitutivni modeli se razlikuju po pretpostavljenoj funkciji tečenja, a odnos napona i deformacija pretpostavlja da se materijal pre popuštanja ponaša linearno elastično, a nakon popuštanja savršeno plastično.

Prikaz loma tla u trodimenzionalnom naponskom stanju je izuzetno komplikovan, i u literaturi se mogu naći brojni kriterijumi pomoću kojih se on opisuje. Osnovni plastični modeli, koji se najčešće navode u literaturi, su: Coulomb-Mohr, Drucker-Prager, Von Mises, Tresca i dr. (Slika 5.13). Svi ovi modeli imaju određene prednosti i ograničenja od kojih, u velikoj meri, zavisi i njihova primena. Chen (1985) je naveo tri osnovna kriterijuma za vrednovanje modela i to:

- teorijska osnova i jedinoznačnost stvenost uz poštovanje osnovnih principa mehanike kontinuuma
- eksperimentalna pogodnost u pogledu korišćenja uobičajenih laboratorijskih opita za određivanje neophodnih parametara
- numerička procena modela u odnosu na jednostavnost kompjuterskog korišćenja

U geotehnici je, zbog svoje jednostavnosti, u najširoj primeni Kulonov (Coulomb, 1776) model loma, koji se često naziva i Kulon-Mor-Tercagijeva (Coulomb-Mohr-Terzaghi) jednačina čvrstoće smicanja, koja je korišćen i za potrebe istraživanja u ovoj disertaciji. Zato će se ovde samo pomenuti, a detaljno će biti prikazan u narednom Poglavlju.



Slika 5.13. Modeli loma u prostoru glavnih napona (Chen, 1985)

Prema ovom modelu smičuća čvrstoća definiše se na osnovu sledeće jednačine

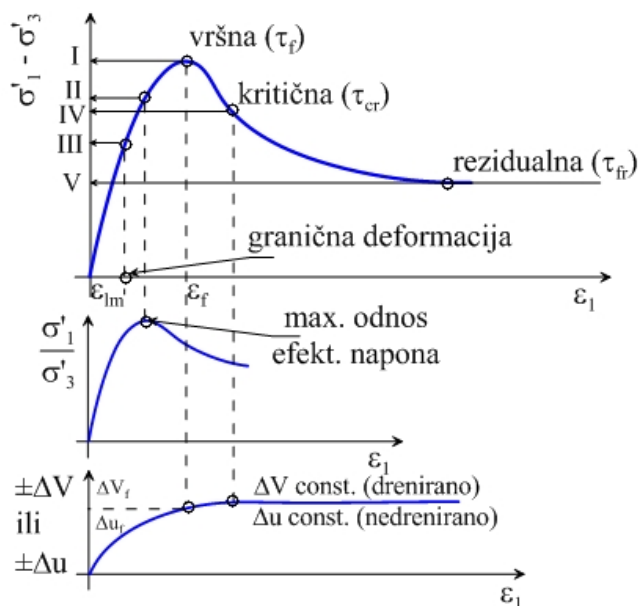
$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u) \cdot \operatorname{tg} \varphi' = c' + \sigma'_n \cdot \operatorname{tg} \varphi' \quad (5.25)$$

gde je:

σ'_n – normalni efektivni napon koji deluje na ravan smicanja tj. ravan loma

c' i φ' – parametri čvrstoće smicanja (kohezija i ugao unutrašnjeg trenja) za efektivne napone.

Ova teorija podrazumeva da lom nastaje pri najvećim smičućim naponima koji zavise od normalnih napona. Ovim modelom, prikazuje se jedna od najznačajnijih geotehničkih osobina materijala – smičuća čvrstoća. Za izbor naponskog stanja, na osnovu koga se neposredno određuju parametri čvrstoće smicanja, koriste se različiti kriterijumi loma (Slika 5.14).



Slika 5.14. Idealizovani kriterijumi loma

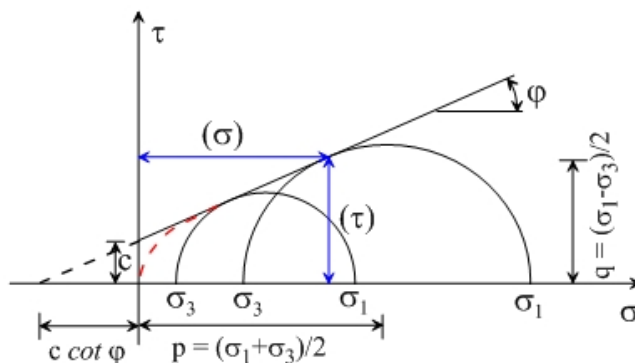
Za materijale sa krto-plastičnim lomom mogu se definisati najmanje dve čvrstoće smicanja: vršna (maksimalna vrednost čvrstoće smicanja - τ_f) i rezidualna (konstantna vrednost čvrstoće smicanja pri velikim deformacijama - τ_{fr}). Između ove dve čvrstoće, može se definisati čvrstoća pri konstantnoj zapremini, odnosno konstantnom pornom pritisku. Pored toga, može se definisati i čvrstoća pri maksimalnom odnosu efektivnih napona.

Međutim, pri laboratorijskom određivanju čvrstoće smicanja u standardnim aparatima, često se dobijaju zavisnosti kod kojih nije izražena vršna čvrstoća smicanja, već se sa porastom deformacija povećava i napon smicanja (ova zavisnost je stalno rastuća i podseća na hiperboličku zavisnost). U takvim slučajevima je teško jednoznačno definisati kriterijum loma, odnosno odabrati tačku loma, kada deformacije nisu dovoljno velike da bi se mobilisala sva smičuća čvrstoća. Zbog toga, za definisanje parametara čvrstoće smicanja, većina autora usvaja određenu veličinu horizontalnih pomeranja izmerenih u standardnim aparatima za direktno smicanje (što je primenjeno i u ovom radu), odnosno veličinu aksijalnih deformacija kod triaksijalnih opita, koja je po pravilu manja od 20 %.

Smičuća čvrstoća pri lomu se može izraziti i preko glavnih napona σ_1 i σ_3

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = (\sigma_1 + \sigma_3)_f \cdot \sin \varphi + 2 \cdot c \cdot \cos \varphi \quad (5.26)$$

To se najbolje prikazuje pomoću tzv. Morovih krugova za stanje napona pri lomu. Ako je poznat niz stanja napona pri lomu, od kojih se svako stanje opisuje Morovim krugom napona, postoji zajednička anvelopa za sve krugove koja se naziva anvelopom napona loma (Slika 5.15). Ovaj model je jednostavan i dovoljno je tačan za primenu u praksi.



Slika 5.15. Mohr - Coulombov kriterijum loma za ravansko naponsko stanje

5.2. OPŠTE O KONSTITUTIVNIM MODELIMA KOMUNALNOG OTPADA

Krajem prošlog veka, istraživači su počeli da koriste složene matematičke modele da bi procenili sleganje i stabilnost komunalnog otpada, pokušavajući da objasne kompleksnost njegovog ponašanja (Sowers, 1973; Edil i dr. 1990; Landva & Clark 1990; Grisolia i dr. 1991; Jessberger & Kockel, 1993; Gabr & Valero, 1995; Reddy i dr. 1996; Mahler & Iturri, 1998; McDougall, 2007. i dr.). Otuda se za poslednjih dvadesetak godina, u literaturi mogu naći brojni predlozi konstitutivnih modela komunalnog otpada, tako da ih je nemoguće sve opisati.

Može se reći da su najčešće predlagani elasto-plastični modeli koji se često koriste da bi se opisalo naponsko-deformacijsko ponašanje tla, i to: izotropno elastični modeli, Kulon-Morov elastično-savršeno plastičan model i Cam-Clay model. Ovim modelima, mogu se opisati dve najbitnije mehaničke karakteristike tla: deformabilnost (stišljivost, kompresija) i čvrstoća smicanja. Treba naglasiti da bez obzira na značajne razlike u odnosu na tlo, deformabilnost i čvrstoća su najvažnije mehaničke karakteristike i

komunalnog otpada. Zato se može reći da je upotreba ovih modela u numeričkim geotehničkim analizama opravdana. Međutim, treba reći da ima i modela koji su razvijeni za tlo, ali nisu direktno primenljivi za komunalni otpad.

Reddy i dr. (1996) su koristili hiperbolički model Duncan – Chang da predstave naponsko-deformacijsko ponašanje komunalnog otpada, a za dobijene parametre modela može se reći da su tipični za organska tla. Jedna tipična naponsko-deformacijska karakteristika komunalnog otpada jeste da sa kontinuiranim povećanjem napona, kontinuirano rastu i deformacije bez jasno izraženog loma, što se često pripisuje efektu armiranja koji potiče od plastičnih materijala komunalnog otpada (Machado i dr. 2002; Reddy i dr. 2009). Osim čvrstoće smicanja, značajnu ulogu na naponsko-deformacijske karakteristike komunalnog otpada ima i sekundarna kompresija koja je vremenski uslovljena zbog biodegradacije. Neki autori su ove dve mehaničke karakteristike analizirali nezavisno. Tako su Jessberger & Kockel (1993), Grisolia i dr. (1995), na osnovu sprovedenih ispitivanja, došli do zaključka da na naponsko-deformacijsko ponašanje komunalnog otpada najveći uticaj ima njegova kompresibilnost. Sa druge strane, Machado i dr. (2002), ukazuju da vlaknaste čestice i njihova armirajuća uloga u komunalnom otpadu, imaju dominantni uticaj na njegovo naponsko-deformacijsko ponašanje. Međutim, očigledno je da obe pomenute mehaničke karakteristike (izražena kompresibilnost i uloga armirajućih čestica) imaju značajnu ulogu na naponsko-deformacijsko ponašanje komunalnog otpada. Iz tog razloga se zadnjih godina sve češće predlažu modeli koji predstavljaju kombinaciju konstitutivnih modela tla i konstitutivnih modela vlaknastih materijala (Reddy i dr. 1996; McDougall, 2007).

U svakom slučaju, za definisanju konstitutivnih modela komunalnog otpada, neophodno je uvesti i određene pretpostavke, a među najčešćim su:

- ponašanje komunalnog otpada u potpunosti zavisi od: vlaknastih materijala (u osnovi ih čine plastični materijali) i mešavine koju čine drugi nevlaknastih materijali (drvo, staklo, metal, tlo, voda odnosno filtrat koji nastaje tokom procesa razgradnje). To znači da model sadrži dva dela, a svaki od delova svoj posebni konstitutivni model

- opšte naponsko-deformacijsko ponašanje zavisi od prirode vlaknastih materijala. Armirajuća uloga vlaknastih materijala, modelira se korišćenjem savršenog elasto-plastičnog modela i von Mises-ov kriterijuma zatezanja
- devijator napona (q), delimično preuzimaju vlaknaste materije a delimično mešavina otpada. Pretpostavlja se da je srednji normalni napon (p) jednak i za vlakna i za mešavinu
- deformacije zavise i od vlakana i od mešavine, ali se zapreminske deformacije vlaknastih materijala zanemaruju. Drugim rečima, pretpostavlja se da su zapreminske deformacije komunalnog otpada vezane samo za mešavinu
- za mehaničko ponašanje mešavine komunalnog otpada, primenjuje se koncept kritičnog stanja tla
- sve promene koeficijenta poroznosti odnose se na mešavinu komunalnog otpada
- sekundarna kompresija reguliše se preko vremenske zavisnosti u vidu eksponencijalne funkcije koja je slična modelu Gibsona & Loia (1961)

$$\varepsilon_c = b \cdot \Delta p' \cdot (1 - e^{-ct'}) \quad (5.27)$$

gde je b – koeficijent mehaničkog puzanja, $\Delta p'$ – promena srednjeg efektivnog napona, c – konstanta mehaničkog puzanja, a t' – vreme koje protekne nakon dejstva inkrementa napona

- indeksi kompresije i rasterećenja (u konkretnom sliučaju parametri κ i λ) mešavine zavise od koeficijenta poroznosti i hiperboličke zavisnosti između srednjeg normalnog napona i početnog koeficijenta poroznosti
- biološka kompozicija odnosi se na ukupno vreme deformisanja usled biološke razgradnje. Za određivanje vremena biološke degradacije, koristi se zavisnost Park & Lee (1997)

$$\varepsilon_b = E_{dg} \cdot (1 - e^{-dt''}) \quad (5.28)$$

gde je E_{dg} – ukupna deformacija koja nastaje usled biološke dekompozicije, d – konstanta biološkog razlaganja, a t'' – vreme koje je proteklo od trenutka odlaganja otpada na deponiju.

U nastavku teksta će se prikazati dva karakteristična konstitutivna modela komunalnog otpada, predložena od strane Machado i dr. (2002) i Babu i dr. (2010).

5.2.1. Konstitutivni model Machado i dr. (2002)

Machado i dr. (2002) su predložili konstitutivni elasto-plastični model, pomoću kojeg se simulira mehaničko ponašanje komunalnog otpada, pod pretpostavkom da njega kontrolišu dva različita dela: vlaknaste čestice (materijali) i preostala mešavina otpada.

Vlaknasti materijal

Priraštaj devijatora napona za vlaknaste materijale (dq_f), dobija se na osnovu sledećeg izraza

$$dq_f = 3G_f \cdot d\varepsilon_{sf}^e \quad (5.29)$$

gde $d\varepsilon_{sf}^e$ predstavlja povećanje elastičnih smičućih deformacija vlaknastih čestica, a G_f je modul smicanja vlaknastog materijala koji se izražava sledećom jednačinom

$$G_f = \frac{E_f}{2(1 + \nu_f)} \quad (5.30)$$

gde je ν_f Poasonov koeficijent vlaknastih čestica, a E_f Jungov modul vlaknastih čestica u vezi sa tim je predloženo njegovo povećanje kako bi se bolje simuliralo “ankerovanje“ vlaknastih materijala, a u zavisnosti od radijalnih napona σ_r (σ_3) i parametra vlaknastih čestica a_f , tj. $E_f = E_u + a_f \sigma_3$

Zapreminska deformacija vlakana je zanemarena, a elastična smičuća deformacija vlaknastih čestica ($d\varepsilon_{sf}^e$), izračunava se preko funkcionalne zavisnosti elastičnih smičućih deformacija mešavine i funkcije mobilizacije vlaknastog materijala

$$d\varepsilon_{sf}^e = f_m \cdot d\varepsilon_{sp}^e \quad (5.31)$$

gde $d\varepsilon_{sp}^e$ predstavlja povećanje elastičnih smičućih deformacija mešavine.

Funkcija mobilizacije vlakana (f_m) definisana je jednačinom

$$f_m = \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left[\left(\frac{q}{p} \right)^2 \right] \quad (5.32)$$

Vidi se da za velike vrednosti odnosa q/p vrednost funkcije f_m teži 1. Naime, zatezanje vlakana definisano je von Mises-ovim kriterijumom.

Mešavina

Mešavina se modelira na osnovu koncepta kritičnog stanja tla (Schofield end Wroth, 1968). Priraštaj devijatora napona za mešavinu (dq_p), dobija se na osnovu sledećeg izraza

$$dq_p = 3G_p \cdot d\varepsilon_{sp}^e \quad (5.33)$$

gde $d\varepsilon_{sp}^e$ predstavlja povećanje elastičnih smičućih deformacija mešavine, dok u ovoj jednačini G_p predstavlja modul smicanja mešavine, a dobija se iz sledećeg izraza

$$G_p = \frac{3p \cdot (1 - 2\nu_p)}{2\kappa \cdot (1 + \nu_p)} \quad (5.34)$$

gde je ν_p Poissonov koeficijent mešavine, κ nagib linije rekompresije, a p je srednji normalni napon $p = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$.

Elastična zapreminska deformacija mešavine ($d\varepsilon_{vp}^e$) se procenjuje na osnovu sledećeg izraza

$$d\varepsilon_{vp}^e = \kappa \cdot \frac{dp}{p} \quad (5.35)$$

dok se plastične zapreminske deformacije određuju na osnovu jednačine

$$d\varepsilon_{vp}^p = (\lambda - \kappa) \cdot \frac{dp_0}{p_0} \quad (5.36)$$

gde je λ nagib linije normalne kompresije, a p_0 predstavlja napon prekonsolidacije. Odnos između koeficijenta poroznosti mešavine i srednjeg normalnog napona, dat je hiperboličkom jednačinom

$$e_p = \frac{N}{p^\lambda} - 1 \quad (5.37)$$

gde N predstavlja vrednost specifične zapremine mešavine pri jediničnoj vrednosti srednjeg normalnog napona ($p = 1$ kPa).

Za definisanje zatezanja, koristi se sledeća jednačina

$$f_p = q_p - M \cdot [p^n (p_0 - p)]^{1/(1+n)} \cdot n^{-1/(1+n)} = 0 \quad (5.38)$$

gde je n faktor oblika mešavine pri zatezanju, a M je gradijent prave liniji kritičnog stanja u koordinatnom sistemu $p - q$ i određuje se iz sledećeg izraza

$$M = \frac{6 \cdot \sin \varphi}{3 - \sin \varphi} \quad (5.39)$$

gde je φ ugao unutrašnjeg trenja mešavine za uslove kritičnog stanja.

Pri korišćenju Cam-Clay modela za faktor oblika pri zatezanju se obično usvaja vrednost $n = 1$, međutim, najbolje slaganje sa eksperimentalnim rezultatima dobijaju se kada se koristi vrednost $n = 2$.

Komunalni otpad kao celina

Promene vrednosti devijatora napona, kada je u pitanju čitav komunalni otpad (dq), predstavljaju zbir pojedinačnih promena devijatora napona mešavine i vlaknastih čestica

$$dq = dq_p \cdot V_p + dq_f \cdot V_f \quad (5.40)$$

$$dq = 3V_p \cdot G_p \cdot d\varepsilon_{sp}^e + 3V_f \cdot f_m \cdot G_f \cdot d\varepsilon_{sp}^e \quad (5.41)$$

gde je V_p odnos između zapremine mešavine i ukupne zapremine, a V_f je odnos zapremine vlaknastih čestica i ukupne zapremine. Vrednost V_f može da se dobije na osnovu sledećeg izraza

$$V_f = P_f \cdot \frac{\gamma_d}{\gamma_{sf}} = P_f \cdot \frac{\gamma_s}{\nu \cdot \gamma_{sf}} \quad (5.42)$$

gde je:

P_f - odnos između suve težine vlaknastih čestica i suve težine komunalnog otpada

γ_{sf} - srednja zapreminska težina vlaknastih čestica

γ_d - suva zapreminska težina komunalnog otpada

γ_s – zapreminska težina čvrstih čestica komunalnog otpada

ν - specifična zapremina koja se dobija kao $\nu = 1 + e$, gde je e koeficijent poroznosti komunalnog otpada

Treba napomenuti da će se V_f menjati u zavisnosti od promene zapreminskih deformacija, tj. V_f će se povećavati sa kompresijom komunalnog otpada. Veza između koeficijenta poroznosti komunalnog otpada (e) i koeficijent poroznosti mešavine (e_p) definiše se preko sledećeg izraza

$$e = \frac{(P_p / \gamma_{sp})}{\left[(P_p / \gamma_{sp}) + (P_f / \gamma_{sf}) \right]} \cdot e_p = V_e \cdot e_p \quad (5.43)$$

gde je:

P_p – odnos između suve težine mešavine i suve težine komunalnog otpada (to znači da je $P_p + P_f = 1$)

γ_{sp} - srednja zapreminska težina mešavine

V_e – odnos između koeficijenta poroznosti čitavog komunalnog otpada i koeficijenta poroznosti mešavine.

Ukupna zapreminska deformacija komunalnog otpada se izračunava korišćenjem sledećeg izraza

$$d\varepsilon_v = V_e \cdot \left(\frac{1 + e_p}{1 + V_e \cdot e_p} \right) d\varepsilon_{vp} \quad (5.44)$$

dok se ukupne smičuće deformacije dobijaju iz jednačine

$$d\varepsilon_s = d\varepsilon_{sp} \cdot V_p + d\varepsilon_{sf} \cdot V_f \quad (5.45)$$

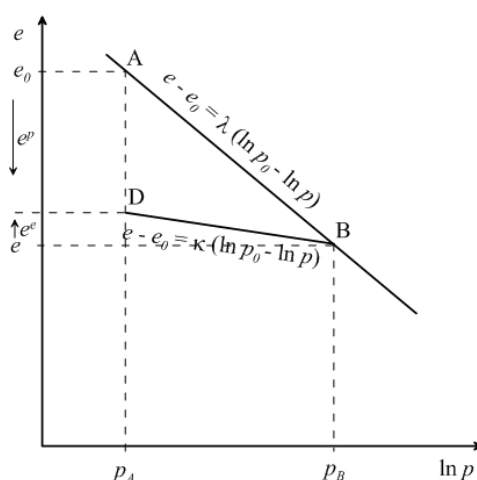
Parametre koji se odnose na vlaknaste čestice, autori su dobili na osnovu rezultata koje je objavio Callister (1994), dok su za parametre komunalnog otpada, koristili rezultate koje je objavio Carvalho & Vilar (1999). Vrednosti ovih parametara, prikazani su u Tabeli 5.1.

Tabela 5.1. Parametri konstitutivnog modela komunalnog otpada na osnovu objavljenih rezultata (Carvalho & Vilar, 1999)

E_u MPa	ν_f	γ_{sf} kN/m ³	q_{max} MPa	γ_f kN/m ³	ν_p	λ	κ	p_0 kPa	N
265	0.25	10	25	23.5	0.36	0.163	0.0065	200	8.34

5.2.2. Konstitutivni model Babu i dr. (2010).

Uopštteni prikaz ovog konstitutivnog modela komunalnog otpada, za slučaj izotropnog opterećenja, dat je na Slici 5.16.



Slika 5.16. Promena koeficijenta poroznosti pri izotropnoj kompresiji komunalnog otpada

Pod pretpostavkom da je komunalni otpad normalno konsolidovan u tački A, u slučaju izotropnog opterećenja promena koeficijenta poroznosti pratiće putanju od tačke A do tačke B. Ukoliko se izvrši rasterećenje do srednjeg efektivnog pritiska p_A , zbog elasto-plastične prirode komunalnog otpada, umesto putanje AB, promena koeficijenta poroznosti slediće putanju BD. Kada se komunalni otpad ponovo optereti od pritiska p_A do p_B on će slediti istu putanju, tako da se tada može govoriti o elastičnom ponašanju. Već ranije rečeno da se nagib putanje normalne konsolidacije označava sa λ , a nagib putanje usled rekompresije označava sa κ . Promena koeficijenta poroznosti od tačke A do tačke D, predstavlja plastičnu komponentu promene zapremine, dok vertikalno rastojanje između tačaka D i B predstavlja elastičnu komponentu promene zapremine. Na osnovu toga, može se prikazati ukupna promena koeficijenta poroznosti (e) tokom jednog ciklusa opterećenja i rasterećenja. Ovo će biti prikazano u nastavku teksta.

Ukupna promena koeficijenta poroznosti tokom nanošenja opterećenja po putanji AB je

$$e = e_A - e_B = \lambda \cdot \ln\left(\frac{p_B}{p_A}\right) = \lambda \cdot (\ln p_B - \ln p_A) \quad (5.46)$$

Promena koeficijenta poroznosti po putanji BD je

$$e^e = e_D - e_E = \kappa \cdot \ln\left(\frac{p_B}{p_A}\right) = \kappa \cdot (\ln p_B - \ln p_A) \quad (5.47)$$

Ukupna zapreminska deformacija dobija se kao

$$d\varepsilon_v = -\frac{de}{1+e_0} = \frac{\lambda}{1+e_0} \cdot \frac{dp}{p} \quad (5.48)$$

odnosno, promena elastičnih zapreminskih deformacija, dobija se na osnovu

$$d\varepsilon_v^e = -\frac{de^e}{1+e} = \frac{\kappa}{1+e} \cdot \frac{dp}{p} \quad (5.49)$$

I na kraju prirast plastičnih zapreminskih deformacija može se napisati u obliku

$$d\varepsilon_v^p = \left(\frac{\lambda - \kappa}{1+e}\right) \cdot \left[\frac{dp}{p} + \frac{2\eta d\eta}{M^2 + \eta^2}\right] \quad (5.50)$$

Gore prikazane formule povećanja elastičnih i plastičnih zapreminskih deformacija, prikazane su u literaturi koja se odnosi na koncept kritičnog stanja tla (Wood, 1990). Međutim, ovaj koncept treba proširiti i na komunalni otpad gde bi se uključila vremenska zavisnost mehaničkog puzanja i biološke degradacije. U vezi sa tim, ukupna zapreminska deformacija komunalnog otpada može se izraziti kao

$$d\varepsilon_v = d\varepsilon_v^e + d\varepsilon_v^p + d\varepsilon_v^c + d\varepsilon_v^b \quad (5.51)$$

gde su $d\varepsilon_v^e$, $d\varepsilon_v^p$, $d\varepsilon_v^c$, $d\varepsilon_v^b$, povećanja zapreminskih deformacija usled elastičnih efekata, plastičnih efekata, vremenske zavisnosti mehaničkog puzanja i efekta biodegradacije.

Koristeći jednačinu (5.28), povećanje zapreminskih defomacija usled mehaničkog puzanja dobija se

$$d\varepsilon_v^c = c \cdot b \cdot \Delta p \cdot e^{-ct'} dt' \quad (5.52)$$

dok se na osnovu jednačine (5.29), povećanje zapreminskih defomacija usled efekta biodegradcije dobija iz jednačine

$$d\varepsilon_v^b = dE_{dg} \cdot e^{-dt''} dt'' \quad (5.53)$$

Koristeći jednačin (5.49), (5.50), (5.52) i (5.53), i njihovim uvođenjem u jednačinu (5.51), ukupno povećanje zapreminskih defomacija se dobija na osnovu sledećeg izraza

$$d\varepsilon_v = \frac{\kappa}{1+e} \cdot \frac{dp}{p} + \left(\frac{\lambda - \kappa}{1+e} \right) \cdot \left[\frac{dp}{p} + \frac{2\eta d\eta}{M^2 + \eta^2} \right] + c \cdot b \cdot \Delta p \cdot e^{-ct'} dt + dE_{dg} \cdot e^{-dt''} dt \quad (5.54)$$

Pojednostavljeni oblik ove jednačine može se napisati na sledeći način

$$q = M \cdot p \sqrt{\left\{ \left[\left(\frac{p_0}{p} \right)^\lambda \exp \left\{ \left[\frac{(e_0 - e)}{1 + e_0} + b \cdot \Delta p \cdot e^{-ct'} + E_{dg} \cdot e^{-dt''} \right] (1 + e) \right\} \right]^{\frac{1}{\lambda - \kappa}} - 1 \right\}} \quad (5.55)$$

Ovaj konstitutivni model ustvari predstavlja prošireni oblik modifikovanog Cam-Clay modela.

5.3. ZAKLJUČAK

U geotehničkim časopisima i u zbornicima sa raznih geotehničkih konferencija, može se naći veliki broj naponsko-deformacijskih veza - konstitutivnih modela tla. Prvi konstitutivni modeli, razvijeni su za normalno konsolidovane i malo prekonsolidovane gline, a veruje se da uz izvesna prilagođavanja, oni mogu poslužiti za opisivanje mehaničkog ponašanja svih vrsta tla. Njihov istorijski pregled, detaljno je prikazao Scott (1985) u okviru 19-tog predavanja posvećenog Terzaghiju: "Plastičnost i konstitutivne zavisnosti u mehanici tla".

Kada je u pitanju tlo, zbog svoje jednostavnosti i relativno lakog određivanja parametara, u najširoj upotrebi je nekoliko konstitutivnih modela: linearno-elastični, Duncan-Chang-ov, savršeno elasto-plastičan Mohr-Coulomb-ov model i Cam-Clay model. Oni se mogu primeniti i na komunalni otpad. Svaki od njih ima određene prednosti ali i nedostatke, pre svega zbog složenosti problema konstitutivnih veza, pa samim tim je i njihova upotreba ograničena. U osnovnim oblicima ovih modela, uključen je relativno mali broj parametara pomoću kojih se opisuje niz uobičajenih naponsko-deformacijskih stanja. Oni se dobijaju ispitivanjima, korišćenjem konvencionalne laboratorijske opreme kao što su edometarski i triaksijalni aparati i aparati za direktno smicanje. Međutim, stalni pokušaji istraživača širom sveta za njihovim poboljšanjima, uglavnom doprinose njihovoj brojnosti, a ne i jednostavnosti. Naime, sve promene i pored delimično uspešnih rezultata, uglavnom ih komplikuju i može se reći da kvare "eleganciju" osnovnih modela, jer se najčešće povećava broj neophodnih parametara (Maksimović, 2008).

Osnovne teškoće prilikom modeliranja komunalnog otpada, javljaju se zbog njegove izrazite heterogenosti, ne samo u pogledu različitih vrsta i dimenzija materijala, već i zbog različitog vremena razgradnje. Zato je glavni zadatak konstitutivnih modela da pored analitičkog prikaza veza napona i deformacija, uspostave i određenu vremensku zavisnost. Bez obzira na brojne pokušaje, do danas još uvek nije razvijen jednostavan i potpun konstitutivni model koji za predviđanje naponsko-deformacijskog ponašanja komunalnog otpada uključuje sve faktore, kao što su: istorija naponskog stanja, mehaničko puzanje, uticaj biodegradacije na smanjenje ili eventualno povećanje čvrstoće smicanja i sl.

U okviru ovog poglavlja, pored skraćenog prikaza osnovnih elastičnih, elasto-plastičnih i plastičnih modela, prikazana su i dva karakteristična konstitutivna modela koja se odnose na komunalni otpad. To su konstitutivni modeli koje su predložili Machado i dr. (2002) i Babu i dr. (2010).

Machado i saradnici su predložili konstitutivni elasto-plastični model, pomoću kojeg se simulira mehaničko ponašanje komunalnog otpada, pod pretpostavkom da otpad definišu dva različita dela: vlaknaste čestice i preostala mešavina otpada. U ovom modelu, definisan je način određivanja elastičnih smičućih deformacija vlaknastih čestica, dok se zapreminske deformacije vlaknastih čestica zanemaruju. Mešavina komunalnog otpada je modelirana na osnovu koncepta kritičnog stanja tla, a za mešavinu su određene: elastične smičuće deformacije, elastične zapreminske deformacije i plastične zapreminske deformacije. Na osnovu ovako određenih deformacija, predložen je način određivanja ukupnih zapreminskih i ukupnih smičućih deformacija komunalnog otpada kao celine. Kako su ovim modelom analizirana dva različita dela komunalnog otpada, to je za njegovo korišćenje neophodno izvršiti razvrstavanje komunalnog otpada kako bi se dobio sadržaj vlaknastih čestica, odnosno, odnos vlaknastih čestica i preostale mešavine komunalnog otpada.

Babu i saradnici su predložili konstitutivni model koji u suštini predstavlja prošireni oblik modifikovanog Cam-Clay modela. Da bi se dobile ukupne zapreminske deformacije, u okviru ovog modela, pored određivanja elastičnih i plastičnih deformacija, uključena je i vremenska zavisnost preko deformacija usled mehaničkog puzanja i efekta biološke degradacije.

Za korišćenje ovih modela, potreban je relativno veliki broj parametara. Oni se mogu dobiti iz standardnih laboratorijskih opita koji se primenjuju u mehanici tla, ili se mogu dobiti iz povratnih analiza u terenskim uslovima, za konkretne deponije. Međutim, da bi se omogućio ubrzani proces razgradnje i degradacije komunalnog otpada, tj. da bi se simulirale promene određenih parametara tokom vremena, neophodni su specijalni aparati ili značajnije dorade postojećih aparata. Druga mogućnost jeste ispitivanje uzoraka komunalnog otpada različite starosti i stanja degradacije, gde posebno kod svakog pojedinačnog ispitivanja, treba voditi računa o sastavu otpada.

POGLAVLJE 6

ČVRSTOĆA SMICANJA KOMUNALNOG OTPADA

Čvrstoća smicanja, odnosno parametri čvrstoće smicanja (c - kohezija i φ - ugao unutrašnjeg trenja), spadaju u najvažnije inženjerske parametre tla pomoću koje se rešavaju mnogi konkretni zadaci u geotehnici. Ona, u suštini, predstavlja najveću vrednost napona smicanja (τ) duž ravni u kojoj nastaju plastične deformacije, sa tendencijom da se deo mase pomeri i tako formira kliznu površinu. Poznavanje čvrstoće smicanja komunalnog otpada, od posebne je važnosti, pre svega za stabilnost kosina deponije. Pravilno projektovanje kosina deponije, podrazumeva i poznavanje čvrstoće smicanja komunalnog otpada, bilo da se ona odnosi na kontakt otpada i prirodnog tla, otpada i prirodnih zaštitnih sistema od tla ili otpada i veštačkih (geosintetičkih) materijala koji se koriste kao zaštitni sistemi. Analize koje se tom prilikom sprovode, koriste parametre čvrstoće smicanja, pomoću kojih se opisuje karakteristika komunalnog otpada. Kod nas je dosadašnja praksa pokazala da se ove analize vrlo retko sprovode, a i tada se po pravilu, vrednosti ovih parametara isključivo preuzimaju iz svetske literature, odnosno, usvajaju na osnovu empirijskih ili ograničenih terenskih procena. Međutim, i za komunalni čvrsti otpad (Municipal Solid Waste - MSW) javljaju se vrlo promenljive vrednosti parametara čvrstoće smicanja. Za to postoji više razloga, i to ne predstavlja iznenađenje kada se zna: da su ispitivanja vršena na izrazito heterogenim materijalima različite starosti, da se materijali razlikuju od deponije do deponije (a evidentne su i razlike u istoj deponiji), da je odabir materijala a time i sastav uzoraka koji se ispituje različit, da postoje izvesne razlike u korišćenoj opremi i sl. Pored toga, ne postoji jedinstveni pristup za interpretaciju dobijenih rezultata ispitivanja, bilo da su oni dobijeni laboratorijskim ili in situ ispitivanjima, pa se u literaturi sreću i različite pretpostavke istraživača prilikom tumačenja dobijenih podataka. Tako na primer, nije uvek jasno istaknut usvojeni kriterijum loma pri izvođenju ispitivanja.

6.1. OPŠTE O ČVRSTOĆI SMICANJA

Čvrstoća smicanja nije jedinstveno svojstvo tla a ni komunalnog otpada, jer zavisi od mnogih faktora. Obično se definiše na osnovu izvedenih laboratorijskih ispitivanja (K. H. Head, 1982) i izražava se uglom unutrašnjeg trenja (φ) i kohezijom (c) uz neophodno poznavanje normalnog napona. Najznačajniji faktori koji utiču na čvrstoću smicanja koja se određuje laboratorijskim ispitivanjima su:

1. sastav (mineralni ili hemijski)
2. granulometrijski sastav, oblik, raspored (struktura)
3. odnos pojedinih faza - težinskih, težinsko-zapreminskih, zapreminskih (vlažnost, zapreminske težine, poroznost)
4. istorija naponskog stanja
5. naponsko stanje na mestu uzorkovanja
6. promena naponskog stanja tokom uzorkovanja
7. stanje uzorka pre ispitivanja
8. primenjeno naponsko stanje pre smicanja
9. metoda ispitivanja
10. brzina smicanja
11. uslovi dreniranja tokom smicanja
12. ostvareni porni pritisak
13. korišćeni - primenjeni kriterijum loma
14. temperatura

Navedeni faktori u tačkama od 1 do 5 odnose se na zatečeno – prirodno stanje, tako da se njima ne može upravljati. Tačke 6 i 7 odnose se na kvalitet uzorkovanja. Ovde treba istaći da se način pripreme uzoraka komunalnog otpada bitno razlikuje od pripreme uzoraka tla/stena, s obzirom na njegov sastav i poreklo. Zato je ovo jedan od najznačajnijih faktora, prilikom planiranja ispitivanja čvrstoće smicanja komunalnog otpada. Metode ispitivanja se odnose na tačke 8 do 11. Uticaj generisanja pornog pritiska je dat u tački 12 a način definisanja čvrstoće smicanja se navodi u tački 13.

U praksi se čvrstoća smicanja najčešće opisuje jednom linearnom jednačinom u funkciji od normalnih ukupnih napona $\tau_f = f(\sigma_n)$ odnosno, u funkciji od normalnih efektivnih napona $\tau_f = f(\sigma'_n)$. Kada je u pitanju čvrstoća smicanja komunalnog otpada, najčešće se koristi linearna Kulon-Mor-Tercagijeva jednačina.

Takozvanom Kulonovom (Coulomb, 1776) jednačinom, čvrstoća smicanja τ_f se definiše na sledeći način

$$\tau_f = c + \sigma_n \cdot \tan \varphi \quad (6.1)$$

gde je:

τ_f - smičuća čvrstoća

σ_n - ukupni normalni napon koji deluje na ravan smicanja

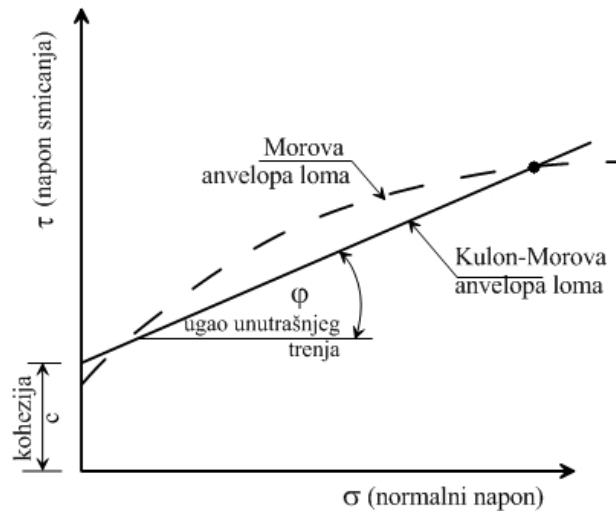
c - kohezija

φ - ugao unutrašnjeg trenja

Koheziju c čine vezivne sile između dodirnih površina čestica, koje su nezavisne od napona. Ona se kod tla definiše kao odsečak na τ osi (Slika 6.1) koji predstavlja komponentu smičuće čvrstoće koja ne sadrži trenje. Zato se može reći da ona predstavlja “otpor smicanju kada su normalni naponi jednaki nuli”. Međutim, komunalni otpad se znatno razlikuje od tla, s obzirom na veličinu i oblik komponenti koje ga čine, jer pored finih (uglavnom zemljastih i organskih čestica) sadrži i veliki udeo krupnozrnih a različitih komponenti otpada koje su mnogo veće od čestica tla. U tom slučaju, koheziju čine samo vezivne sile koje nastaju “preplitanjem” pojedinačnih ljustastih komponenti otpada, pa se ona često kod komunalnog otpada naziva “prividna kohezija”. Očigledno da koheziju čine i ojačanja koja su prisutna u otpadu, što se može poistovetiti sa kohezijom “armiranog tla”.

Ugao unutrašnjeg trenja predstavlja trenje između čestica koje nastaje njihovim pokretanjem, klizanjem ili kotrljanjem (ako za to ima prostora) i njegova vrednost zavisi od nivoa normalnih napona. S obzirom da se javlja između čestica, to i granulometrijski sastav odnosno veličina čestica, ima bitan uticaj na ugao unutrašnjeg trenja.

Prema Kulonovoj kriterijumu loma, kritična kombinacija normalnog i smičućeg napona dovodi do loma u određenoj ravni. Saglasno tome anvelopa loma je definisana krivom (aproximira se pravom linijom), spajanjem tačaka koje predstavljaju napon pri lomu u ovim ravnima (Slika 6.1).



Slika 6.1. Morova i Kulon-Morova anvelopa loma

Jednačina 6.1 se često naziva i Kulon-Morov (Mohr, 1882) uslov loma, jer se čvrstoća smicanja može prikazati i kao obvojnica Morovih krugova. Naime, anvelopa loma se dobija povlačenjem tangente na Morove krugove koja se često aproksimira pravom linijom čija je jednačina identična Kulonovom izrazu (Slika 6.1), i zato je poznata kao Kulon-Morova linija loma.

Ova jednačina je značajno modifikovana od strane Tercagija (Terzaghi, 1923), koji je uveo porni pritisak u jednačinu 6.1, i istakao značaj efektivnih napona za deformacijsko ponašanje tla

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u) \cdot \tan \varphi' = c' + \sigma_n' \cdot \tan \varphi' \quad (6.2)$$

gde je

$\sigma_n' = \sigma_n - u$, normalni efektivni napon koji deluje na ravan smicanja

u – porni pritisak

c' - kohezija za efektivno naponsko stanje

φ' - ugao unutrašnjeg trenja za efektivno naponsko stanje

Ovako definisana čvrstoća smicanja, u najširoj je primeni kod različitih geotehničkih analiza, a većina autora koja se bave istraživanjem čvrstoće komunalnog otpada, takođe na ovaj način definiše čvrstoću smicanja. Tako na primer Oweis (1993) objašnjava ovaj koncept na sledeći način. “U zasićenom tlu, ukupni normalni napon na bilo koju ravan, predstavlja zbir pritisaka od vode u pornom prostoru i srednjeg efektivnog napona na kontaktnim površinama tla (skeletonu). Ukupne napone, izaziva težina nadsloja od komunalnog otpada u odnosu na posmatranu ravan. Smanjenje ili povećanje pornog pritiska u zasićenom tlu ne može da izazove bilo kakvu promenu zapremine. Za razliku od tla, otpad nije geološki material, njegov sastav varira u zavisnosti od vrste otpada pa se može reći da je izuzetno heterogen i anizotropan. Zato se čvrstoća smicanja otpada može da izrazi preko prividnih efektivnih parametara čvrstoće smicanja: ugla unutrašnjeg trenja (φ'_a), i kohezije (c'_a)”. Stoga, Oweis predlaže da se za definisanje čvrstoće smicanja komunalnog otpada u obzir uzme efektivno naponsko stanje, drugim rečima, da se koristi Kulon-Mor-Tercagijev način predstavljanja čvrstoće smicanja.

Manassero i dr. (1996) se slažu sa načinom ispitivanja čvrstoće smicanja komunalnog otpada i konceptom koji uključuje i vrednost ugla unutrašnjeg trenja i kohezije. S druge strane, oni napominju da otpad najčešće nije zasićen. Međutim, tumačenje rezultata opita za slučaj nedreniranog stanja, koje je karakteristično samo za vezana – sitnozrna tla, tj. karakteristično za čvrstoću smicanja bez zapreminskih promena kada je $\varphi_u = 0^0$, predstavljao bi nerealan pristup. Naime, za komunalni otpad se može reći da je dovoljno vodopropustan, tako da se proces konsolidacije odvija istovremeno sa nanošenjem opterećenja, bez značajnijih priraštaja pornih pritisaka. To znači, da kod komunalnog otpada, po pravilu imamo drenirano stanje sa efektivnim naponima. Stoga se analize, koje uzimju u obzir efektivnu koheziju i efektivni ugao unutrašnjeg trenja, mogu smatrati adekvatnim.

Jednačina čvrstoće smicanja se može izraziti i preko glavnih efektivnih napona σ_1' i σ_3'

$$\sin \varphi' = \frac{(\sigma_1' - \sigma_3')}{2 \cdot c' \cdot \cot \varphi' + (\sigma_1' + \sigma_3')} \quad (6.3)$$

$$\sigma_1' = \sigma_3' \cdot \frac{1 + \sin \varphi'}{1 - \sin \varphi'} + 2 \cdot c' \cdot \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi'}{1 - \sin \varphi'}} \quad (6.4)$$

Osim toga, zbog opšte heterogenosti otpada (različitih veličina, oblika i osobina materijala), njegove komponente kada su izložene smičućim silama, često međusobno formiraju “mostove”. Formiranje “mostova” uslovljava i pojavu zateznih sila kojih kod tla nema. Neke komponente otpada su stišljive, pa usled dodatnih opterećenja se deformišu i na neki način se prepliću, praveći “mostove” sa nestišljivim komponentama. Osim toga, komponente sa različitim osobinama materijala u pogledu zatezne i smičuće čvrstoće, prepliću se i dovode do mogućnosti loma slabijih materijala koji su u odnosu na susedne komponente sa jačim materijalom zarobljeni, čime dolazi do njihovog drobljenja. Upravo iz tih razloga neki autori smatraju da uobičajeni prikaz rezultata opita smicanja, često nije pogodan. Zato oni smatraju da prilikom određivanja čvrstoće smicanja otpada, zbog sadržaja vlaknastih frakcija otpada koje trpe i napone zatezanja, treba uključiti i zateznu čvrstoću koja se aktivira tokom procesa smicanja. Naime, frakcije plastike, papira, kartona, gume i sličnih materijala, predstavljaju “armaturu” sitnim frakcijama otpada koje čine njegovu osnovu. Zbog toga se kod komunalnog otpada, javlja karakteristična naponsko-deformacijska zavisnost kod koje najčešće nije izražen elasto-plastični lom. Najpribližnije ponašanje komunalnog otpada, u stanju prirodne zbijenosti, moglo bi se opisati naponsko-deformacijskom zavisnošću koja je karakteristična za tlo sa deformacijskim očvršćavanjem-ojačanjem. U ovom slučaju čvrstoća smicanja se realizuje pri znatno većim deformacijama - kada se aktiviraju “armirajuće” frakcije otpada.

Čvrstoću smicanja komunalnog otpada sa “armirajućim” elementima, pokušali su da objasne Kölsch, (1996), a kasnije i Athanasopoulos i dr. (2008). Kölsch navodi da čvrstoću smicanja čine komponenta otpora smicanja i komponenta otpora zatezanja, koju obezbeđuju armirajući elementi. On čvrstoću smicanja komunalnog otpada opisuje na sledeći način:

"Otpor, koji utiče na napon smicanja prouzrokovan mehaničkim naponima, naziva se čvrstoća smicanje. U zbijenim materijalima, čvrstoću smicanja čine zatezna čvrstoća i čvrstoća na pritisak. U rastresitim materijalima čvrstoću smicanja ne formiraju hemijske ili fizičke veze između pojedinih frakcija, već sile izazvane trenjem i adhezijom. Upravo zbog trenja, koje zavisi od predopterećenja, čvrstoća smicanja rastresitih materijala zavisi od naponskog

stanja. Štaviše, pomeranja koja nastaju usled smicanja, povećavaju adhezivnu otpornost tj. koheziju, koja deluje u svim pravcima. Ovaj otpor nastaje od površinskih napona vode između velikih čestica, elektro-statičkih (Coulomb) i privlačnih sila (van der Waals) na finozrnim česticama (površinske polarizacije, sile privlačenja i odbijanja)."

Zato po mišljenju Kōlsch-a, u obzir treba uzeti i armirajući fenomen, tako da se čvrstoća smicanja može da izrazi na sledeći način

$$\tau_{\text{theo}} = c + \Delta c \cdot \sigma \cdot \tan \xi + \sigma \tan \varphi \quad (6.5)$$

gde:

Δc - predstavlja udeo kohezije armirajućih materijala, a

ξ - ugao zatezanja

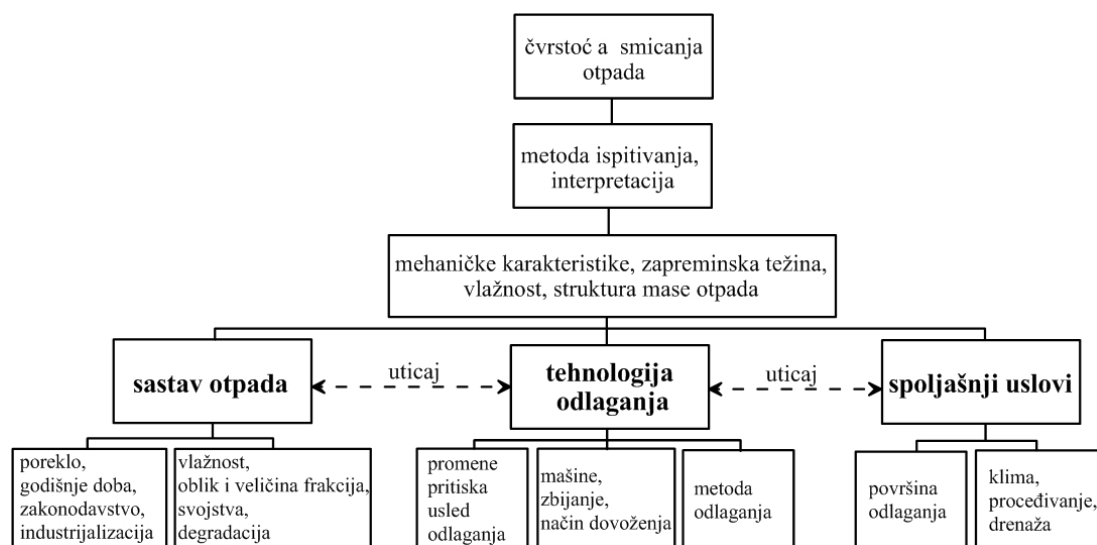
Atanasopulos i dr. (2008) su izučavali efekte orijentacije i mehaničkih karakteristika armirajućih materijala, na mobilisanu čvrstoću smicanja. Na osnovu njihovih istraživanja, došli su do zaključka da je čvrstoća smicanja otpada izrazito anizotropna i da zavisi od orijentacije i osobina armirajućih materijala.

6.2. FAKTORI KOJI UTIČU NA ČVRSTOĆU SMICANJA KOMUNALNOG OTPADA

Kako se radi o izrazito heterogenom materijalu, sa izraženom vremenskom promenljivošću, vrednosti parametara čvrstoće smicanja zavise od niza faktora. Osnovne faktore definisali su Faset i dr. (1994) i to su:

- sadržaj organskih i armirajućih materijala u masi otpada (sastav otpada)
- starost otpada i stepen dekompozicije
- tehnologija odlaganja otpada (stepen zbijanja, debljina sloja, količina i vrsta dnevnog pokrivača).

Međutim, u literaturi se može naći i uticaj drugih faktora koji utiču na čvrstoću smicanja komunalnog otpada. Tako npr. Langer i dr. (2005), kao jedan od faktora navodi metode ispitivanja i način interpretacije rezultata, dok ostali faktori uglavnom utiču na osnovne fizičke pokazatelje komunalnog otpada pa samim tim i na čvrstoću smicanja. Prikladna šema osnovnih faktora koje je definisao Langer, prikazana je na Slici 6.2. U nastavku teksta će se ukratko prikazati uticaj najznačajnijih faktora.



Slika 6.2. Uticajni faktori na čvrstoću smicanja komunalnog otpada (Langer, 2005)

6.2.1. Heterogenost

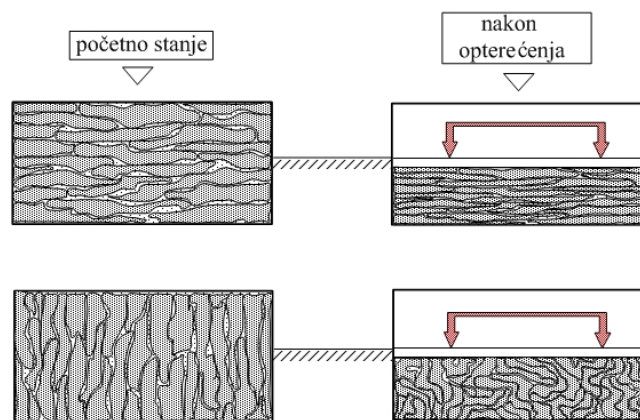
Komunalni otpad sastoji se od materijala koji se razlikuju po krupnoći, obliku i osobinama, tako da njegove karakteristike u samoj deponiji, mogu biti različite na međusobno malim rastojanjima. Ovo je posebno važno kada se analizira aspekt stabilnosti kosina deponije, zbog pojava eventualnih zona sa materijalima povećane vlažnosti ili zona sa dominantnim učešćem materijala lošijih karakteristika. Suprotno, veća zastupljenost plastičnih materijala pogodne orijentacije u zoni potencijalne klizne površine, može da utiče na povećanje stabilnosti kosina deponije.

Drugi vid problema koji se javljaju zbog heterogenosti komunalnog otpada, jeste izbor uzoraka za laboratorijsko ispitivanje. Da bi uzorak realno reprezentovao osobine materijala u deponiji, potrebno je uzeti veću količinu otpada. Međutim, treba imati u

vidu da se i veća količina otpada kasnije mora znatno smanjiti i svesti na količinu neophodnu za formiranje uzorka koji će biti pogodan za ispitivanje.

6.2.2. Struktura

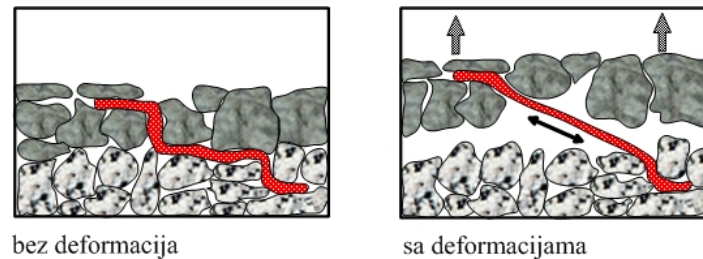
Na strukturu utiču sastav otpada, krupnoća i oblik komponenata, način odlaganja na deponiju i debljina slojeva. Način odlaganja otpada uslovljava njegovu strukturu, a time i anizotropno ponašanje čvrstoće smicanja. U odnosu na načine odlaganja otpada prikazane na Slici 6.3, horizontalna orijentacija komponenata u trenutku odlaganja, inicira i horizontalno slaganje otpada pod težinom nadsloja. Kod ovako formirane strukture otpada, lako se obrazuje horizontalna ravan smicanja, a mogućnost da dođe do vertikalnog smicanja je svedena na minimum. Ukoliko su tokom odlaganja otpada komponente orijentisane vertikalno, dolazi do uklještenja i međusobnog uklapanja komponenti. Struktura je u tom slučaju promenljiva, tako da ravan smicanja nije „predisponirana“ kao što je to slučaj kod horizontalno orijentisanih komponenata.



Slika 6.3. Karakteristični slučajevi orijentacije komponenata otpada (Kölsch, 1996)

Poznavanje strukture otpada u komunalnoj deponiji je bitno, pre svega, zbog moguće pojave „efekta armiranja“, ali i sabijanja. Štaviše, njihov međusobni uticaj ima posebnu ulogu kod ponašanja otpada tokom smicanja. Međutim, Kölsch (1996), razmatra i mogućnost gubitka „efekta armiranja“ i smanjenja čvrstoće smicanja, ukoliko armirajući materijali, koji su prvobitno bili upravno orijentisani na ravan smicanja, tokom smicanja zauzmu položaj koji je paralelan sa ravni smicanja.

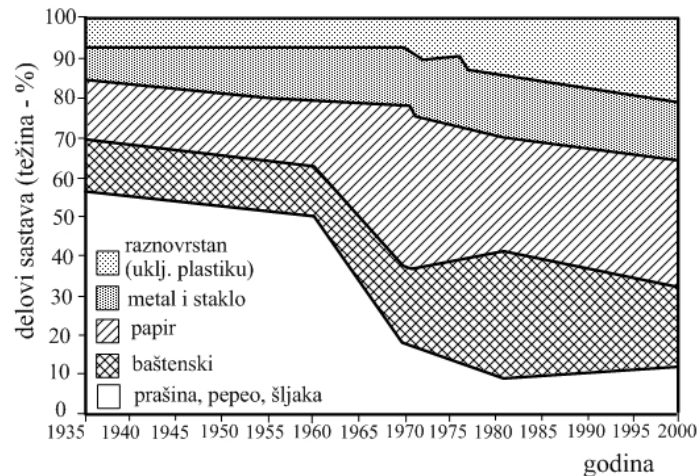
Lom ili kidanje pojedinih komponenti otpada, takođe su bitne za utvrđivanje uticaja strukture otpada na čvrstoću smicanja, pre svega, zbog heterogenosti i različitih osobina pojedinih komponenti otpada. Zbog razaranja i slabljenja pojedinih komponenti otpada, moguće je formiranje ravni smicanja, pa značaj orijentacije vlaknastih materijala u tom slučaju ima veliku ulogu prilikom mobilisanja zatezne čvrstoće (Slika 6.4).



Slika 6.4. Efekat armiranja na mobilisani napon zatezanja (Kölsch, 1996)

6.2.3. Sastav

Termin „sastav otpada“ obično se koristi da opiše pojedine komponente koje čine otpad a njihovo učešće se najčešće izražava procentualno u masi a retko procentom zapremine. Na sastav otpada najčešće utiče njegovo poreklo (otpada iz domaćinstva, komercijalni otpad, tehnološki i dr.). Prema tome, sastav otpada u je direktnoj korelaciji sa nacionalnom ekonomijom, jer zavisi od životnog standarda i načina života stanovništva, stepena industrijskog razvoja, specijalnog okruženja, potrošnje i drugih parametara. Takođe, otpad iz industrijskih regija se značajno razlikuje od otpada iz ruralnih krajeva. Postoje geografske, kulturne i socijalne razlike između razvijenih zemalja, onih u razvoju, ali i između zemalja iste razvijenosti. Iz tih razloga se količine nastalog otpada razlikuju među državama ali i u okviru jedne države, gde se sadržaj otpada menja sa sezonskim oscilacijama (zima, leto) i promenama navika potrošača. Poseban uticaj na sastav otpada ima i njegova starost. Sve to ukazuje na poteškoće vezane za direktno poređenje pojedinih osobina otpada. Ako pogledamo promenu sastav otpada u Velikoj Britaniji počev od 1935. godine (Slika 6.5), očigledno je da se količina prašine, pepela i šljake uveliko smanjuje, dok se količine materijala, kao što su plastika i hartija, stalno povećavaju.



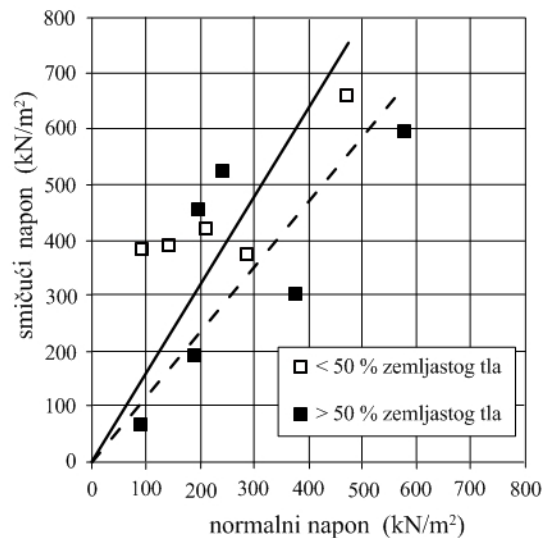
Slika 6.5. Promena sastava komunalnog otpada u Velikoj Britaniji (Watts i dr. 2002)

Ovo ukazuje na to da promena sastava otpada može bitno da utiče i na njegove mehaničke karakteristike (npr. sa porastom količine plastičnih materijala u otpadu, očekuje se i povećanje čvrstoće smicanja usled efekta “armiranja”). Zato se imajući u vidu buduće promene u sastavu otpada, sve češće predlažu i istraživanja vezana za uticaj određenih komponenti na mehaničko ponašanje. U tom pogledu od velikog značaja su propisana uputstva i direktive od strane EPA (Environmental Protection Agency), prema kojima bi sastav komunalnog otpada mogao znatno da se promeni, pre svega zbog njegove eventualne predobrade (drobljenje, reciklaža, separacija i sl.), što će svakako uticati i na čvrstoću smicanja a samim tim i na stabilnost kosina deponija.

6.2.4. Degradacija

Zbog biološke i hemijske razgradnje otpada nakon njegovog odlaganja, dolazi i do znatnih fizičkih promena. Ove promene utiču i na mehanička svojstva i to kako deformabilna tako i otporna. Organski sastojci biorazgradnjom menjaju oblik i veličinu, čime se po pravilu uvećava sadržaj mineralne komponente, koja podseća na zemljaste čestice. Osim toga, biodegradacija kao i fizičke promene, mogu da razore i razlože armirajuće materijale i na taj način umanje efekat armiranja. S druge strane, povećava se zapreminska težina, što bi moglo da dovede do povećanja čvrstoće smicanja. Oweis (1993) smatra da se sa starošću otpada menja i njegova zapreminska težina jer on postaje zbijeniji, što utiče i na njegovu čvrstoću smicanja. Međutim, s druge strane, raspadanje može da ima suprotno dejstvo, ukoliko se unište čestice koje imaju armirajuću

ulogu. Siegel i dr. (1990) su proučavali komunalni otpad različitog sastava, a rezultati do kojih su došli prikazani su na Slici 6.6.



Slika 6.6. Zavisnost čvrstoće smicanja od sadržaja zemljastog tla (Siegel i dr. 1990)

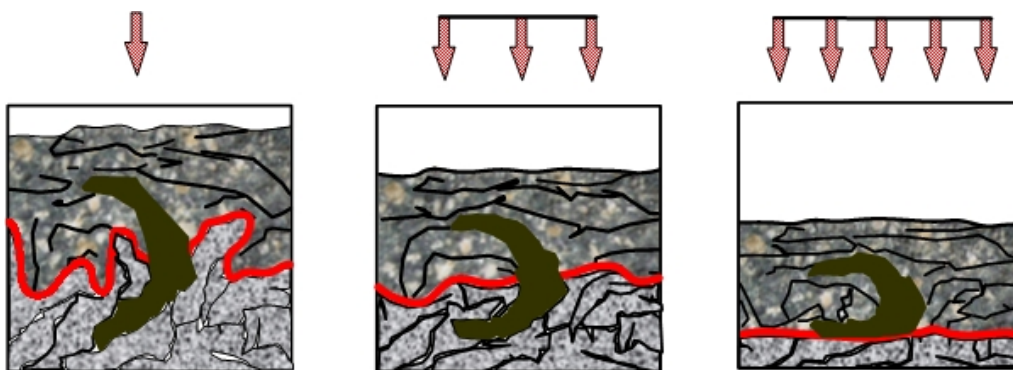
Polazeći od pretpostavki da otpad nema koheziju, rezultati su pokazali da otpad sa većim sadržajem zemljastog materijala ima znatno manji ugao unutrašnjeg trenja. To ih je navelo na zaključak da tokom degradacije otpada dolazi do njegovog raspadanja i smanjenja krupnoće čestica, što bi moglo da ukazuje i na smanjenje čvrstoće smicanja kod starijeg i više raspadnutog otpada. Pored toga ovo dovodi i do promene odnosa zemljastog u odnosu na druge materijale otpada.

Kölsch (1996) je vršio opite na degradiranom i na mladom otpadu kako bi proučio promene koje se tokom vremena dešavaju na njihovim armirajućim komponentama. Ispitivanja su pokazala veću čvrstoću na zatezanje kod mladog nego kod raspadnutog otpada, što ga je navelo na zaključak da je osnovni razlog tome, raspadanje organskih armirajućih čestica tokom procesa degradacije. Siegel i dr. 1990 se pozivaju na opite koje su izvršili Lendva i Clark (1990) a prema kojima je otpad imao manju čvrstoću smicanja kada je na njemu izvršeno ponovno ispitivanje u aparatu za direktno smicanje posle godinu dana raspadanja. Međutim, zbog nedovoljnog broja opita, nije bilo moguće odrediti čvrstoću smicanja posle potpunog raspadanja. Pri tome, uticaj natapanja otpada filtratom, nije uziman u obzir. Jessberger i dr. (1995) su vršili laboratorijska ispitivanja uzoraka sa deponija različite starosti (1-20 godina) i sastava. Ispitivanja nisu jasno

ukazala na efekat starosti na smanjenje ugla unutrašnjeg trenja, ali se došlo do zaključka da različiti sastav materijala u otpadu, predstavlja značajan faktor. Nešto kasnije, Jessberger (2001), naglašava da čvrstoća smicanja komunalnog otpada zavisi od vrste i sastava otpada. Tako da se može reći da još nije dokazano da sa starenjem otpada na deponiji, opada i njegova čvrstoća smicanja.

6.2.5. Debljina nadsloja – efekat normalnih napona

Nasipanjem novih slojeva otpada, dolazi do promene naponskog stanja unutar tela deponije. Ova promena naponskog stanja može da poveća ali i da smanji čvrstoću otpada u zavisnosti od lokalnih uslova, prirode otpada ali i od toga, da li su pojedine frakcije otpada posle raspadanja, vezane čvršće ili ne. Sa porastom debljine nadsloja, povećava se i zapreminska težina donjih slojeva deponije, pre svega zbog migracije sitnijih frakcija u porni prostor, smanjenja zapreminskih dimenzija pojedinih frakcija kao i promene biološkog i hemijskog sastava pojedinih komponenti otpada. Sve ove promene, u neku ruku su uključene i u mehanizam sleganja komunalnog otpada. Takođe, debljina nadsloja može da utiče i na pojavu efekta “armiranog tla”. Sa povećanjem zapreminske težine, povećavaju se i dodirne površine između komponenata, što izaziva i porast napona smicanja. U nekim slučajevima, mogući su i suprotni efekti, na šta ukazuje Kölsch (1996). Naime, usled predopterećenja, neke frakcije u otpadu se mogu sabiti i deformisati, tako da u odnosu na posmatranu ravan, može doći do znatnog smanjenja ili čak do gubljenja efekta “armiranog tla” (Slika 6.7). Na ovaj način potencijalno se smanjuje i čvrstoća smicanja.

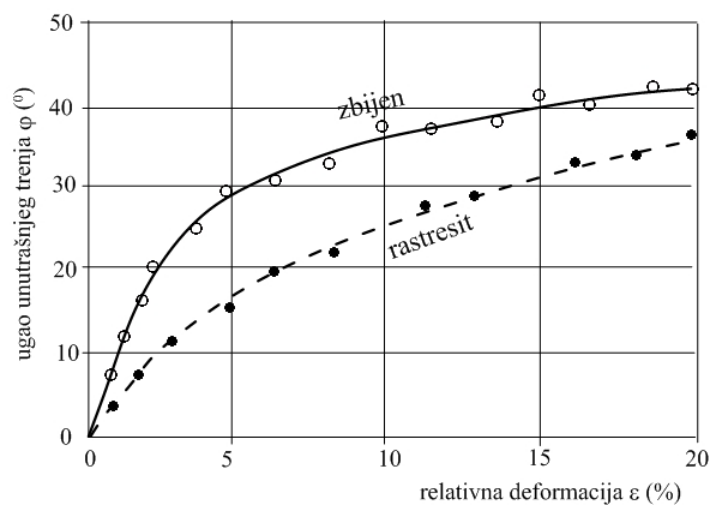


Slika 6.7. Smanjenja čvrstoće smicanja usled povećanja debljine nadsloja (Kölsch, 1996)

6.2.6. Način odlaganja

Kod otpada koji se odlaže u slojevima odnosno kasetama, koje se razdvajaju dnevnim prekrivkama, ne dolazi do izraženog mešanja različitih materijala iz susednih kaset (npr. hartije, plastike itd.), već do mešanja dolazi unutar samog sloja, odnosno kasete. Iz tog razloga, čvrstoća smicanja između faza formiranja kasete, odnosno formiranja pojedinačnih slojeva, može biti znatno manja nego čvrstoća čitave deponije. Na taj način je armirajući efekat isprekidan, što dovodi i do smanjenja čvrstoća smicanja čitave deponije, i do eventualnih pojava površina potencijalnog klizanja. Pored toga, korišćenjem mehanizacije za sabijanje i razastiranje, dolazi do kidanja i usitnjavanja pojedinih komponenata otpada, što opet može da umanja efekat armiranja. Osim toga, ukoliko se otpad na deponijama ne prekriva na odgovarajući način, dolazi do infiltracije vode (usled padavina) u deponiju, što može da ugrozi njenu stabilnost povećanjem pornog pritiska, i smanjenjem efektivnih normalnih napona.

Poznato je da čvrstoća smicanja u mnogome zavisi od vrste ispitivanog materijala otpada. Međutim, Manassero i dr. (1997) su pokazali da ona zavisi i od veličine normalnih napona. Naime, kada se komunalni otpad izloži većim normalnim naponima on postaje krući i daje veće parametre čvrstoće smicanja (Slika 6.8). Na taj način, dolazi do međusobnog mešanja, odnosno sabijanja materijala formiranjem “uklještenja”, što je bitan parametar čvrstoće smicanja otpada.



Slika 6.8. Uticaj zbijanja na mobilisani ugao unutrašnjeg trenja komunalnog otpada (Manassero i dr. 1997)

6.2.7. Veličina i oblik čestica

Na veličinu čvrstoće smicanja otpada, pored vrste materijala veliki uticaj ima i sadržaj tla, pa se iz tih razloga rezultati mogu znatno razlikovati, naročito kad se ispitivanje izvodi na manjim uzorcima. Tako npr. Siegel i dr. (1990) su vršili opite direktnog smicanja na uzorcima prečnika 106 mm od mešovitog otpada, i dobili su vrednosti ugla unutrašnjeg trenja u izuzetno velikom rasponu od 39° pa čak do 81° . Ispostavilo se da je na komunalnom otpadu sa više uglastih čestica, dobijena znatno veća vrednost ugla unutrašnjeg trenje. Pored toga, kao jedan od mogućih razloga povećane čvrstoće smicanja, autori navode veliku nezaobljenost čestica otpada.

Del Greco i Oggeri (1997) ukazuju na uticaj raznovrsnosti opita koji se izvode, kao i korišćenje nestandardnih aparata, ali i oblika čestica komunalnog otpada. Oni smatraju da otpad ne predstavlja partikularnu sredinu, bez obzira što je rastresit i izrazito heterogenog sastava.

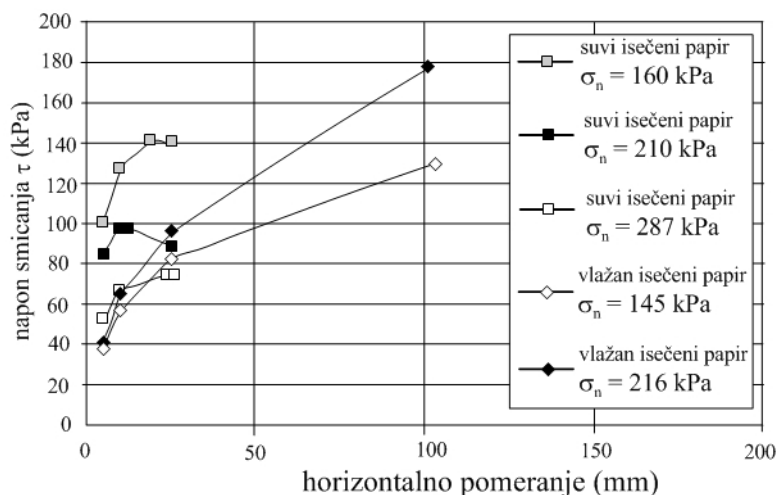
Scheelhaase i dr. (2001) su ispitivali komunalni otpad koji je prethodno bio mehanički i biološki pripremljen. Zahvaljujući prethodnoj mehaničkoj pripremi, kao i procesu biološke razgradnje, veličina čestica je smanjena. Autori su na račun ovog smanjenja veličine čestica očekivali umanjeni uticaj armirajućih čestica na vrednost kohezije. Međutim, zaključili su da se kohezija armirajućih čestica, mobilise pre aktiviranja ugla unutrašnjeg trenja, pri relativno malim deformacijama.

6.2.8. Fazni sastav

Vlažnost

U literaturi je malo podataka na osnovu kojih se mogu izvući jasni zaključci vezani za uticaj vlažnosti na čvrstoću smicanja komunalnog otpada. Po pravilu, provlažavanjem komunalnog otpada dolazi do omekšavanja pojedinih sastojaka u njemu (npr. hartije, drveta itd.), pa se na taj način očekuje i smanjenje čvrstoće smicanja. Međutim, sa povećanjem vlažnosti, povećava se i zapreminska težina otpada, koja može da utiče na povećanje čvrstoće smicanja. Pelkey i dr. (2001) su vršili ispitivanja čvrstoće smicanja na uzorcima komunalnog otpada koji su prethodno bili provlašeni filtratom u aparatu za

direktno smicanje, i u poređenju sa rezultatima prirodno vlažnog otpada, provlašeni je pokazao manju čvrstoću. Isti autori su vršili ispitivanja i na usitnjenom papiru, u suvom i vlažnom stanju (Slika 6.9). Za razliku od suvog usitnjenog papira, kod koga je došlo do loma pri relativno malim pomeranjima, kod vlažnog papira, ni nakon relativno većih pomeranja, nije izražen lom. Nažalost, u radu se ne navodi veličina frakcije papira na kojoj su vršeni opiti, da bi se rezultati mogli dalje tumačiti.



Slika 6.9. Dijagrami smicanja suvog i provlaženog papira (Pelkey i dr. 2001)

Lendva i Clark (1990) smatraju da jedan od uzroka smanjenja čvrstoće smicanja na samoj deponiji, može da bude i procurivanje filtrata duž horizontalnih i kosih kontakata slojeva otpada i dnevnih prekrivki, čija je vodopropustljivost znatno manja. Ovakva procurivanja, u nekim slučajevima, mogu da prouzrokuju unutrašnju eroziju koja u krajnjem slučaju dovodi do nestabilnosti kosine. Do sličnih zaključaka su došli i Koerner i Soong (2000), kada su u pitanju strme kosine na deponijama kanjonskog tipa, koje su provlašene filtratom. I u ovom slučaju, porni pritisci koji se javljaju usled porasta nivoa filtrata, mogu da izazovu privremenu nestabilnost a kasnije i lom tj. klizanje kosine deponije.

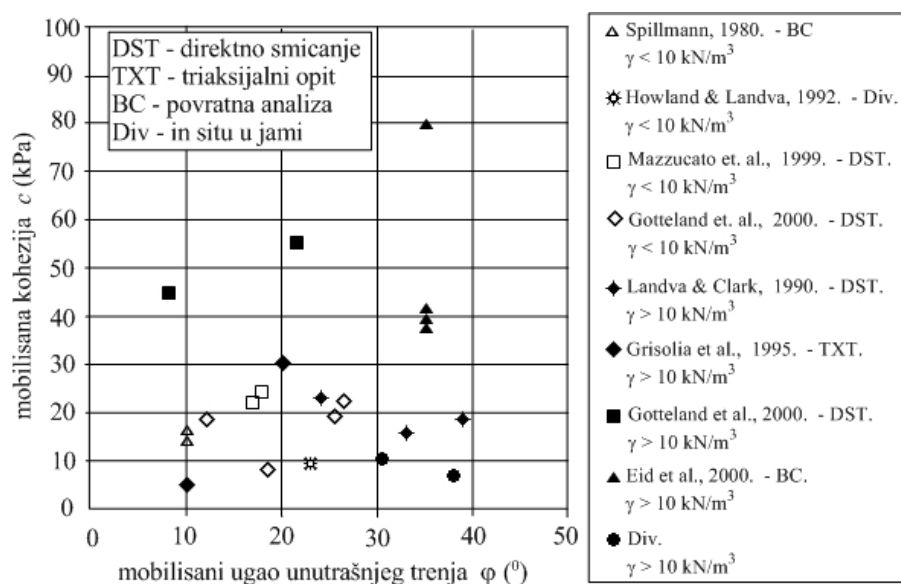
Sadržaj organskih materija

Howland i Landva (1992) ističu određene poteškoće kod određivanja čvrstoće smicanja, kada je u pitanju organski sadržaj i sadržaj armirajućih čestica komunalnog otpada. S jedne strane, čvrstoća komunalnog otpada se povećava sa porastom normalnih napona

usled nanošenja otpada, dok s druge strane, otpad koji ima veliki sadržaj organskih i armirajućih čestica, ponaša se više kao treset nego kao prirodno tlo. Procesi degradacije vremenom smanjuju organske materijale u deponiji usled truljenja, dok armirajuće čestice, nerazgradivi elementi, ostaju manje ili više nepromenjeni. Iz tih razloga se mogu očekivati promene geotehničkih svojstava otpada, naročito kada je u pitanju stišljivost.

Zapreminska težina

Prema odabranim literaturnim podacima (Dixon i dr. 2004), vrednosti parametara čvrstoće smicanja (c i ϕ) u zavisnosti od zapreminske težine i način ispitivanja, prikazani su na Slici. 6.10. Radi pojednostavljenja, na slici su prikazane vrednosti parametara čvrstoće smicanja u odnosu na zapreminsku težinu uzoraka, veću ili manju od 10 kN/m^3 . Opšti je zaključak da parametri čvrstoće smicanja imaju tendenciju porasta sa povećanjem zapreminske težine. To je naročito izraženo kod rezultata dobijenih opitima direktnog smicanja i iz rezultata povratnih analiza.

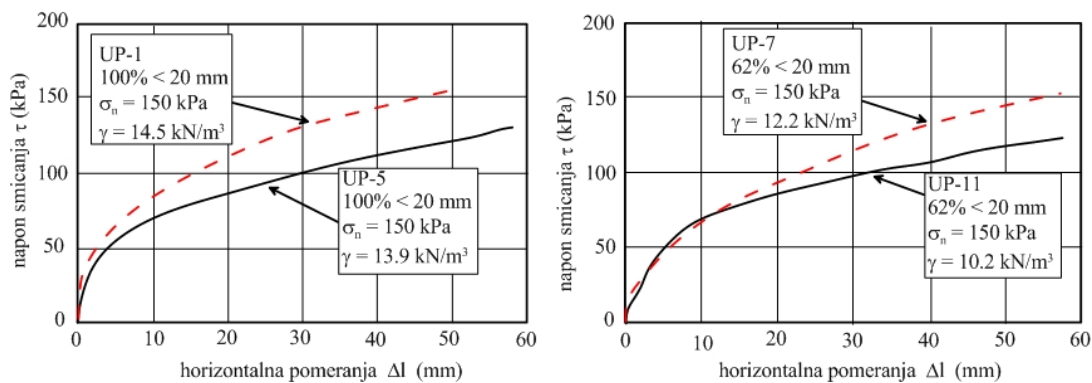


Slika 6.10. Zavisnost kohezije i ugla unutrašnjeg trenja od zapreminske težine (Dixon, i dr. 2004)

Kavazanjian i dr. (1999) su istraživali efekat „rekonstitucije“ (ponovnog formiranja uzorka zbijanjem) na čvrstoću smicanja komunalnog otpada. Oni su rekonstituisali dva identična uzorka, ali sa različitim početnih zapreminskim težinama (90% i 70% u odnosu na utvrđenu zapreminsku težinu in situ). Uzorke su konsolidovali do in situ

vertikalnih napona i na tako pripremljenim uzorcima su izvršili opite direktnog smicanja. Rezultati su pokazali da su se uzorci ponašali vrlo slično, nezavisno od početne rekonstituisane zapremine težine.

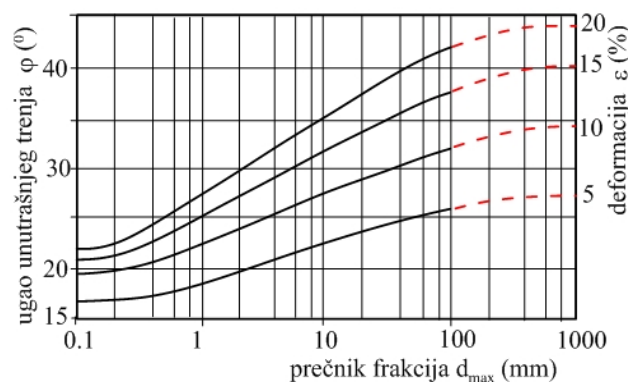
Uticao zapremine težine na čvrstoću smicanja komunalnog otpada, istraživao je i Zekkos (2005). Ispitivanja je vršio na uzorcima komunalnog otpada istog sastava sa 100% i 62 % frakcija sitnijih od 20 mm. Smicanje je obavljeno u aparatu za direktno smicanje dimenzija 30 x 30 x 18 cm. Rezultati ispitivanja su prikazani su na Slici 6.11 i pokazuju da se sa povećanjem zapremine težine, povećava i čvrstoća smicanja komunalnog otpada.



Slika 6.11. Uticaj zapremine težine i veličine frakcija na čvrstoću smicanja (Zekkos, 2005)

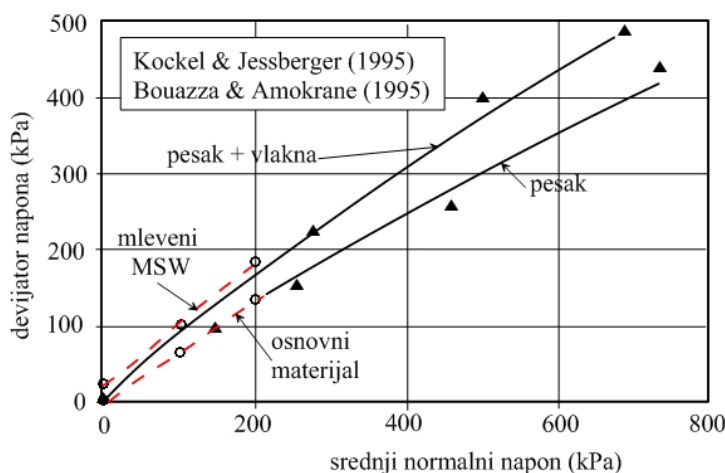
Granulometrijski sastav

Manassero i dr. (1997) su analizirali uticaj granulometrijskog sastava na parametre čvrstoće smicanja komunalnog otpada (Slika 6.12). Ispitivanja su vršili na mlevenom (usitnjenom) komunalnom otpadu i upoređivani su sa rezultatima dobijenim na zrnasto-armirajućim osnovnim materijalima (Slika 6.13).



Slika 6.12. Uticaj granulometrijskog sastava na ugao unutrašnjeg trenja (Manassero i dr. 1997)

Oni konstatuju da komunalni otpad ne pokazuje značajnu bilinearnu anvelopu loma u odnosu na „armirano tlo“. To objašnjavaju činjenicom da su plastične frakcije različite dužine i deformacionih karakteristika „armirale“ mešavinu otpada. Prema Kockel i Jessberger (1995) relativno ujednačeni rezultati ispitivanja (pri vrlo velikim deformacijama), upućuju na pretpostavku o „linearnoj anvelopi loma“ pri definisanju mobilisanih parametara čvrstoće smicanja.



Slika 6.13. Anvelopa loma za različite materijale (Manassero i dr. 1997)

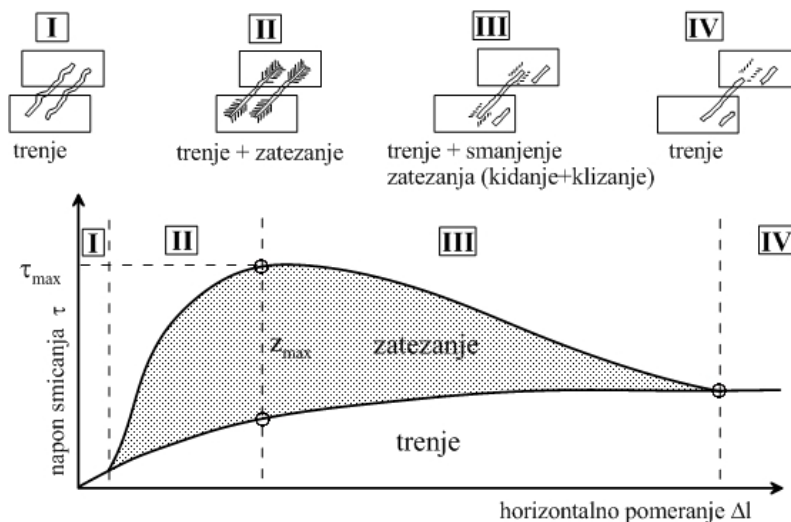
Sa Slike 6.13 se vidi da je anvelopa loma kod mlevenog komunalnog otpada, približno paralelna anvelopi loma osnovnog materijala. Stoga autori smatraju da „armiranje“ ne utiče na frikciona svojstva zemljastog materijala, već povećava vrednost prividne kohezije (za razliku od osnovnog materijala gde kohezije nema), što bi mogao biti znak da se mleveni i usitnjeni otpad, ponašaju kao koherentni materijali.

Treba reći da i prilično krupni fragmenti u otpadu uslovljavaju velike uzorke, a na taj način i opremu koja omogućava veća horizontalna pomeranja.

6.2.9. Armirajuće čestice

Smatra se da vlaknaste čestice komunalnog otpada imaju „armirajuća“ svojstva, naročito materijali kao što su plastika, papir, guma, tekstil i dr. Ovaj efekat „armiranja“ je posledica povećanja vezivnih ojačanja – „uklještenja“ usled dejstva normalnih sila na armirajući element i postojanja zatezne čvrstoće samog materijala. Na osnovu terenskih

rezultata opita statičke penetracije, koje je izvršio Kölsch u svežem otpadu, zaključeno je da je “armirajući efekat” materijala gotovo u potpunosti uništen nakon njegovog usitnjavanja, tako da je utvrđena niska vrednost ugla unutrašnjeg trenja. On ponašanje komunalnog otpada objašnjava na način kako je to prikazano na Slici 6.14.

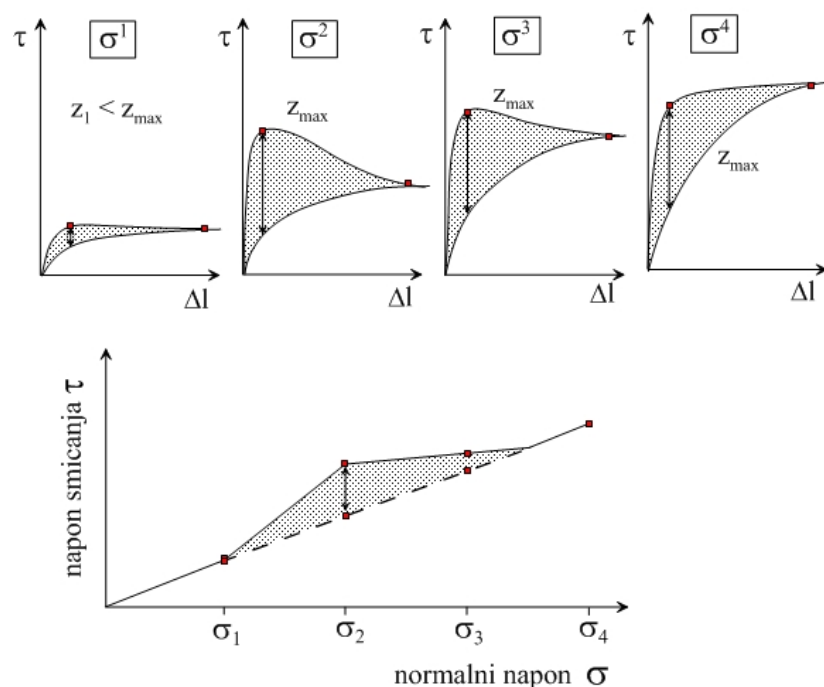


Slika 6.14. Ponašanje komunalnog otpada pri opitu smicanja (Kölsch, 1996)

Tokom početne faze smicanja (I), javlja se samo trenje, prouzrokovano porastom deformacija. U drugoj fazi (II), napon smicanja u armirajućim česticama raste pa pored povećanja napona od sile trenja, povećava se i napon od sile zatezanja koja izaziva efekat sličan armiranju. U trećoj fazi (III), nakon dostizanja maksimalnog smičućeg napona (τ_{\max}) nastaje prekoračenje čvrstoće zatezanja koje izaziva kidanje ili klizanje armirajućih čestica. Daljim deformisanjem, udeo napona zatezanja je sve manji i u jednom trenutku iščezava, tako da ostaje samo napon od sile trenja (IV).

Na Slici 6.15 prikazana je potencijana raspodela napona izazvana trenjem i zatezanjem-armiranjem. Sa slike se vidi da je uticaj normalnih napona vrlo značajan. Porast normalnih napona izaziva povećanje vezivnih ojačanja armirajućih elemenata, a time i smičuće čvrstoće. Uticaj pojedinih armirajućih čestica u otpadu, ograničen je njihovom čvrstoćom na istezanje. Pri najnižem normalnom naponu σ^1 , javlja se samo mala sila zatezanja, dok se sa povećanjem normalnog napona sila zatezanja u armirajućim česticama povećava i dostiže maksimum pri normalnom naponu σ^2 . Sa daljim povećanjem normalnog napona, čvrstoća smicanja se povećava samo zbog povećanja

trenja, što znači da se pri određenom normalnom naponu, kada vrednost napona zatezanja dostigne maksimum, javljaju različiti međusobni uticaji sile trenja i zateznih sila, koji utiču na ukupnu čvrstoću smicanja komunalnog otpada. To znači da u određenom intervalu normalnih napona ($\sigma^1 \leq \sigma \leq \sigma^4$), dominantni uticaj na čvrstoću smicanja imaju sile zatezanja. Sile trenja se ponovo aktiviraju nakon prekoračenja sila zatezanja, pri određenom normalnom naponu σ^4 . U tom rasponu normalnog napona, u kojem dominiraju sile zatezanja, anvelopa loma ispoljava određenu konveksnost, što je karakteristično za armirajuće čestice. Veličina i širina ovog konveksnog dela anvelope zavisi od pojedinačnih osobina materijala (količine i čvrstoće armirajućih čestica, njihovih frikcionih karakteristika).

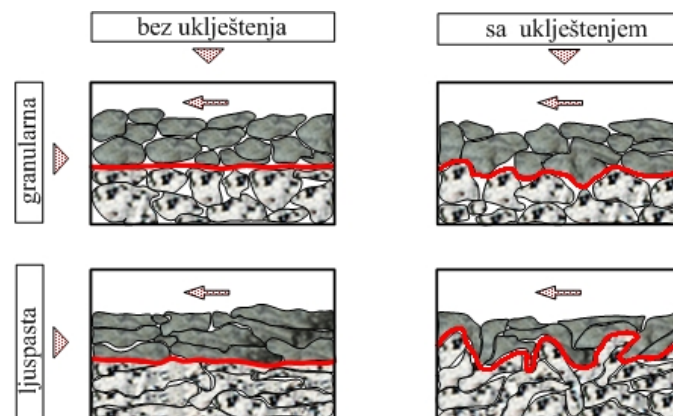


Slika 6.15. Povećanje čvrstoće smicanja zbog efekta armiranja (Kölsch, 1996)

Prikazani model podrazumeva da su armirajuće čestice u stanju da prenesu sile zatezanja i van zone deformisanja – ravni smicanja. To takođe podrazumeva da razvoj sila zatezanja u armirajućim česticama zavisi i od veza u njima, tj. od normalnih napona kao i od ugla između ravni smicanja i orijentacije armirajućih čestica. Gotteland i dr. (2000) su vršili opite smicanja na industrijskom otpadu i komunalnom otpadu. Neki uzorci industrijskog otpada su imali veliku količinu sitnih sastojaka, dok su se u komunalnom otpadu nalazile velike količine plastike za koju se smatra da utiče na

“armirajući efekat” otpada. Rezultati su potvrdili tu pretpostavku, jer je dobijen veći ugao unutrašnjeg trenja kod komunalnog otpada.

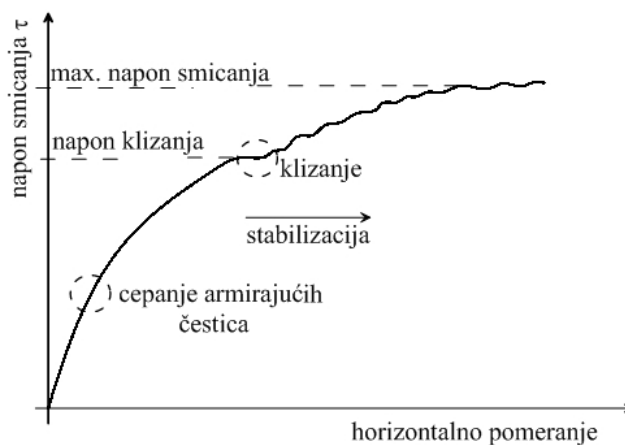
Struktura otpada na deponijama se vremenom menja i njegovo ponašanje se u početku može poistovetiti sa rastresitim, nevezanim materijalima, dok u kasnijim stadijumima degradacije, ljspaste i izdužene frakcije se po pravilu horizontalno orijentišu. To znači da se kod relativno mladog otpada trenje javlja isključivo na kontaktnim površinama pojedinačnih frakcija. U tom slučaju napon smicanja, koji se javlja duž pojedinačnog elementa rastresitog materijala, predstavlja idealizovanu ravan smicanja duž čitavog materijala. Međutim, ravan smicanja kod otpada pa i nevezanih materijala, po pravilu nije glatka, već je to „nazubljena“ ravan duž koje postoje „uklještenja“, koja se formiraju usled rotacije i izdizanja pojedinih zrna, pa samim tim zavisi i od orijentacije pojedinačnih frakcija u samom otpadu. To znači da kod komunalnog otpada koji u sebi sadrži ljspaste i izdužene čestice, pored povećanja čvrstoće usled efekta armiranja, do povećanja čvrstoće dolazi i zbog značajnijeg povećanja kontaktnih površina (Slika 6.16).



Slika 6.16. Povećanje frikcije zbog efekta “uklještenja” (Kölsch, 1996)

Čvrstoća smicanja rastresitih materijala se određuje tako što se pretpostavlja da u toku smicanja ne dolazi do deformisanja samih čestica, a to znači da je sila smicanja koja deluje duž njihovih površina, manja od čvrstoće samih čestica. Međutim, kod komunalnog otpada se pojavljuje i dodatna čvrstoća smicanja koja je nezavisna od sila trenja između čestica, a javlja se usled pojave zateznih sila koje ispoljavaju armirajući materijali. Sposobnost otpada da obrazuje stabilne strme, čak i vertikalne nagibe kosina,

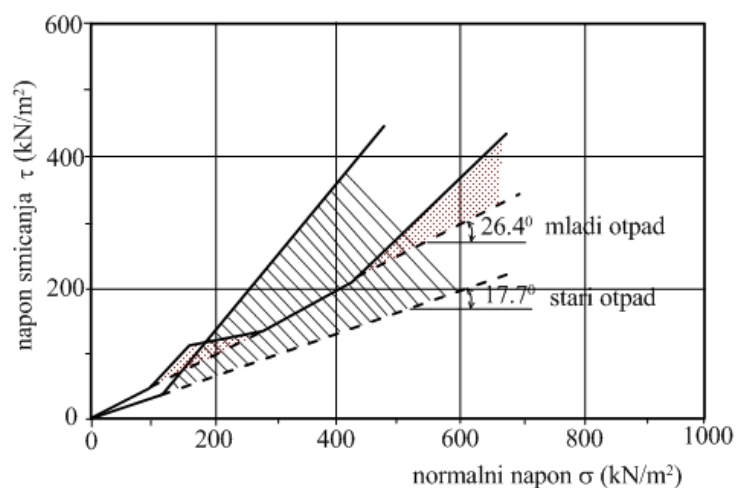
upravo se pripisuje zateznim silama armirajućih materijala. U jednom ranijem radu, Kölsch (1993) je prikazao karakteristični model ponašanja armirajućih čestica otpada, prilikom ispitivanja čvrstoće smicanja (Slika 6.17). Autor objašnjava da se kidanje armirajućih čestica, koje se vidi u prelomnim tačkama dijagrama smicanja, moglo čuti za vreme opita, ali samo kod uzoraka koji su smicani pod normalnim naponima većim od 200 kPa. Na osnovu toga je zaključeno da armirajuće čestice u otpadu ispoljavaju manje zatezne sile pri nižim nivoima normalnih napona. Treba napomenuti da su ova ispitivanja izvedena na uzorku otpada čiji je procentualni maseni deo iznosio: 28 % peska, 62 % hartije i 10 % plastike.



Slika 6.17. Model opita smicanja otpada; karakteristično ponašanje tokom smicanja (Kölsch, 1993)

Sa dijagrama se može zapaziti da u određenim zonama, sa porastom deformacija, smičući napon neko vreme ostaje ustaljen, tj. dolazi do pojave klizanja u samom materijalu, što je okarakterisano pojavom tzv. „kliznog napona smicanja“. Takođe je konstatovano da međusobni odnos „kliznog napona smicanja“ i normalnog napona kod armirajućih materijala diskontinualan, za razliku od nevezanih-zrnastih materijala tla (Slika 6.18). Pored toga, obvojnica pokazuje izvesne „prelome“ pri određenim vrednostima normalnih napona, u kojima je konstatovano kidanje armirajućih čestica (pretpostavlja se da je to oko 200 kPa za hartiju, a oko 500 kPa za plastiku). Na ispitivanom uzorku starog otpada, koji sadrži samo plastične frakcije, konstatovan je samo jedan prelom, dok na uzorku usitnjenog otpada preloma nije bilo. Sve to navodi na zaključak da su sile zatezanja u armirajućim materijalima komunalnog otpada, odgovorne za porast napona smicanja u određenim granicama normalnog napona, što dovodi do neujednačenog odnosa normalnog i smičućeg napona.

Manassero i dr. (1997) ističu opštu pretpostavku da je komunalni otpad ujednačenog sastava, u izvesnom delu deponije (minimalna reprezentativna zapremina), a da su armirajući elementi u tom delu najčešće neravnomerno raspoređeni, tako da se otpad može smatrati izotropnim materijalom. Autori navode da su Kockel i Jessberger (1995) pokazali da je za osnovni, matični materijal frikcionog tipa, maksimalna vrednost mobilisanog ugla unutrašnjeg trenja φ_{mob} između 42° i 45° , i da se aktivira pri vrlo velikim deformacijama ali sa malim uticajima armirajućih elemenata. Aktiviranje „prividne kohezije“ zavisi od armirajućih elemenata i mogla bi se definisati kao „kohezija koja potiče od čvrstoće na zatezanje“.



Slika 6.18. Model opita smicanja otpada; obvojnice loma - linije smicanja (Kölsch, 1993)

Međutim, treba imati u vidu da velike deformacije po pravilu i počinju sa $\varepsilon > 20\%$, kada je ugao unutrašnjeg trenja φ_{mob} skoro u potpunosti mobilisan. Usitnjeni komunalni otpad ima pravolinijsku envelopu loma, uglavnom zbog činjenice da plastične frakcije koje su imale ulogu armirajućih materijala, imaju drugačije naponsko-deformacijske karakteristike. Međutim, ovakav rezultat se može smatrati neočekivanim, zato što anvelopa loma datog materijala ima tendenciju spuštanja pri vrlo malim naponima.

Jessberger (2001) takođe pretpostavlja da se znatni deo čvrstoće smicanja mobilise pri velikim deformacijama, što je slično „armiranom tlu“. Predpostavlja se da vlaknasti materijali u otpadu (plastika, tkanine, hartija ili karton, guma, drvene grančice) mogu da deluju kao „armatura“ mešovitog otpada i da se u tom slučaju u obzir može uzeti i

postojanje „prividne kohezije“, slično kao i kod armiranog tla. Zato se komunalni otpad smatra složenim materijalom koga čine dve komponente: prvu čini osnovni sitnozrni i srednjezrni materijal većinom zemljastog porekla, koji ispoljava frikционе karakteristike i drugu tj. „armirajući materijal“ koji sadrži ljuspaste i vlaknaste čestice koje trpe napone zatezanja. U tom slučaju, model komunalnog otpada je sličan modelu armiranog tla sa česticama različite orijentacije.

6.3. LITERATURNI PODACI ISPITIVANJA ČVRSTOĆE SMICANJA

Za definisanje čvrstoće smicanja komunalnog otpada tj. parametara čvrstoće smicanja koji je opisuju, koriste se različiti pristupi i mogu se svrstati u tri grupe:

- izvode se laboratorijska ispitivanja na malim ili velikim uzorcima u standardnim aparatima ili u aparatima koji se posebno izrađuju
- izvode se in-situ opiti na samim deponijama
- vrše se procene parametara čvrstoće smicanja na osnovu povratnih analiza stabilnosti na utvrđenim kliznim telima ili nestabilnim kosinama deponije u statičkim i dinamičkim uslovima

U vezi sa tim, u nastavku teksta, prvo su prikazane vrednosti parametara čvrstoće smicanja koje su dobijene laboratorijskim i in situ ispitivanjima, a nakon toga se daje kraći osvrt na rezultate dobijene povratnim analizama.

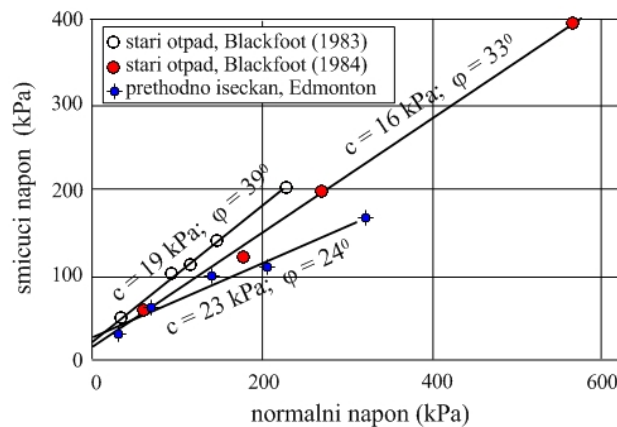
6.3.1. Literaturni podaci vezani za laboratorijska i in situ ispitivanja

6.3.1.1. Opiti direktnog smicanja

Parametri čvrstoće smicanja komunalnog otpada, prvi put se javljaju u radu Fang i dr. (1977) a dobijeni su iz opita jednoaksijalne kompresije. Detaljnije su opisani u radu Landva i Clark, (1990). Treba napomenuti da su u zavisnosti od korišćenog pristupa, parametri čvrstoće smicanja određivani i preko ukupnih i preko efektivnih napona, a najčešće je korišćena Kulon-Morova odnosno, Kulon-Mor-Tercagijeva teorija loma.

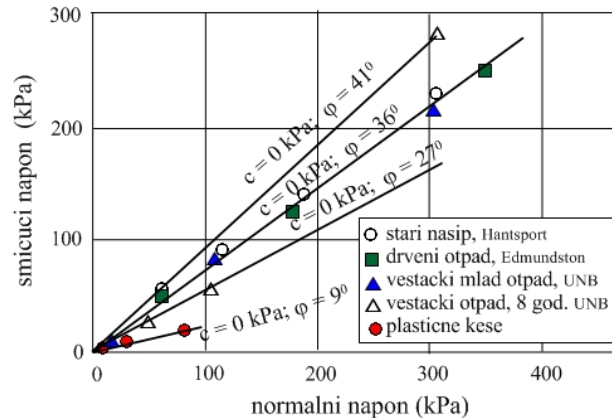
Landva i Clark (1986) su vršili drenirane opite direktnog smicanja u aparatu velikih dimenzija (434 x 287 mm), sa brzinom smicanja od 1.5 mm/min. Kada su u pitanju

uzorci starog otpada, na kojima su ispitivanja izvedena prvi put, dobijen je efektivni ugao unutrašnjeg trenja $\varphi' = 38-42^{\circ}$, i vrednost efektivne kohezije u rasponu od $c' = 16-19$ kPa. Nakon izvršenih ispitivanja, material je sačuvan u plastičnim kontejnerima i ponovo je testiran nakon godinu dana. Dobijen je neznatno manji ugao unutrašnjeg trenja od $\varphi' = 33^{\circ}$, a kohezija je zadržala donju vrednost od $c' = 16$ kPa (Slika 6.19). Autori navode da je ovo neznatno smanjenje ugla unutrašnjeg trenja, najverovatnije rezultat dodatnog raspadanja (potvrđeno prisustvom gasa i mirisa), ali da se i dalje njegova vrednost kreće u prethodno dobijenim granicama, tako da smanjenje ne treba direktno povezati sa efektima dekompozicije materijala.



Slika 6.19. Rezultati opita direktnog smicanja u velikoj razmeri – otpad iz Kanadskih deponija (Landva i Clark, 1990)

Isti autori su 1990. izvršili i dodatna ispitivanja komunalnog otpada takođe u velikom aparatu za direktno smicanje i dobijene su vrednosti ugla unutrašnjeg trenja u rasponu $\varphi' = 24-41^{\circ}$ i vrednosti kohezije u rasponu $c' = 0-23$ kPa (Slika 6.20). Ovo smanjenje ugla unutrašnjeg trenja na $\varphi' = 24^{\circ}$, objašnjeno je velikim sadržajem frakcija od iskidanih listićastih i vlaknastih delova plastike koji, pod dejstvom normalnih napona, imaju tendenciju slaganja u pravcu smicanja. Zato su urađeni i posebni opiti direktnog smicanja na plastičnim kesama koje su složene horizontalno, kako bi se smicanje obavilo duž njihovih površina. Na ovako pripremljenim uzorcima, dobijen je ugao unutrašnjeg trenja od svega $\varphi' = 9^{\circ}$.

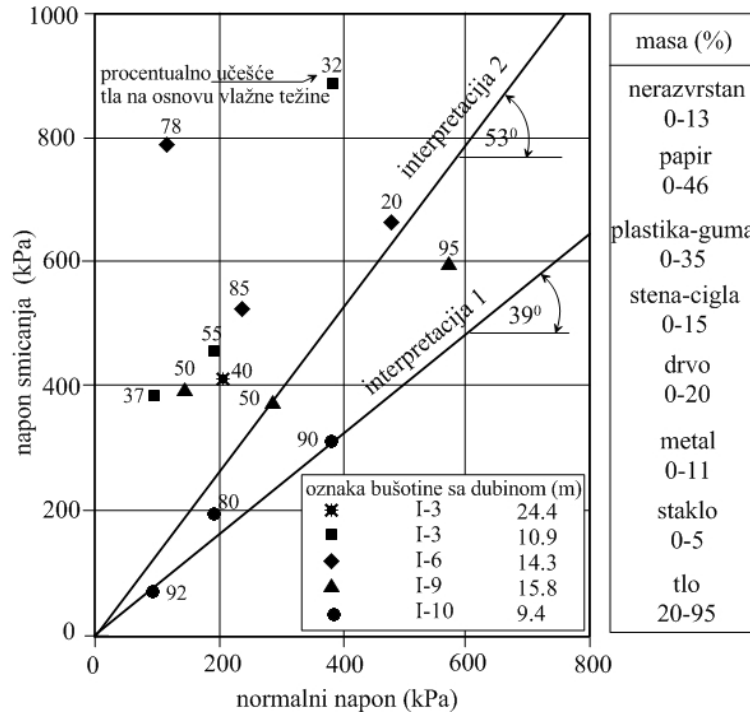


Slika 6.20. Naknadni rezultati opita direktnog smicanja u velikoj razmeri - otpad iz Kanadskih deponija (Landva i Clark, 1990)

Siegel i dr. (1990) su određivali čvrstoću smicanja prema ASTM D 3080-72 standardima u konsolidovanim dreniranim uslovima, na uzorcima prečnika od 130 mm i visine od 76 do 102 mm. Uzorci otpada dobijeni su istražnim bušenjem na staroj lokaciji deponije u Los Anđelesu i to na dubinama od 4.6 do 25 m. Sastav uzoraka otpada bio je izrazito heterogen, a obuhvatao je razne tekstile, hartiju, plastiku, stene, cigle, metal, staklo, a najveći procenat masenog udela zauzeo je zemljasti materijal-tlo (od 20 – 95 %). U okviru zemljastog materijala, klasifikovan je i različiti raspadnuti materijal koji nije mogao lako da se odvoji od zemlje. Na svim ispitanim uzorcima, maksimalna i vršna čvrstoća smicanja su određivane na osnovu pomeranja koja su prelazila 10 % prečnika uzorka. Na Slici 6.21 se može videti da su se kod svih 5 izvedenih opita uzorci znatno razlikovali po sastavu. Iz tog razloga su i dijagrami smicanja (odnos napona smicanja prema smičućem pomeranju) bili veoma različiti. Imajući u vidu raznovrsnost otpada, autori su predložili vrednosti ugla unutrašnjeg trenja u rasponu od $\varphi' = 39-53^{\circ}$, uz pojednostavljeno zaključivanje da komunalni otpad nema koheziju. Donja vrednost ugla unutrašnjeg trenja usvojena je na osnovu minimalnih vrednosti smičućih napona svih ispitanih uzoraka, dok su kod predloga gornje vrednosti ugla unutrašnjeg trenja, zanemareni uzorci koji su imali relativno veliko procentualno učešće zemljastog materijala. Pokazalo se da su predložene vrednosti, znatno veće u odnosu na nešto ranije objavljene (Landva i Clark, 1990).

Howland i Landva (1992) su izveli drenirane opite direktnog smicanja na uzorcima otpada starosti od 10 do 15 godina, u aparatu dimenzija 432 x 279 mm. Predložene su

vrednosti parametara čvrstoće smicanja koje odgovaraju prirodnim uslovima u deponiji i to za ugao unutrašnjeg trenja $\varphi' = 33^\circ$, a za koheziju $c' = 17$ kPa.



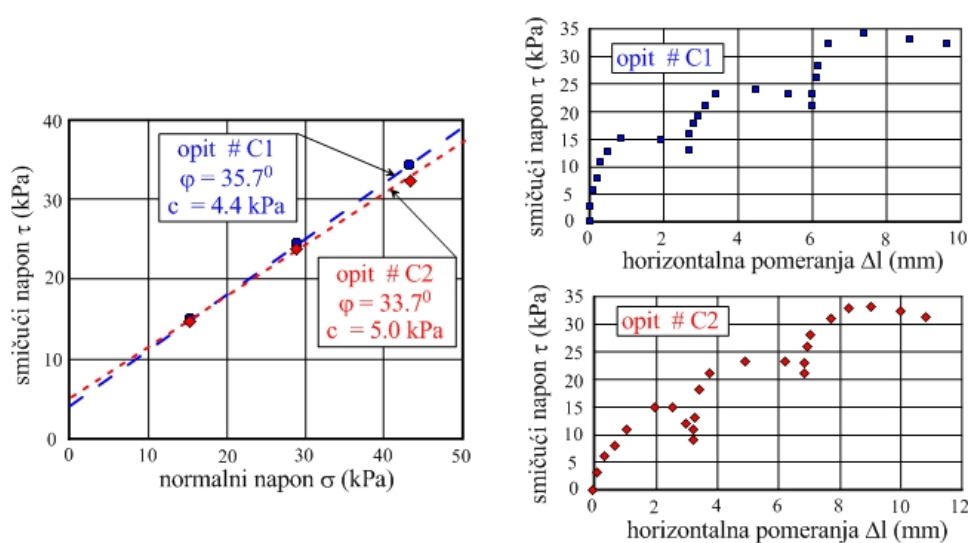
Slika 6.21. Rezultati opita direktnog smicanja u zavisnosti od sastava otpada (Siegel i dr. 1990)

Gabr i Valero (1995) su takođe vršili ispitivanja na komunalnom otpadu starosti od 15 do 30 godina u aparatu za direktno smicanje, na valjkastim uzorcima prečnika 63.5 mm i debljine 23 mm i suve zapreminske težine $\gamma_d = 10.0 - 12.1$ kN/m³. Prethodno je izvršena priprema uzorka, kako bi se odstranile frakcije otpada krupnije od 6.3 mm. Dobijene su vrednosti ugla unutrašnjeg trenja (takođe pri horizontalnim deformacijama većim od 10 % prečnika uzorka) u rasponu od $\varphi' = 20 - 39^\circ$, a kohezije u rasponu od $c' = 0 - 28$ kPa.

Gotteland i dr. (1995) su vršili drenirane opite direktnog smicanja na zbijenim i neporemećenim uzorcima komunalnog otpada. Zbijanje je izvršeno direktno u kutijama aparata i tom prilikom je ustanovljeno da se materijal vrlo lako sabija, s obzirom da je bilo neophodno dodavanje veće količine materijala kako bi se dobila dovoljna debljina uzorka za smicanje. Neporemećeni uzorci su uzeti direktno na terenu iz istražnih jama sa dimenzijama koje su približno odgovarale dimenzijama aparata (1.0 x 1.0 x 0.7 m), s

tim da su zbog određenih poteškoća oko ugradnje, na uzorcima izvršene i dodatne pripreme. Autori su ustanovili da postoji dobra saglasnost rezultata opita izvršenog na zbijenim i neporemećenim uzorcima. U oba slučaja, pri horizontalnim pomeranjima od 35 %, nisu dobijene vršne vrednosti, tj. ni pri većim normalnim naponima na dijagramima smicanja nije bio izražen jasan lom. U vezi sa tim, za kriterijum loma usvojena je horizontalna deformacija od $\Delta l = 0.2$ m (autori u stvari usvajaju relativnu deformaciju od 20 %, pozivajući se na ranije rezultate koje su objavili Oweis i Khera, 1990; Gotteland i dr. 1995). Dobijene su vrednosti ugla unutrašnjeg trenja $\varphi' = 38 - 46^\circ$, odnosno, vrednosti kohezije $c' = 0 - 20$ kPa. Ovako dobijene vrednosti su nešto veće od vrednosti koje su ranije predlagali Howland i Landva (1992). Kako su opiti izvedeni na uzorcima velikih dimenzija, autori smatraju da je za proračun napona smicanja realnije da se izvrši korekcija površine smicanja.

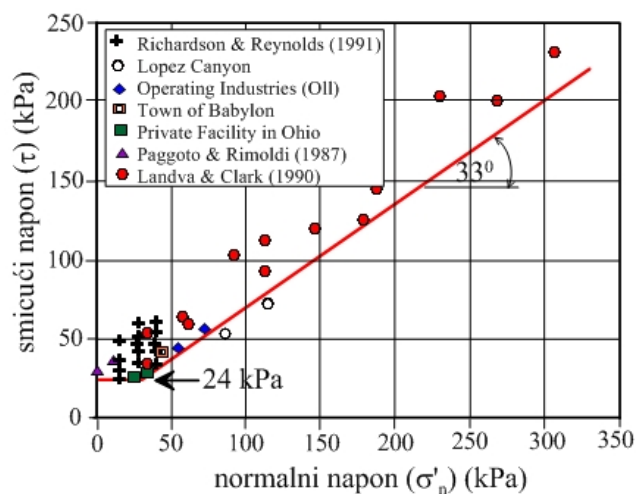
Houston i dr. (1995) su izvršili dva opita direktnog smicanja u velikom aparatu sa dimenzijama kutija od 1.22 x 1.22 m. Opiti su vršeni na samoj deponiji (u pitanju je regionalna deponija u ruralnom severozapadnom delu Maricopa – Arizona), sa stupnjevitim povećanjem normalnog napona u trenutku pada napona smicanja. Rezultati su prikazani na Slici 6.22 i na njoj se može videti da je za oba izvršena opita dobijen približno isti ugao unutrašnjeg trenja $\varphi' = 34 - 36^\circ$, sa relativno malom kohezijom $c' = 4.4 - 5.0$ kPa.



Slika 6.22. In situ opiti direktnog smicanja u aparatu velikih dimenzija (Houston i dr. 1995)

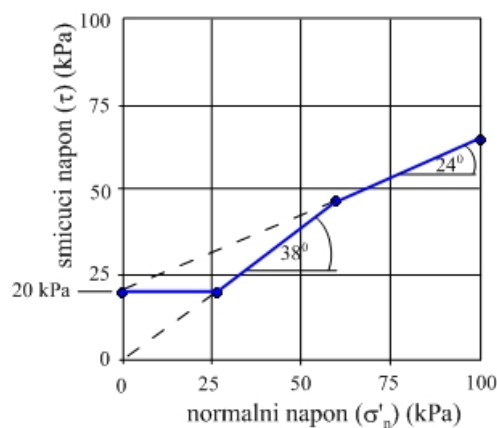
Na osnovu rezultata laboratorijskih ispitivanja na neporemećenim-nezbijenim uzorcima otpada i na osnovu izvršenih povratnih analiza na kosinama postojećih deponija, Kavazanjian i dr. (1995) su predložili sledeće vrednosti parametara čvrstoće smicanja u zavisnosti od efektivnog normalnog napona:

- za normalne efektivne napone $\sigma_n' < 30$ kPa, komunalni otpad se ponaša kao čisto „kohezivni“ materijal sa $c' = 24$ kPa,
- za normalne efektivne napone $\sigma_n' > 30$ kPa, komunalni otpad se ponaša kao čisto „frikcioni“ materijal sa uglom unutrašnjeg trenja od $\varphi' = 33^\circ$ (Slika 6.23).



Slika 6.23. Parametri čvrstoće smicanja u zavisnosti od normalnih napona (Kavazanjian i dr. 1995)

Manassero i dr. (1996) predlažu "izlomljenu" anvelopu loma (Slika 6.24) koju treba koristiti kao polaznu osnovu pri projektovanju, ukoliko ne postoje rezultati ispitivanja za konkretnu lokaciju.



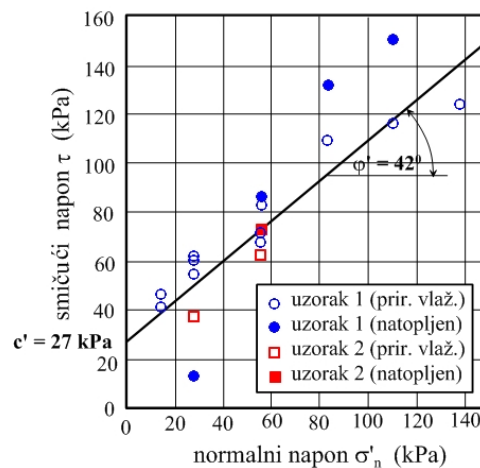
Slika 6.24. Izlomljena anvelopa loma (Manassero i dr. 1996)

U vezi sa tim vrednosti parametara čvrstoće smicanja c' i φ' su:

- Zona A: $0 \text{ kPa} \leq \sigma'_n < 26 \text{ kPa}$, ponašanje otpada može se poistovetiti sa čisto kohezivnim materijalom sa kohezijom od $c' = 20 \text{ kPa}$;
- Zona B: $26 \text{ kPa} \leq \sigma'_n < 60 \text{ kPa}$, otpad se može poistovetiti sa ponašanjem čisto frikcionog materijala čiji je ugao unutrašnjeg trenja $\varphi' = 38^\circ$;
- Zona C: $\sigma'_n \geq 60 \text{ kPa}$, čvrstoća se definiše kohezijom $c' = 20 \text{ kPa}$, i uglom unutrašnjeg trenja $\varphi' = 24^\circ$ (Slika 6.24).

Isti autori su nešto kasnije (1997) analizirali i karakteristične naponsko-deformacijske krive koje su dobijali i drugi autori. Opšti je zaključak da čvrstoća smicanja raste i nakon postizanja horizontalnih deformacija od 10 % početne dimenzije uzorka i da ni u jednom slučaju nije dostignuta vršna čvrstoća. Bez obzira na to, autori su predložili da se vrednosti parametara čvrstoće smicanja određuju pri dostizanju horizontalnih pomeranja od 10 – 15% od početne dimenzije uzorka. Osim toga, navode da je manjih odstupanja uglavnom dolazilo zbog različitih nivoa normalnih napona, a kao važan razlog pominju vrstu i oblik otpada kao i način pripreme uzoraka. Autori smatraju da se kod mladog otpada, koji sadrži veće količine plastičnih frakcija, dobijaju manje vrednosti ugla unutrašnjeg trenja. Kada je u pitanju stariji komunalni otpad, pored toga što se dobijaju veći uglovi unutrašnjeg trenja, zbog mešanja osnovnog - zemljastog materijala sa otpadom, on ispoljava i određenu vrednost kohezije.

Edincliler i dr. (1996) su opite direktnog smicanja obavili u kružnom aparatu za direktno smicanje prečnika 30 cm. Ispitivanja su izvršena na dva uzorka otpadnog materijala i na jednom uzorku prekrivke, koji su uzeti sa deponije na severoistoku Viskonsina sa različitih lokacija i u različito vreme. Pre formiranja uzoraka uklonjene su frakcije preko 5 mm a određeni uzorci su ispitani sa prirodnim sadržajem vode, dok su određeni uzorci prethodno natopljeni vodom. Dobijeni rezultati su prikazani na Slici 6.25, sa koje se može videti da uticaj natapanja na čvrstoću smicanja nije imao značajniji efekat. Autori su, na osnovu Kulon-Mor-Tercagijevog uslova, loma predložili koheziju $c' = 27 \text{ kPa}$ i ugao unutrašnjeg trenja $\varphi' = 42^\circ$, uz napomenu da se radi o nešto manjim vrednostima u odnosu na terenske uslove, jer su određene armirajuće frakcije prethodno uklonjene.



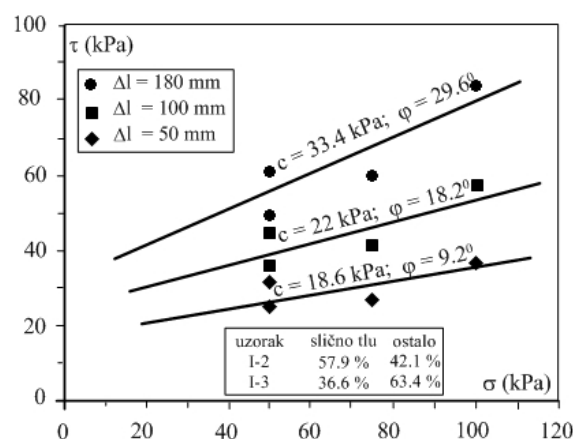
Slika 6.25. Čvrstoća smicanja uzoraka otpada iz Viskonsina (Edinçiler i dr. 1996)

Jones i dr. (1997) su izvršili seriju opita direktnog smicanja u aparatu 300 x 300 mm. U pitanju su ispitivanja na mladom otpadu starosti oko 3 meseca, sa najvećim zapreminskim učešćem papira (38 %), plastike (18 %) i tekstila (17 %), čije su pojedinačne frakcije u aparat ugrađivane horizontalno - duž ravni smicanja. U toku opita normalni naponi su bili 50 - 400 kPa, a brzina smicanja iznosila je 0.5 mm/min. Povećanjem napona smicanja, nije konstatovana vršna čvrstoća smicanja čak ni pri pomeranjima od 30 mm. Zbog poteškoća vezanih za utvrđivanje vršne čvrstoće, parametri čvrstoće smicanja su dobijeni korišćenjem mobilisanog napona smicanja, za određene vrednosti horizontalnog pomeranja. Sa povećanjem horizontalnog pomeranja, povećavao se i ugao unutrašnjeg trenja i to, za pomeranja od 5 mm ugao unutrašnjeg trenja je iznosio $\phi' = 7 - 15^{\circ}$, a za maksimalna izmerena pomeranja od 30 mm, ugao unutrašnjeg trenja iznosio je $\phi' = 27 - 30^{\circ}$. Međutim, zbog izrazite heterogenosti otpada, ove vrednosti se mogu delimično korigovati tako da su oni predložili za ugao unutrašnjeg trenja vrednost $\phi' = 25^{\circ}$, a za koheziju $c' = 5$ kPa. Autori su na osnovu ovih rezultata kao i brojnih litereturnih podataka (Taylor, 1995), predložili i prosečnu anvelopu loma sa parametrima čvrstoće smicanja od $\phi' = 31^{\circ}$ i $c' = 10.5$ kPa.

Van Impe i Bouazza (1998) su vršili ispitivanja na zbijenom komunalnom otpadu sa velikim sadržajem plastičnih materijala. Ispitivanja su vršena u specijalnom hidrauličkom aparatu na uzorcima koji su prethodno ispresovani, tako da su formirane bale dimenzije 1.0 x 1.0 m i visine 0.80 m. I na ovako pripremljenim uzorcima,

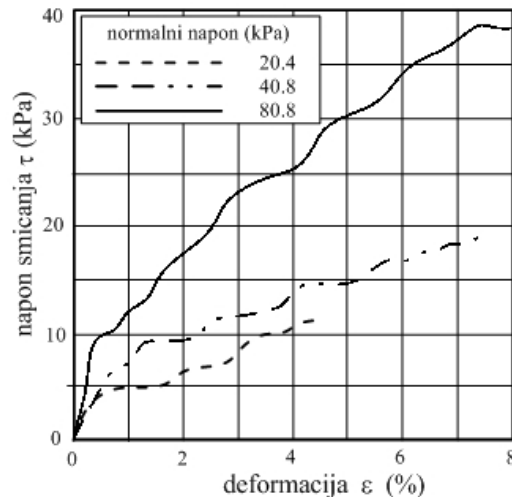
naponsko-deformacijski dijagrami nisu pokazali lom materijala na osnovu koga bi se definisale vršne vrednosti parametara čvrstoće, za razliku od uzoraka u kojima je dodata i zemljasta frakcija. Iz tih razloga oni smatraju da se pouzdaniji parametri čvrstoće smicanja, mogu definisati na osnovu dozvoljenog pomeranja. U prilog tome oni ukazuju na povećanje ugla unutrašnjeg trenja sa povećanjem vrednosti horizontalnih deformacija. Tako za horizontalne deformacije od 5%, određen je ugao unutrašnjeg trenja $\varphi' = 19^\circ$, dok je za horizontalnu deformaciju od 10% njegova vrednost iznosila $\varphi' = 38^\circ$. Isti autori su analizirali i uticaj starosti otpada na čvrstoću smicanja, s obzirom da su ispitivanjima na uzorcima starog otpada dobijene veće vrednosti čvrstoće smicanja nego na uzorcima sveže deponovanog otpada.

Thomas i dr. (1999) su izvodili opite smicanja na komunalnom otpadu sa deponije Torcy (Francuska), uzetom sa dubine od 6 m, iz tri istražne bušotine. Za ispitivanje su koristili aparat za direktno smicanja (1.0 x 1.0 x 0.7 m) koje su koristili i Goteland i dr. (1995). Ovit je izveden pri normalnom naponu $\sigma_n \leq 150$ kPa uz ručno regulisanje brzine smicanja, koja je približno iznosila 3 mm/min. Izmerena su maksimalna horizontalna pomeranja $\Delta l = 200$ mm i dobijena je naponsko-deformacijska zavisnost na kojoj nije izražen lom materijala, već konstantno povećanje napona smicanja sa povećanjem deformacija. Iz tog razloga su autori parametre čvrstoće smicanja određivali za izabrane vrednosti horizontalnih pomeranja od $\Delta l = 50, 100$ i 180 mm. Ustanovljeno je da sa povećanjem horizontalnih deformacija, rastu i vrednosti parametara čvrstoće smicanja. Na Slici 6.26. prikazani su sastav otpada sa rezultatima ispitivanja.



Slika 6.26. Parametri čvrstoće smicanja u zavisnosti od horizontalnih pomeranja (Thomas i dr. 1999)

Neki autori kao što je Ghaly (2000) smatraju da viši nivoi normalnih napona menjaju naponsko-deformacijske zavisnosti sa kojih se dobijaju vršne vrednosti parametara čvrstoće smicanja. Ovaj svoj zaključak autor je izveo na osnovu rezultata dobijenih ispitivanjima uzoraka usitnjene gume, sa različitim nivoima normalnih napona (Slika 6.27).



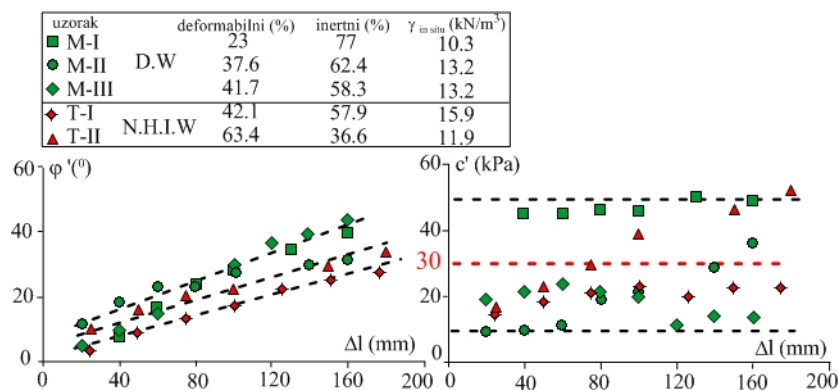
Slika 6.27. Naponsko-deformacijska zavisnost uzoraka usitnjene gume (Ghaly, 2000)

Van Impe i Bouazza (2000) se ne slažu sa ovom tvrdnjom i kao dokaz navode rezultate dobijene ispitivanjem čvrstoće smicanja komunalnog otpada pri normalnim naponima do 300 kPa. Naime, pri ovim normalnim naponima, dobijene su velike horizontalne deformacije bez jasno izraženog vršnog napona smicanja. Iz tog razloga oni smatraju da je kod komunalnog otpada, potrebno analizirati i neke druge rezultate, koji se ne odnose samo za fragmente plastike ili usitnjene gume, jer klasične deponije sadrže izvesan procenat zemljastog materijala koji je mestimično armiran fragmentima plastike.

Gotteland i dr. (2000) su posle pet godina, opet izvršili seriju opita u velikom aparatu za direktno smicanje. Koristili su otpad sa deponija Torcy (bezopasni industrijski otpad-NHIW) i Montech (kućni otpad-DW). Uprkos veličini aparata, autori su prethodno izvršili sortiranje i odbacivanje određenih sastojaka otpada koji po veličini nisu odgovarali dimenzijama aparata (metalne šipke, umotane tepihe itd.). Ispitivanja su izvršena na pet uzoraka otpada kod kojih su posebno izdvojeni deformabilni materijali (plastika, karton, tekstil, papir) a posebno, inertni industrijski materijali (drvo, inertni materijal, posebni komadi, fine frakcije). Procentualno maseno učešće deformabilnih

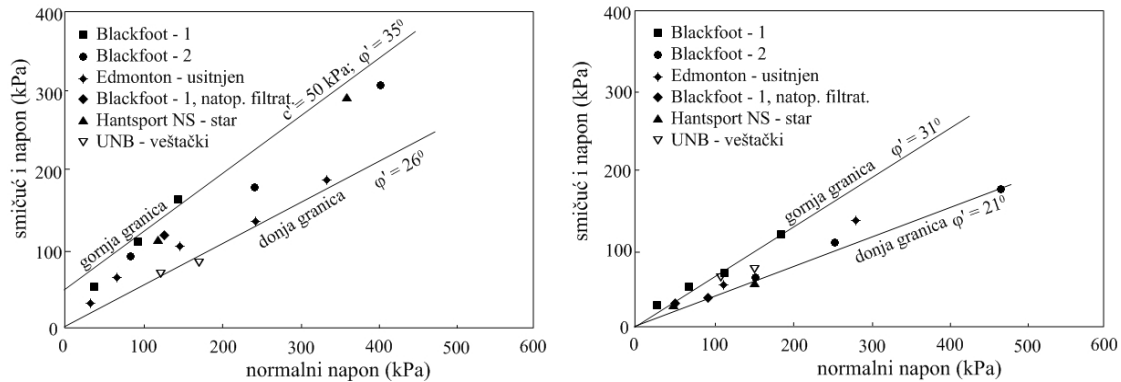
materijala iznosilo je od 23 – 63.4 %, dok je procentualno maseno učešće inertnih materijala iznosilo od 36.6 – 77.0 %. Opiti su izvođeni u dve faze. U prvoj fazi je izvršena priprema materijala i formiranje uzorka u samom aparatu, zbijanjem. Nakon toga uzorci su kratkotrajno izloženi vertikalnom opterećenju 125 kPa, u trajanju od 2 - 3 min, kako bi se obavila stabilizacija sleganja zbijenog otpada, a zatim je normalni napon smanjen do vrednosti sa kojima je obavljano smicanje. Brzina smicanja je iznosila 3 mm/min, uz konstantan normalni napon σ_n . Zbog ograničenog kretanja pokretnog dela aparata za smicanje od 150-200 mm, vršen je reverzni opit smicanja. Ni u ovim uslovima nije dobijena vršna čvrstoća smicanja, pa su parametri (ugao unutrašnjeg trenja i kohezija) određivani u zavisnosti od veličine horizontalnih pomeranja Δl . Rezultati su prikazani na Slici 6.28, sa koje se može primetiti njihovo veliko rasipanje.

Ovo rasipanje se posebno odnosi na mobilisane vrednosti kohezije koje se kreću u rasponu 10 – 50 kPa, pa su autori predložili srednju vrednost od 30 kPa. Za mobilisane vrednosti ugla unutrašnjeg trenja se može reći da se linearno menjaju u funkciji porasta pomeranja, sa relativno malim odstupanjem od $\pm 5\%$ u odnosu na srednju vrednost. Opšti zaključci do kojih su autori došli na osnovu svojih rezultata, su sledeći: napon smicanja τ , za iste vrednosti deformacija, raste bez izražene vršne vrednosti a da do loma ne dolazi čak ni pri velikim deformacijama ($\varepsilon \geq 20\%$); bez obzira na vrednosti zapreminskih težina i vrstu otpada, bilo da je u pitanju bezopasni industrijski ili otpad iz domaćinstva. Tokom smicanja je ustanovljeno smanjenje zapremine uzorka. Autori su konstatovali da se primenom istog postupka i uslova ispitivanja (brzine smicanja, zapreminske težine, vrednosti normalnih napona itd.) dobija dobro slaganje rezultata.



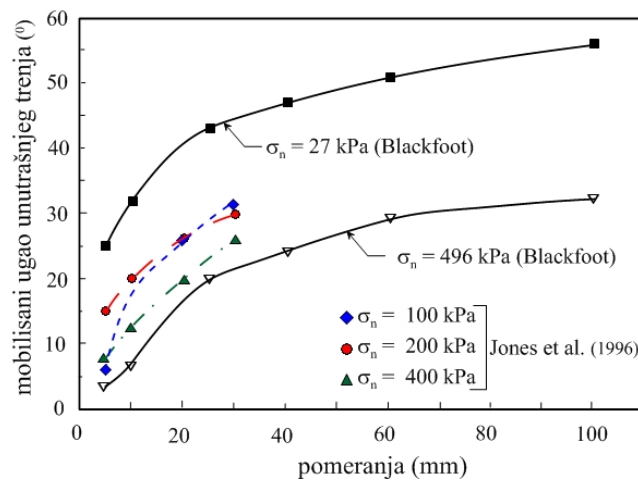
Slika 6.28. Mobilisani drenirani parametri čvrstoće smicanja (Gotteland i dr. 2000)

Pelkey i dr. (2001), su analizirali podatke Landva i Clark (1990) i Landva i dr. (2000) sa nekoliko različitih deponija u Kanadi. Ispitivanja su sprovedena na uzorcima sa zapreminskim težinama $\gamma = 9 - 15.5 \text{ kN/m}^3$ i sa vlažnošću koja se kretala u širokom rasponu od 32–315 %. Autori su u originalnim radovima, koheziju i ugao unutrašnjeg trenja definisali na osnovu vrednosti maksimalnog (vršnog) napona smicanja. Međutim, Pelkey sa saradnicima određuju mobilisanu koheziju i mobilisani ugao unutrašnjeg trenja u funkciji horizontalnih pomeranja. Oпитi su vršeni u aparatu za direktno smicanje dimenzija 450 x 305 mm, sa visinama donje i gornje kutije od po 300 mm. Konstrukcija aparata je podrazumevala nepokretnu gornju kutiju, a horizontalno opterećenje se nanosilo preko donje kutije pomoću hidrauličke prese, s tim što je ona bila postavljena na posebnim valjkastim ležajevima. Za nanošenje normalnog opterećenja, korišćene su dve hidrauličke prese. Smicanje je nakon konsolidacije obavljano brzinom od 1.5 mm/min. Rezultati ispitivanja, koji su dobijeni na uzorcima sa deponija Blackfoot i Hantsport, potvrdili su da su za mobilizaciju vršnog napona smicanja, neophodna velika pomeranja. Međutim, ispitivanja na uzorcima usitnjenog svežijeg otpada sa deponije Edmonton, pokazala su da dolazi do mobilizacije vršne smičuće čvrstoće pri određenim pomeranjima, a da pri tom vlaženje otpada nije uticalo na mobilizaciju napona smicanja. Pored toga, u radu se daju i novi podaci dobijeni opitima direktnog smicanja na uzorcima hartije, koja i dalje predstavlja glavni sastojak komunalnog otpada. Uzorci sa hartijom su se sastojali prvo od horizontalno složenih papira a drugo, od isečenih traka računarskog papira u kutiji za smicanje i njihovog presovanja normalnim opterećenjem, kao i kod uzoraka otpada. Oпит na horizontalno složenoj hartiji, pokazao je da je potrebno vrlo malo smičuće pomeranje da bi se ostvario maksimalni napon smicanja ($\Delta l < 3 \text{ mm}$ za listove papira i $\Delta l < 15 \text{ mm}$ za isečene trake računarskog papira). Međutim, uzorci provlaženog isečenog papira su dostigli maksimalni napon smicanja pri velikim pomeranjima, koja se mogu porediti sa uzorcima čvrstog gradskog otpada. Na osnovu ovih podataka, autori zaključuju da unutar deponije mogu da postoje zone neujednačenog pomeranja, ukoliko postoje zone sa nagomilanim listovima suvog papira. Na Slici 6.29a, prikazane su granične vrednosti parametara čvrstoće smicanja dobijene iz vršnih vrednosti napona smicanja, dok su na Slici 6.29b, radi poređenja, prikazane vrednosti parametara čvrstoće smicanja dobijene za pomeranja $\Delta l = 25 \text{ mm}$.



Slika 6.29. a) Vršni parametri čvrstoće smicanja b) Mobilisani parametri čvrstoće smicanja za pomeranja od $\Delta l = 25$ mm (Pelkey i dr. 2001)

Autori navode da se prikazani podaci odnose na uzorke komunalnog otpada različite starosti i da zbog toga vrednosti parametara čvrstoće smicanja, u neku ruku, odražavaju uticaje kako sastava tako i starosti otpada. S obzirom da su Van Impe i Bouazza (1998) izučavali uticaj starosti otpada na čvrstoću smicanja i da su došli do zaključka da stari komunalni otpad ima veću čvrstoću smicanja u odnosu na sveže deponovani otpad, Pelkey i saradnici smatraju da je za potvrđivanje ili osporavanje takvog zaključka neophodan znatno veći broj ispitivanja. Međutim, po njihovom mišljenju znatan uticaj na parametre čvrstoće smicanja imaju vrednosti normalnih napona i veličine pomeranja. Njihovi rezultati su pokazali da se komunalni otpad ponaša slično granularnim materijalima i da se sa povećanjem vrednosti normalnih napona smanjuju mobilisane vrednosti ugla unutrašnjeg trenja. Ova zavisnost je prikazana na Slici 6.30, uz napomenu da su autori svoje rezultate dopunili i sa rezultatima koje su objavili Jones i dr. (1997).

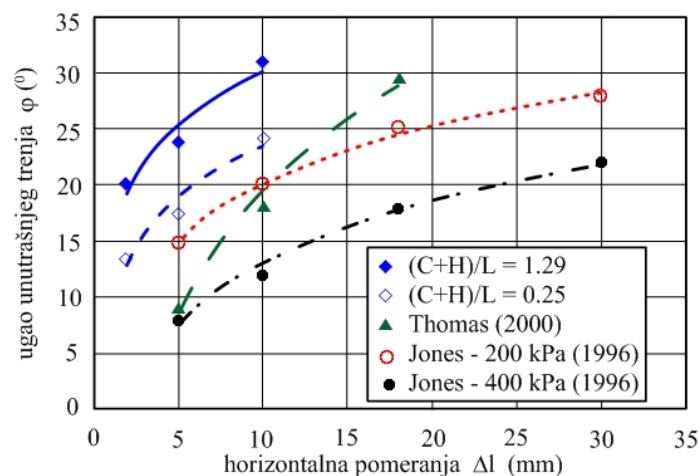


Slika 6.30. Mobilisane vrednosti ugla unutrašnjeg trenja (Pelkey i dr. 2001)

Scheelhaase i dr. (2001) su izvršili opite direktnog smicanja na dva uzorka (LBG-16w i MH2-36w) u aparatu koji omogućava maksimalno pomeranje kutije od 100 mm, sa dimenzijama uzorka 300 x 300 mm i visinom od 200 mm. Uzorci su prethodno pripremljeni tako što su za prvi uzorak odstranjene sve frakcije veće od 100 mm, odnosno za drugi uzorak sve frakcije veće od 60 mm. Pored ove mehaničke, izvršena je i biološka priprema uzorka, tj. materijal za uzorak LBG je ostavljen da truli 16 nedelja, dok je materijal za uzorak MH2, ostavljen da truli 36 nedelja. Ispitivanja su vršena sa normalnim naponima $\sigma_n = 75, 125$ i 250 kPa i sa maksimalnom brzinom smicanja od 0.15 mm/min. Analiziranjem dijagrama smicanja nije konstatovana vršna čvrstoća, za maksimalne vrednosti pomeranja. Pored toga, nisu zapažene ni značajne razlike u promeni parametara čvrstoće smicanja za suvi i prirodno vlažni materijal ($\gamma_d = 7 - 8.5$ kN/m³ i $w = 36 - 37\%$). U svom zaključku, autori konstatuju da su parametri čvrstoće smicanja uzorka koji je duže bio izložen truljenju, nešto veći.

Zadnjih godina se u razvijenim zemljama sveta grade takozvane bioreaktorske deponije koje se koriste za proizvodnju gasa. One u suštini podrazumevaju recirkulaciju prikupljenih procednih voda tj. njihovo ponovno vraćanje u deponiju, čime se ubrzava degradacija otpada i povećava sadržaj gasa u deponiji. Uticaj ubrzane degradacije otpada na geotehničke karakteristike otpadnog materijala, pre svega deformabilnost i čvrstoću smicanja, izučavao je S. Hossain, (2002). Za ova istraživanja korišćena je posebna laboratorijska oprema kako bi se modelirao proces ubrzanog raspadanja, koji je kvantifikovan merenjem koncentracije celuloze (C), hemiceluloze (H) i lignina (L), tj. odnosa (C+H)/L. Za određivanje parametara čvrstoće smicanja, korišćen je svež i dobro raspadnuti otpadni materijal od kojeg su formirani uzorci prečnika 100 mm i visine 50 mm. Ukupno je izvedeno 12 opita direktnog smicanja od čega devet na svežim uzorcima otpada kod kojih je dominirao sadržaj papira i plastike, a ostali opiti su izvedeni na uzorcima u kojima je dominirao raspadnuti otpadni materijal. Čvrstoća smicanja je definisana preko mobilisanog ugla unutrašnjeg trenja, u funkciji faze raspadanja preko odnosa (C+H)/L. Rezultati su pokazali da postoje izvesna odstupanja čvrstoće smicanja, u okviru različitih komponenti otpada. Tako da su za dostizanje čvrstoće smicanja organskih materijala, sa degradiranim sadržajem tekstila, neophodna mala pomeranja, dok su za dostizanje čvrstoće smicanja svežeg papira, neophodna

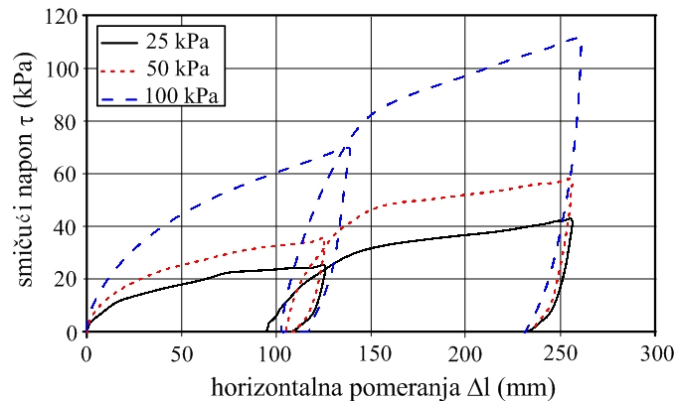
znatno veća pomeranja. U oba slučaja, sadržaj plastike se nije menjao, ali se sa degradacijom razgradivog otpadnog materijala on povećavao u odnosu na sadržaj ostalih komponenti, što je uticalo na smanjenje ugla unutrašnjeg trenja. Shodno tome, uspostavljena je korelacija između ugla unutrašnjeg trenja i odnosa $(C+H)/L$. Za veće vrednosti ovog odnosa (1.29) koji je karakterističan za uzorke sa izraženim raspadanjem tzv. bioreaktorski uzorci, dobijen je i veći ugao unutrašnjeg trenja $\varphi = 32^\circ$, dok je za manje vrednosti odnosa (0.25) ugao unutrašnjeg trenja smanjen na $\varphi = 24^\circ$ (Slika 6.31).



Slika 6.31. Zavisnost između ugla unutrašnjeg trenja i horizontalnih pomeranja (Hossain, 2002)

Pored toga, konstatovano je da se sa povećanjem pomeranja, povećava i ugao unutrašnjeg trenja. Autor je na osnovu dobijenih rezultata formirao konstitutivni model za nelinearni prikaz naponsko-deformacijskog ponašanja otpada prilikom ispitivanja čvrstoće smicanja.

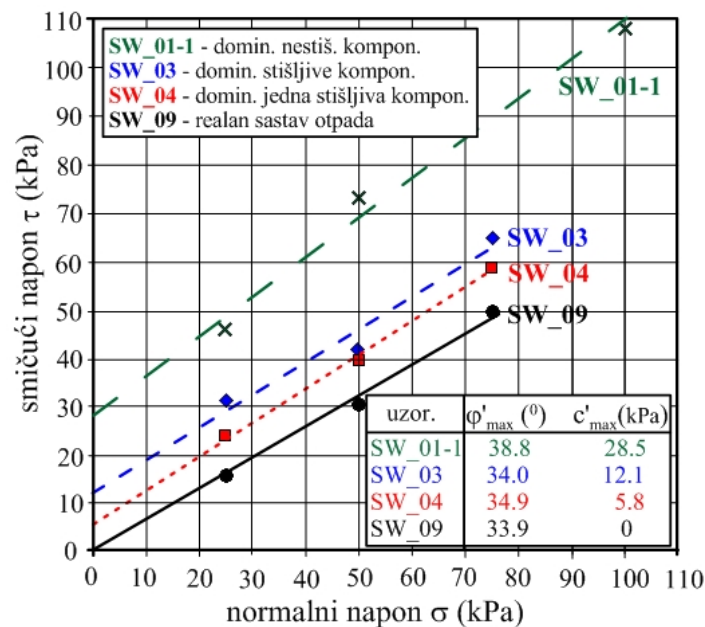
Langer (2005) je vršio opite direktnog smicanja u aparatu velikih dimenzija (1.0x1.0x0.8 m), koji je specijalno konstruisan na Univerzitetu u Grenoblu (Francuska). Sva ispitivanja su sprovedena sa po dva ciklusa smicanja. Prvi ciklus je podrazumevao smicanje do dostizanja relativnih smičućih pomeranja nešto većih od 10 % smicane dužine uzorka (od oko 120 – 130 mm). Nakon vraćanja kutija u početni položaj, obavljen je drugi ciklus smicanja do ukupnih pomeranja od oko 250 mm. Jedan karakterističan dijagram smicanja prikazan je na Slici 6.32.



Slika 6.32. Opit smicanja uzorka SW_07 (Langer, 2005)

Parametri čvrstoće smicanja, određivani su za maksimalne vrednosti čvrstoće smicanja ostvarene nakon drugog ciklusa smicanja (za maksimalnu vrednost zbirnog pomeranja od 250 mm), kao i za horizontalna pomeranja od $\Delta l = 110$ mm, koja su po pravilu odgovarala približno maksimalnoj vrednosti napona smicanja u toku prvog ciklusa smicanja. Autor je prethodno izvršio klasifikaciju otpada, u odnosu na sadržaj deformabilnih komponenti, tako da su posebno izdvojene: armirajuće, nestišljive i jako stišljive komponente otpada. U vezi sa tim, pošao je od pretpostavke da su u ranoj fazi odlaganja otpada najzastupljenije izrazito stišljive komponente, skoro 70 % ukupnog težinskog dela, sadržaj armirajućih komponenti je oko 27%, a svega 3% otpada sadrži slabo stišljive komponente. U zatvorenoj i već formiranoj deponiji, procenjuje se da je sadržaj armirajućih komponenti znatno veći i iznosi oko 63 %, a ostale frakcije odgovarale bi slabo stišljivom materijalu oko 37 %, dok je sadržaj jako stišljivih komponenti zanemaren. U vezi sa tim, autor je sproveo četiri serije ispitivanja. Prva serija ispitivanja (dva uzorka) odnosila se na uzorke koji su pripremljeni tako da preovlađuju jako stišljive komponente otpada kao što su: velike zapremine izgužvanog papira i plastike, aluminijumskih konzervi i plastičnih boca. Ovako formirani uzorci imali su izrazito male zapreminske težine koje su se kretale u rasponu $\gamma = 0.8 - 2.5$ kN/m^3 . Opiti su vršeni sa normalnim naponima $\sigma = 25, 50$ i 75 kPa, a brzina smicanja je iznosila od $5.8 - 6.0$ mm/min. Druga serija podrazumevala je takođe pripremu jako stišljivih uzoraka, ali sa dominantnim učešćem jedne komponente, u ovom slučaju aluminijumskih konzervi. Ispitana su takođe dva uzorka sa zapreminskim težinama probnih tela koje su iznosile $\gamma = 0.85 - 1.49$ kN/m^3 . I u ovom slučaju normalni naponi su iznosili $\sigma = 25, 50$ i 75 kPa, sa istom brzinom smicanja od $5.8 - 6.0$ mm/min. Treća

serija ispitivanja odnosila se na uzorke u kojima su dominirale nestišljive komponente otpada. Ispitano je pet uzoraka i svi su konsolidovani sa normalnim naponima $\sigma = 25, 50$ i 100 kPa. Zapreminske težine uzoraka kretale su se u širokom rasponu $\gamma = 7.0 - 14.3$ kN/m^3 , sa različitim brzinama smicanja od $4.2 - 6.0$ mm/min. Na kraju je izvršeno ispitivanje na jednom uzorku otpada koji je trebalo da simulira realan sastav otpada. S obzirom na početnu zapreminsku težinu formiranih uzoraka, koja je iznosila $\gamma = 2.20 - 3.58$ kN/m^3 , može se reći da je i ovaj uzorak formiran od materijala koji imaju izrazitu stišljivost. Uzorak je konsolidovan sa normalnim naponima $\sigma = 25, 50$ i 75 kPa, a smican je brzinom od 6.0 mm/min. Rezultati izvršenih ispitivanja prikazani su u Tabeli 6.1, a vrednosti parametara čvrstoće smicanja za maksimalne smičuće napone su date i na Slici 6.33.



Slika 6.33. Zavisnost vršnih parametara čvrstoće smicanja od sadržaja deformabilnih komponenti (Langer, 2005)

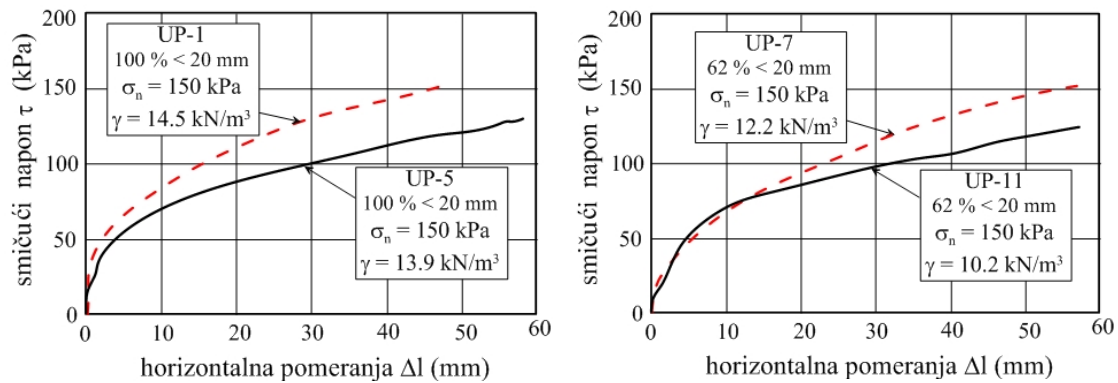
Iz prikazanih rezultata se može videti da je čvrstoća smicanja u ranoj fazi odlaganja otpada (uzorci formirani od izrazito stišljivih materijala) manja u odnosu na čvrstoću smicanja koja bi odgovarala davno odloženom otpadu koji je karakterističan za zatvorene deponije ili deponije u fazi zatvaranja (uzorci formirani od manje stišljivih materijala). Karakteristično je da je autor, za realan sastav otpada, preporučio koheziju $c = 0$ kPa

Tabela 6.1. Parametri čvrstoće smicanja prema sadržaju deformabilnih komponenti (Langer, 2005)

Oznake i vrste uzoraka		za max τ (kPa)		za $\Delta l = 110$ mm	
		ϕ'_{\max}	c'_{\max}	ϕ'_{mob}	c'_{mob}
SW_01-01	dominiraju slabo stišljive komponente	38.8	28.5	32.2	19.5
SW_01-02		34.2	30.8	33.1	14.6
SW_06		40.5	12.3	35.4	0.5
SW_07		43.3	16.0	28.1	9.0
SW_08		36.4	15.0	20.3	14.3
SW_02	dominiraju jako stišljive komponente	28.7	11.5	24.7	4.8
SW_03		34.0	12.1	23.8	4.0
SW_04	dominira jedna stišljiva komponenta	34.9	5.8	26.0	3.0
SW_05		34.9	6.2	26.1	4.5
SW_09	realan sastav otpada	33.9	0.0	25.3	2.5

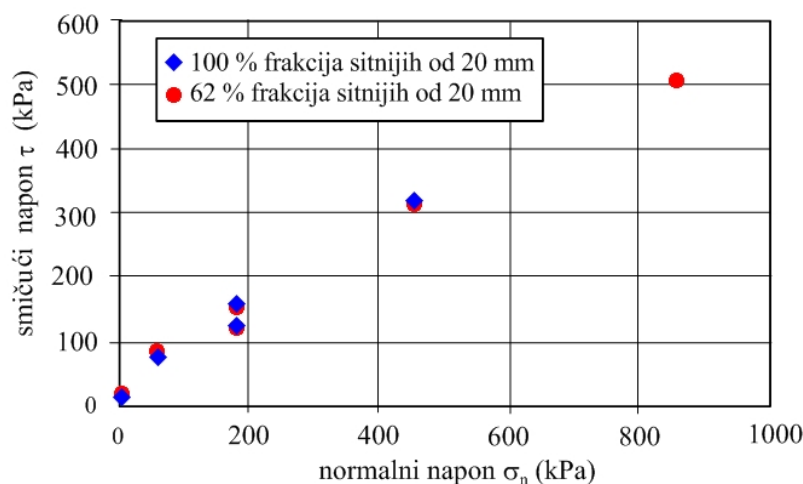
Zekkos (2005), je analizirao opite direktnog smicanja koji su izvedeni u aparatu dimenzija 300 x 300 x 180 mm u laboratoriji u Patrasu, pod nadzorom profesora G. A. Atanasopulosa (uzorci su poslani sa kalifornijskog univerziteta u Berkliju). U okviru ovih ispitivanja ukupno je pripremljeno 16 (14 + 2) uzorka. Na 14 uzoraka obavljena su ispitivanja na po jednom probnom telu, sa različitim zapreminskim težinama koje su se kretale $\gamma = 10.2 - 15.1$ kN/m³, s tim da su tri opita izvedena na uzorcima koji su pripremljeni u specijalnom kalupu, kako bi orijentacija ljustastih fragmenata bila upravna na ravan smicanja. Na dva uzorka izvršen je opit za koji su upotrebljena po 4 probna tela, s tim da su za jedan opit uzorci takođe pripremljeni sa frakcijama upravnim na ravan smicanja. Otpadni materijal, od kojeg su formirani uzorci, prethodno je usitnjen do maksimalne veličine frakcija od 20 mm, a nakon toga su formirani uzorci (sa 100 % frakcija sitnijih od 20 mm) koji su upotrebljeni za pet opita. Ostali opiti izvedeni su na uzorcima koji su formirani od 62.1 % frakcija sitnijih od 20 mm, a ostatak je činila mešavina hartije 17.9 %, drveta 4.7 %, plastike 4.7 % i šljunka 10.6 % sa većim dimenzijama od 20 mm. Uzorci su konsolidovani sa normalnim naponima od $\sigma = 1.8, 50, 150$ i 370 kPa. Tokom opita su merena i vertikalna pomeranja koja su uglavnom pokazala sabijanje uzoraka tokom smicanja. Mobilisana čvrstoća smicanja je određena za veličinu pomeranja $\Delta l = 55$ mm, jer tokom ispitivanja kod većine uzoraka nisu dostignuti vršni naponi. Karakteristični dijagrami smicanja, za uzorke sa različitim

sadržajem frakcija sitnijih od 20 mm, prikazani su na Slici 6.34. Sa slike se može videti i uticaj zapreminske težine na čvrstoću smicanja.



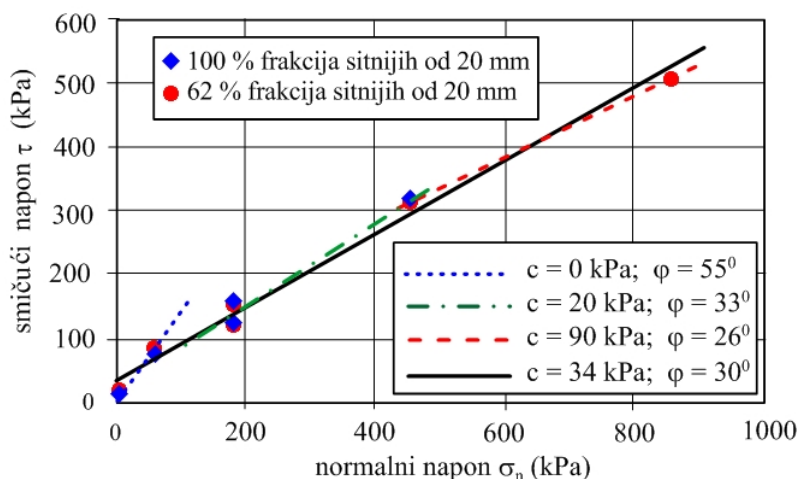
Slika 6.34. Uticaj zapreminske težine uzoraka sa 100 % i 62 % frakcija manjih od 20 mm na smičuću čvrstoću otpada (Zekkos, 2005)

Opšti je zaključak da uzorci sa 100 % i 62 % frakcija otpada sitnijeg od 20 mm nisu pokazali bitno različite čvrstoće smicanja (Slika 6.35). To ukazuje da frakcije krupnije od 20 mm (hartija, drvo, plastika), koje su po prirodi ljuispaste i obično obezbeđuju dodatno armiranje otpadnom materijalu, ne doprinose značajno mobilisanoj čvrstoći smicanja otpada. Ovo zapažanje je značajno, jer ukazuje na to da je čvrstoća smicanja komunalnog otpada anizotropna i da se opitima direktnog smicanja određuje minimalna čvrstoća pri paralelnoj orijentaciji frakcija/vlakana.



Slika 6.35. Efekat sastava i veličine frakcija otpada na smičuću čvrstoću (Zekkos, 2005)

S obzirom da ne postoji velika razlika čvrstoće smicanja dobijene na uzorcima koji sadrže 100 % i 62 % materijala sitnijeg od 20 mm, izvršena je interpretacija podataka i dobijena je vrednost kohezije $c = 34$ kPa i ugla unutrašnjeg trenja $\varphi = 30^0$. Ova preporuka se može uporediti sa rezultatima predhodnih istraživača (npr. Kavazanjian i dr. 1995; Edincliler i dr. 1996; Eid i dr. 2000). Međutim, treba istaći da ova preporuka zanemaruje uticaj normalnog napona koji može biti značajan. To je prikazano na Slici 6.36, na kojoj se može videti da se, u zavisnosti od vrednosti normalnih napona (u konkretnom slučaju to je debljina deponije), mogu dobiti različite vrednosti parametara čvrstoće smicanja na osnovu Kulon-Mor-Tercagijevog uslova loma. Pored normalnih napona, na mobilisane vrednosti parametara čvrstoće smicanja utiče i zapreminska težina, što je prikazano na Slici 6.34.



Slika 6.36. Uticaj normalnih napona na parametre čvrstoće smicanja (Zekkos, 2005)

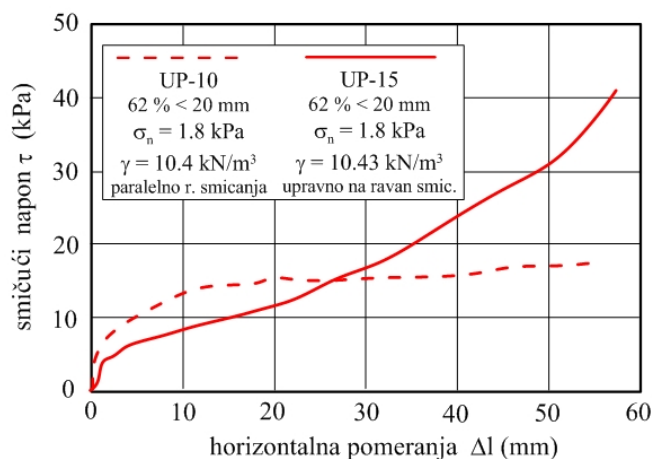
U vezi sa tim, autor je analizirao i nelinearnu anvelopu loma primenjujući logaritamsku funkciju. Na osnovu laboratorijski dobijenih podataka, usvajajući vrednost kohezije $c = 0$ kPa, ugao unutrašnjeg trenja je izrazio pomoću sledeće jednačine

$$\varphi' = \varphi'_0 - \Delta\varphi' \log \frac{\sigma'_3}{p_a}$$

$$\varphi' = 46.1 - 21 \cdot \log \frac{\sigma'_n}{p_a} \quad (6.6)$$

Na osnovu toga dobijena je vrednost za $\varphi_0 = 46^0$ koja predstavlja ugao trenja pri normalnom naponu od 1 atmosfere, a $\Delta\varphi = 21^0$ predstavlja promenu ugla unutrašnjeg trenja za raspon normalnog napona od jedne logaritamske jedinice (ovaj postupak će biti detaljnije objašnjen u Poglavlju 6.6.). Može se reći da su ovo relativno velike vrednosti za φ_0 i $\Delta\varphi$, međutim, ukoliko bi se usvojila vrednost kohezije od $c = 15$ kPa, dobile bi se smanjene vrednosti uglova unutrašnjeg trenja i to $\varphi_0 = 40.8^0$, a $\Delta\varphi = 14^0$.

Kako obavljena ispitivanja nisu pokazala značajnije razlike u mobilisanoj čvrstoći smicanja na uzorcima sastavljenim od 100 % i 62 % materijala sitnijeg od 20 mm, autor je izvršio i četiri opita (3 opita sa jednim probnim telom i sa različitim normalnim naponima $\sigma = 1.8, 150$ i 370 kPa, i jedan kompletan opit sa četiri probna tela sa normalnim naponima od $\sigma = 1.8, 50, 150$ i 370 kPa) direktnog smicanja na uzorcima u kojima je prethodno izvršena orijentacija ljustastih frakcija, približno upravno na površinu smicanja. Priprema uzorka izvršena je u posebno pripremljenom kalupu dimenzija u osnovi 18 cm x 30 cm a visine 30 cm. Izrazita razlika u naponsko-deformacijskom ponašanju ovako pripremljenih uzoraka, u odnosu na uzorke kod kojih je orijentacija frakcija bila približno paralelna ravni smicanja, prikazana je na Slici 6.37.

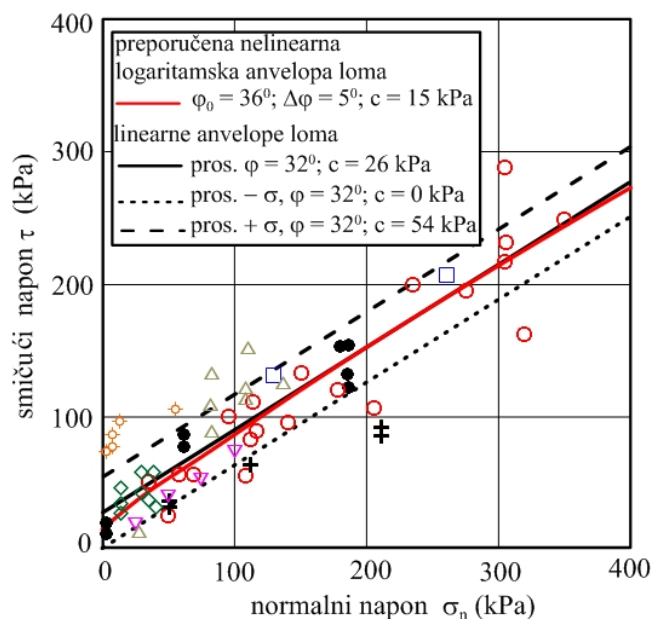


Slika 6.37. Uticaj orijentacije ljustastih frakcija na naponsko-deformacijsko ponašanje uzorka (Zekkos, 2005)

Analizirana su dva uzorka istog sastava i približno iste zapreminske težine, koji su konsolidovani sa istim normalnim naponom $\sigma = 1.8$ kPa, tako da je jedina razlika bila u orijentaciji frakcija. Za uzorak UP-15 može se reći da je “mekše“ reagovao pri malim horizontalnim pomeranjima, ali da je postajao “krući“ i ispoljavao krivljenje naviše sa

povećanjem deformacija, što se tumači postepenim zatezanjem vlaknastih frakcija koje se mobilizuju. I na ovaj način je pokazano da je čvrstoća smicanja komunalnog otpada u znatnoj meri anizotropna i da zavisi od ugla između dominantne orijentacije frakcija i površine smicanja.

Na osnovu dobijenih rezultata ispitivanja, definisana je prosečna anvelopa loma kojoj odgovara vrednost kohezije $c = 26$ kPa i ugao unutrašnjeg trenja $\varphi = 32^\circ$. Ovo je saglasno sa ranije iznetim preporukama (Slika 6.38).



Slika 6.38. Preporučena nelinearna logaritamska i linearna anvelopa loma (Zekkos, 2005)

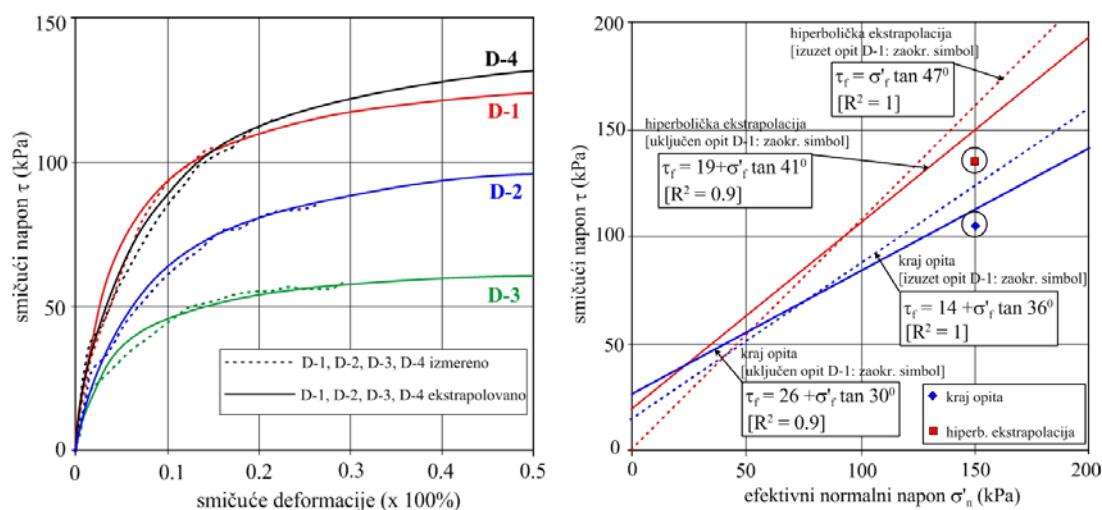
Međutim, autor je na osnovu rezultata drugih istraživača, koji su vršili istraživanja na otpadnim materijalima sa deponija u Kanadi, Arizoni, Viskonsiju, Kaliforniji, Italiji, Kolumbiji i Brazilu, preporučio logaritamsku nelinearnu anvelopu čvrstoće smicanja, sa vrednostima kohezije $c = 15$ kPa, $\varphi_0 = 36^\circ$ i $\Delta\varphi = 5^\circ$. Zekkos (2005) navodi da se i linearna anvelopa loma može relativno dobro uklopiti u dobijene podatke, ali konstatuje da je logaritamska nelinearna anvelopa tačnija i preporučuje da se ona koristi u daljoj praksi. Preporučenu logaritamsku nelinearnu anvelopu loma, autor je upoređivao sa prethodnim linearnim anvelopama loma koje su predlagali Kavazanjian i dr. 1995; Manassero i dr. 1999; Eid i dr. 2000; (Slika 6.38). Može se primetiti da su one u suštini slične, ali da je prednost nelinearne anvelope loma u tome što se ona bazira na mnogo

većem broju opita direktnog smicanja, koji su obavljani na otpadnim materijalima takoreći iz celog sveta. Osnovna razlika, jeste niža vrednost kohezije kod nelinearne anvelope loma.

Singh (2008) je izvršio jedan opit direktnog smicanja (ispitivanja su izvršena na četiri probna tela, opterećena različitim normalnim naponima $\sigma = 60, 100, 140$ i 150 kPa), koji mu je poslužio za poređenje sa rezultatima triaksijalnih ispitivanja. Autor zaključuje da je naponsko-deformacijsko ponašanje komunalnog otpada nelinearno i veoma slično zavisnosti devijatora napona i aksijalnih deformacija, koje su dobijene triaksijalnim ispitivanjima. Ispitivanjima takođe nije dostignuta vršna vrednost napona smicanja pri maksimalnim horizontalnim pomeranjima u aparatu za direktno smicanje. Autor je za određivanje parametara čvrstoće smicanja, koristio napone smicanja za maksimalne vrednosti horizontalnih pomeranja. Pored toga, izvršena je i ekstrapolacija naponsko-deformacijske krive pravouglom hiperbolom, a za vrednosti napona pri lomu usvajan je deo asimptotske vrednosti. U oba slučaja primenjena je linearna anvelopa loma, s tim da su u jednom slučaju za interpretaciju rezultata zanemarivani podaci dobijeni pri normalnom naponu $\sigma = 150$ kPa. Rezultati ispitivanja su prikazani na Slici 6.39, sa koje se vidi znatna razlika u vrednostima parametara dobijenih laboratorijskim ispitivanjima ($c' = 14 - 26$ kPa; $\phi' = 30 - 36^\circ$) i na osnovu vrednosti dobijenih ekstrapolacijom naponsko-deformacijske krive hiperbolom ($c' = 0 - 19$ kPa; $\phi' = 41 - 47^\circ$). Autor navodi da su vrednosti parametara čvrstoće smicanja (c' i ϕ'), dobijene hiperboličkom ekstrapolacijom toka opita direktnog smicanja, vrlo slične vrednostima dobijenim iz rezultata triaksijalnog opita ($c' = 8.4$ kPa i $\phi' = 47^\circ$).

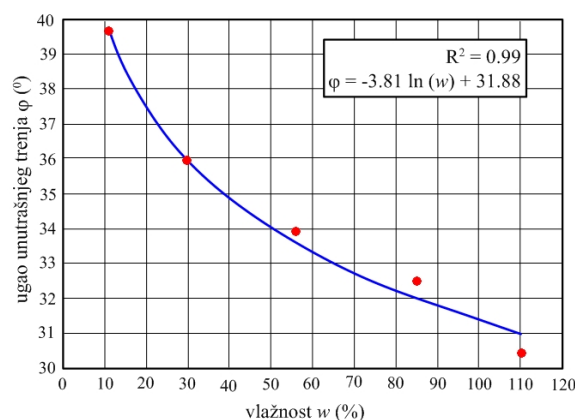
Wong (2009) je izvršio je opite direktnog smicanja, korišćenjem kutijastog aparata dimenzija 305×305 mm, koji omogućava ugradnju uzorka visine 200 mm. Ispitivanja je izveo na pet uzoraka komunalnog otpada, koji su pripremljeni sa različitom vlažnošću i to $w_{\min} = 11$ % do $w_{\max} = 110$ % i sa različitim suvim zapreminskim težinama $\gamma_d = 4.3 - 5.9$ kN/m³ (odnosno $\gamma = 4.8 - 10.3$ kN/m³). Svi opiti su izvedeni pri normalnom naponu $\sigma = 200$ kPa. Nakon konsolidacije je izvršeno je smicanja u vremenskom trajanju od 15 h, tj. primenjena je brzina smicanja od 0.0508 mm/min. Opiti su

prekidani nakon dostizanja horizontalnih pomeranja od oko $\Delta l = 46$ mm (uz napomenu da je autor rezultate prikazivao u funkciji relativnih deformacija $\varepsilon = 14.6 - 14.8$ %).



Slika 6.39. Laboratorijski određene i ekstrapolovane vrednosti parametara čvrstoće smicanja (Singh, 2008)

Za sve opite je dobijena zavisnost smičući napon-pomeranje na kojoj nije izražen lom materijala, već konstantno povećanje napona smicanja sa povećanjem pomeranja. Za određivanje parametara čvrstoće smicanja, autor je koristio vrednost smičućeg napona pri maksimalno ostvarenom pomeranju, s tim da je usvojena pretpostavka da je komunalni otpad čisto frikcionni materijal koji nema koheziju. Ova pretpostavka je omogućila autoru, da na osnovu opita smicanja na jednom uzorku otpada, odredi ugao unutrašnjeg trenja. Rezultati su pokazali da sa povećanjem vlažnosti opada vrednost ugla unutrašnjeg trenja $\varphi = 39.7^\circ - 30.4^\circ$ (Slika 6. 40).



Slika 6.40. Uticaj promene vlažnosti otpada na ugao unutrašnjeg trenja (Wong, 2009)

U Tabeli 6.2, dat je detaljniji prikaz parametara čvrstoće smicanja koji su dobijeni na osnovu opita direktnog smicanja. Mogu se uočiti izrazita odstupanja vrednosti dobijenih od strane različitih autora. Međutim, ova izrazita odstupanja, ne predstavljaju iznenađenje, kada se zna da su ispitivanja vršena na heterogenim materijalima različite starosti, a razlikovala se i korišćena oprema i s tim u vezi načini ispitivanja. Pored toga, autori su koristili i različite pretpostavke prilikom tumačenja dobijenih podataka. Tako na primer, nije uvek jasno naznačeno na koji način su interpretirani parametri čvrstoće smicanja, da li pri vršnoj čvrstoći ili je u pitanju mobilisana čvrstoća koja je unapred definisana za određenu vrednost pomeranja. Treba napomenuti da, većina autora, nije sistematski dokumentovala ni efekat degradacije otpada.

6.3.1.2. Triaksijalni opiti

Za određivanje parametara čvrstoće smicanja komunalnog otpada, opiti triaksijalne kompresije nisu tako česti, kao opiti direktnog smicanja. U literaturi se pominju radovi Siegel i dr. (1990); Jessberger i dr. (1995); Gabr i Valero (1995); Grisolia i dr. (1995); Caicedo i dr. (2002); Vilar i Carvalho (2004); Chen i dr. (2006) i dr., u kojima je opisano određivanje parametara čvrstoće smicanja u triaksijalnim uslovima. Ispitivanja su sprovedena na uzorcima sa različitim zapreminskim težinama, vlažnostima i na otpadu različitog sastava. Međutim, efekat ovih parametara, nije uvek sistematski dokumentovan. Osnovni problem koji se javljao jeste definisanje kriterijuma loma, pa su autori vršili različite interpretacije, uglavnom, usvajajući određenu vrednost aksijalnih deformacija (najčešće 20 %).

Siegel i dr. (1990) su vršili triaksijalna ispitivanja na anizotropno konsolidovanim uzorcima usitnjenog komunalnog otpada starog dve godine. Dobijen je efektivni ugao unutrašnjeg trenja $\phi' = 44^{\circ}$ i efektivna kohezija $c' = 0$ kPa.

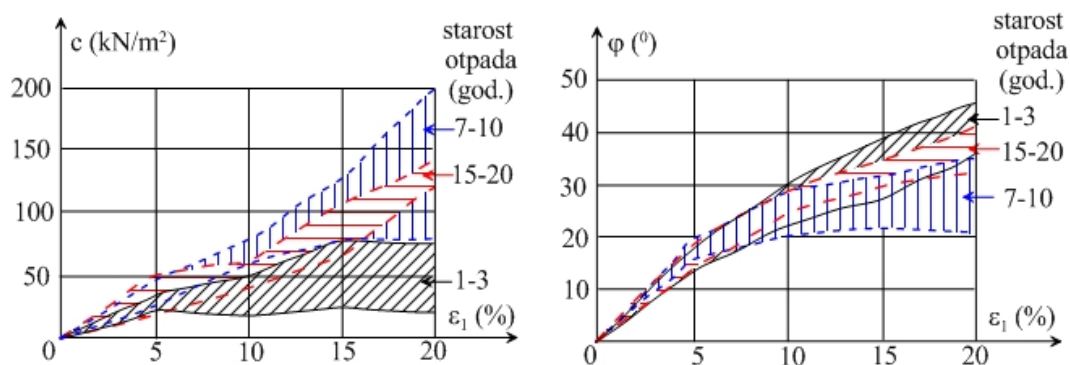
Singh i Murphy (1990) su vršili triaksijalna ispitivanja na „neporemećenim“ uzorcima komunalnog otpada sa deponija u Kaliforniji, uzetih pomoću tzv. Šelbijeovog cilindra za uzimanje uzoraka (Shelby tube sampler). Ispitivanjima nije dobijena vršna čvrstoća ni pri relativnim deformacijama $\varepsilon_1 > 30$ %.

Tabela 6.2. Parametri čvrstoće smicanja iz opita direktnog smicanja

Autori	Parametri čvrstoće smicanja		Detalji vezani za ispitivanje	
	c' (kPa)	ϕ' (°)		
Landva & Clark (1986)	16-23	24-39	pet uzoraka iz različitih Kanadskih deponija (stari i mlad otpad)	
Landva & Clark (1990)	0	27-41	korišćen aparat dimenzija 43.4 x 28.7 cm	
Siegel et al. (1990)	0	39-53	pet opita korišćen kriterijum loma pri 10% deformacija	
Richardson & Reynolds (1991)	10	18-43	obavljen na terenu na uzorcima 1.5 x 1.5 m	
Howland & Landva (1992)	17	33	opiti na 10 do 15 god. starom otpadu	
Del Greco & Oggeri (1993)	16-24	21-22	opiti na balama otpada slabo i dobro zbijenim	
Golder & Associates (1993)	0	41	specifični opiti	
Gabr & Valero (1995)	0-28	20-39	valjkasti uzorci prečnika 63.5 mm i visine 23 mm	
Gotteland et al. (1995)	0-20	38-46	na velikim uzorcima sa terena, dimenzija 1.0 x 1.0 m	
Houston et al. (1995)	4.4-5	34-36	1.22 x 1.22 x 1.22 m - neporemećeni uzorci	
Kavazanjian et al. (1995)	24	0	normalni napon $\sigma < 30$ kPa	
	0	33	normalni napon $\sigma > 30$ kPa	
Withiam et al. (1995)	10	30	opit na terenu na uzorcima 1.5 x 1.5 x 1.5 m	
Manassero et al. (1996)	20	0	izlomljena anvelopa loma	$0 \leq \sigma < 26$ kPa
	0	38		$26 \leq \sigma < 60$ kPa
	20	24		$\sigma \geq 60$ kPa
Edinçliler et al. (1996)	27	42	uzorci prečnika 30 cm, kriterijum max. pomeranja $\Delta l = 2.5$ cm	
Benson et al. (1996)	20-24	35-42	na vlažnim i natopljenim uzorcima	
Jones et al. (1997)	0	7-15	otpad star 3 meseca, uzorci 30 x 30 cm, pomer. 5 mm	
		27-30	otpad star 3 meseca, uzorci 30 x 30 cm, pomer. 30 mm	
Van Impe & Bouazza (1998)	0	19	uzorci 1.0 x 1.0 m x 0.8 m, pomer. 5 %	
		38	uzorci 1.0 x 1.0 m x 0.8 m, pomer. 10 %	
Kavazanjian et al. (1999)	16	33	uzorci 45.4 x 45.4 cm - donja granica	
	30	59	uzorci 45.4 x 45.4 cm - gornja granica	
Mazzucato et al. (1999)	43	31	uzorci 80 x 80 cm	
Thomas et al. (1999)	18.6	9.2	uzorci 1.0 x 1.0 x 0.7 m, za pomeranja od 50 mm	
	22	18.2	uzorci 1.0 x 1.0 x 0.7 m, za pomeranja od 100 mm	
	33.4	29.6	uzorci 1.0 x 1.0 x 0.7 m, za pomeranja od 180 mm	
Eid et al. (2000)	25	35	veliki aparat ali i povratne analize	
Gotteland et al. (2000)	10-50	5-42	veliki aparat, indust. i kućni otpad (veliko rasipanje za ϕ)	
Pelkey et al. (2001)	0-50	26-35	analiza uzoraka sa šest deponija, vršne vrednosti	
	0	11-31	analiza uzoraka sa šest deponija, za pomeranja od 25 mm	
Caicedo et al. (2002)	67	23	uzorci dimenzija 90 x 90 cm, drenirani opit	
Hossain (2002)	0	24-32	12 uzoraka prečnika 100 mm, bioreaktor	
Langer (2005)	0-30.8	29-43	uzorci 1.0x1.0x0.8 m, dva ciklusa smic., max smič. nap.	
	0.5-20	20-35	uzorci 1.0x1.0x0.8 m, dva ciklusa smic., pom. 110 mm.	
Zekkos et al. (2005)	0-54	32	uzorci 30x30x18 cm, 16 opita u Patrasu	
	26	32	prosečne vrednosti	
Zekkos et al. (2005)	15	36; 5	nelinearna anvelopa loma $\phi_0 = 36^\circ$; $\Delta\phi = 5^\circ$	
Harris et al. (2006)	9-14	20-29	opit na velikim uzorcima ali i TX CU opiti	
Reddy et al. (2008)	31-64	26-30	svež otpad	
Singh (2008)	14-26	30-36	jedan opit sa četiri probna tela	
	0-19	41-47	hiperbolička ekstrapolacija	
W. Wong (2009)	0	30-40	uzorci 30.5x30.5x20, sa različitim vlažnostima	

Oweis (1993), je vršio ispitivanja čvrstoće smicanja u triaksijalnom aparatu na delimično zasićenom nekonsolidovanom i nedreniranom uzorku koji je imao oko 20 % finozičnih frakcija sitnijih od 0.074 mm. Na ovako pripremljenom uzorku, pri maksimalnoj suvoj zapreminskoj težini $13,5 \text{ kN/m}^3$ i optimalnoj vlažnosti 23,5% (stepen zasićenja se kretao od 60-70%), dobijeni su uglovi unutrašnjeg trenja $\phi' = 43^\circ - 45^\circ$. Autor objašnjava da na ovako velike uglove unutrašnjeg trenja, najveći uticaj ima pojava negativnih pornih pritisaka koja je posledica slabe zasićenosti uzorka. Zato on predlaže da se analize stabilnosti rade sa vrednostima parametara čvrstoće smicanja, dobijenim na zasićenim uzorcima.

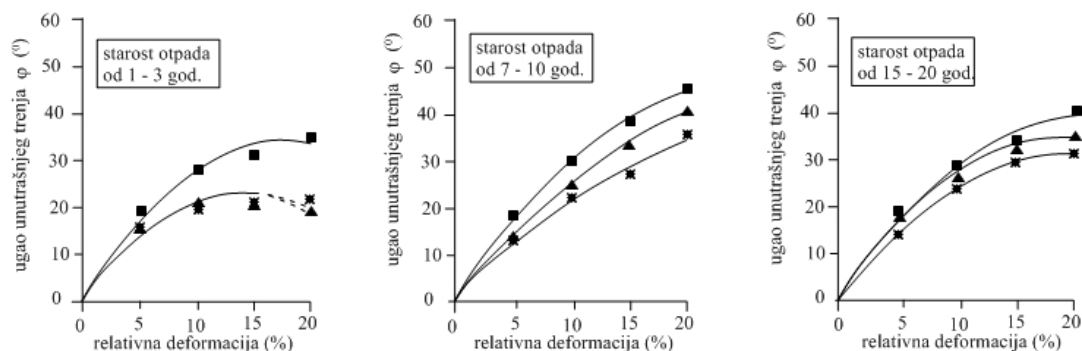
Jessberger i dr. (1995), su vršili triaksijalne opite na uzorcima otpada različite starosti (od 1 do 20 god.) i sastava, bez njihove prethodne pripreme. Ispitivanja su vršena na uzorcima prečnika 300 mm na kojima, pri aksijalnoj deformaciji $\varepsilon_1 = 40-50\%$, nije dostignuta vršna čvrstoća (lom uzoraka). Vrednosti mobilisanih parametara čvrstoće smicanja, koje su dobijene na uzorcima različite starosti, prikazane su na Slici 6.41. Na osnovu dobijenih rezultata, ustanovljeno je da starost nema veći efekat na čvrstoću smicanja komunalnog otpada (npr. na opadanje ugla unutrašnjeg trenja). Naime, ispitivanjima koja su sprovedena na neporemećenim i veštački pripremljenim uzorcima, sa različitim sadržajem armirajućih frakcija, dobijene su slične vrednosti. I u ovom slučaju, parametri čvrstoće smicanja su definisani pri vrlo velikim aksijalnim deformacijama. Konstatovano je da čvrstoća smicanja osnovnog materijala zavisi od trenja, koje se aktivira pri relativno malim pomeranjima, a ne od sadržaja armirajućih frakcija. Na osnovu toga je zaključeno da ugao unutrašnjeg trenja osnovnog materijala, u stvari, odgovara uglu kompozitnog (izmešanog) materijala, tj. komunalnog otpada.



Slika 6.41. Zavisnost parametara čvrstoće smicanja od relativnih deformacija i starosti otpada (Jessberger i dr. 1995)

Kada se radi o koheziji, autori smatraju da se ona odnosi na armirajuće frakcije i da se ona aktivira preko sila zatezanja u osnovnom materijalu. Osim toga, oni smatraju da pri aksijalnim deformacijama $\varepsilon_1 = 20\%$, kohezija zavisi od sadržaja armirajućih materijala i može se definisati preko čvrstoće zatezanja armirajućih komponenata. Na osnovu toga je i izveden zaključak da armirajući materijali nemaju znatan uticaj na frikционе osobine osnovnog materijala, već na vrednosti kohezije.

Reuter i Nolte (1995) su iskoristili rezultate Jessberger i dr. (1995) kako bi prikazali vrednosti mobilisanih parametara čvrstoće smicanja za aksijalne deformacije $\varepsilon_1 = 5 - 10 - 15 - 20\%$, na otpadu različite starosti. Analize su pokazale povećanje ugla unutrašnjeg trenja sa povećanjem deformacija (Slika 6.42). Međutim, po njihovom mišljenju, pri definisanju parametara čvrstoće smicanja komunalnog otpada treba uključiti i odgovarajuće vrednosti kohezije.

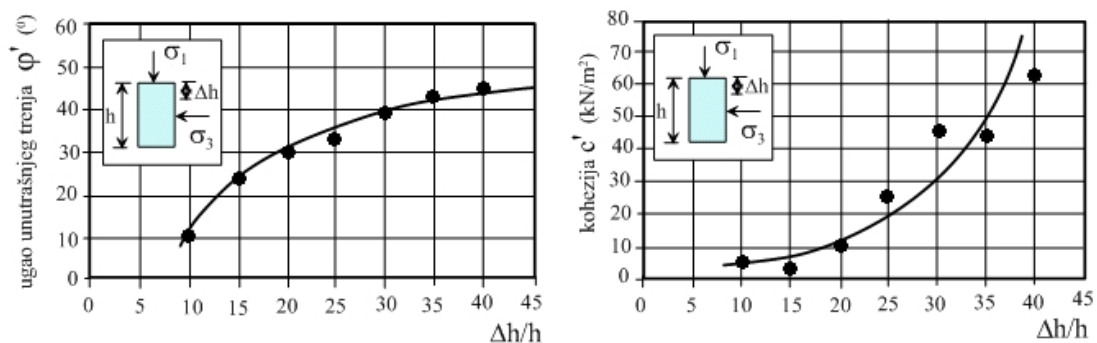


Slika 6.42. Zavisnost ugla unutrašnjeg trenja od starosti otpada (Reuter i Nolte, 1995)

Gabr i Valero (1995) su vršili nekonsolidovane nedrenirane (UU) i konsolidovane nedrenirane (CU) triaksijalne opite. Zapreminske težine uzoraka, prilikom izvođenja nekonsolidovanih nedreniranih triaksijalnih opita, iznosile su $\gamma = 7.4 - 8.2 \text{ kN/m}^3$. Kod UU opita su pošli od Kulon-Mor-Tercagijevog kriterijuma loma i pretpostavke da je nedrenirani ugao unutrašnjeg trenja $\varphi_u = 0^0$. Vrednosti nedrenirane kohezije su se smanjivale u zavisnosti od vlažnosti uzorka tj. za vlažnost od $w = 55\%$ kohezija je iznosila $c_u = 100 \text{ kPa}$, a za vlažnost uzorka od $w = 72\%$, kohezija je iznosila svega $c_u = 10 \text{ kPa}$ (vlažnosti uzoraka su merene nakon opita). Oni su, takođe, izvršili i četiri konsolidovana nedrenirana triaksijalna opita sa merenjem pornog pritiska, čime su

dobijeni i efektivni parametri čvrstoće smicanja. Opiti su izvedeni na uzorcima sa suvom zapreminskom težinom $\gamma_d = 7.4 - 7.5 \text{ kN/m}^3$, a dobijene su prosečne vrednosti efektivnih parametara čvrstoće smicanja, i to: ugao unutrašnjeg trenja $\phi' = 34^\circ$ i kohezija $c' = 16.8 \text{ kPa}$. Ove vrednosti odgovaraju aksijalnim deformacijama $\varepsilon_1 = 20 \%$ (skoro su identične vrednostima koje su predložili Howland i Landva na osnovu opita direktnog smicanja).

Grisolia i dr. (1995) su vršili triaksijalne opite na otpadu sa dominantnim masenim učešćem papira (32 %) i organskih materija (22 %). Svestrani pritisci su imali vrednosti 50, 100 i 300 kPa. Oni su konstatovali da se rezultati relativno dobro slažu sa rezultatima slično izvedenih opita na drugim vrstama otpada, s obzirom da pri relativnim deformacijama $\varepsilon_1 = 35 \%$ - 45 %, ni u jednom slučaju nije došlo do loma. Stoga, kod analize geotehničkih uslova projektovanja deponija, veću pažnju treba obratiti na veličinu deformacija, nego na mogućnost da dođe do loma (sličnu šematizaciju su predložili i drugi autori: Jessberger i Kockel; Cowland i dr.). U vezi sa tim, autori su prikazali zavisnost efektivnih parametara čvrstoće smicanja (kohezije i ugla unutrašnjeg trenja) od relativnih deformacija (Slika 6.43).



Slika 6.43. Zavisnost efektivnih parametara čvrstoće smicanja, dobijenih triaksijalnim ispitivanjima od relativnih deformacija (Grisolia i dr. 1995)

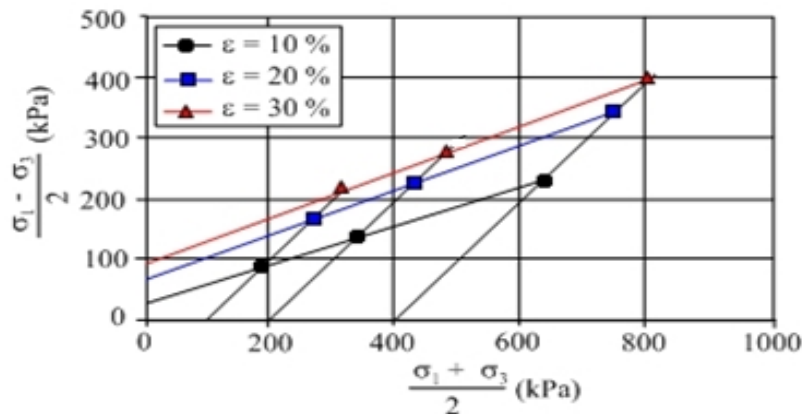
Sa slike se može videti da se pri deformacijama 10 - 15 % uglovi unutrašnjeg trenja kreću u granicama $\phi' = 10 - 25^\circ$ i da sa porastom relativnih deformacija na 20 - 35 %, oni rastu do $\phi' = 30 - 40^\circ$. Slično je i sa kohezijom, koja se takođe znatno menja sa promenom relativnih deformacija. Ona je praktično zanemarljiva, tj. $c' = 2-5 \text{ kPa}$ za deformacije do 15 %, a u zoni većih deformacija ($\varepsilon_1 > 30 - 35\%$) i mala povećanja dovode do znatnog povećanja kohezije tj. $c' = 50 \text{ kPa}$.

Triaksijalna ispitivanja na uzorcima komunalnog otpada vršili su i Machado i dr. (2002). U sastavu ispitivanog otpada, dominirale su organske materije, tlo i frakcije stena sa 65 % suvog masenog učešća, a sem plastičnih frakcija sa učešćem od 17 %, ostali materijali nisu prelazili 5 %. Priprema uzorka je izvršena zbijenjem do postizanja zapreminske težine $\gamma = 10, 12$ i 14 kN/m^3 . Prečnici formiranih uzoraka iznosili su 150 i 200 mm, a visina 300 i 400 mm. Ispitivanje je obavljeno na zasićenim uzorcima i uzorcima prirodne vlažnosti, sa ćelijskim pritiscima 100, 200 i 400 kPa. Za pripremu uzoraka, korišćen je komunalni otpad dobijen istražnim bušenjem, s tim da je prvo izvršeno njegovo mešanje, a nakon toga su frakcije krupnije od 30 mm (kod uzoraka prečnika 150 mm) odnosno 40 mm (kod uzoraka prečnike 200 mm) zamenjene istom količinom sitnijeg materijala iz komunalnog otpada.

Takođe su dobijene karakteristične krive smicanja koje pokazuju da, sa povećanjem devijatora napona, kontinualno rastu i aksijalne deformacije (ϵ_1), ali bez jasno izraženog loma. Pored toga, autori su zapazili još jednu karakteristiku, a to je smanjenje zapreminskih deformacija (ϵ_v) sa porastom devijatora napona. Primenom Kulon-Mor-Tercagijeve jednačine čvrstoće smicanja, autori su definisali parametre za određene vrednosti relativnih deformacija. Rezultati su pokazali da mobilisani parametri čvrstoće smicanja imaju tendenciju porasta sa porastom relativnih deformacija, i objasnili su da na to najveći uticaj ima efekat armiranja koji daju ljuspaste frakcije (plastika, tekstil itd.). Ispitivanja su izvedena u dreniranim uslovima a rezultati su prikazani u vidu putanje napona, na kojima su prikazane i linije loma za različite vrednosti relativnih deformacija (Slika 6.44).

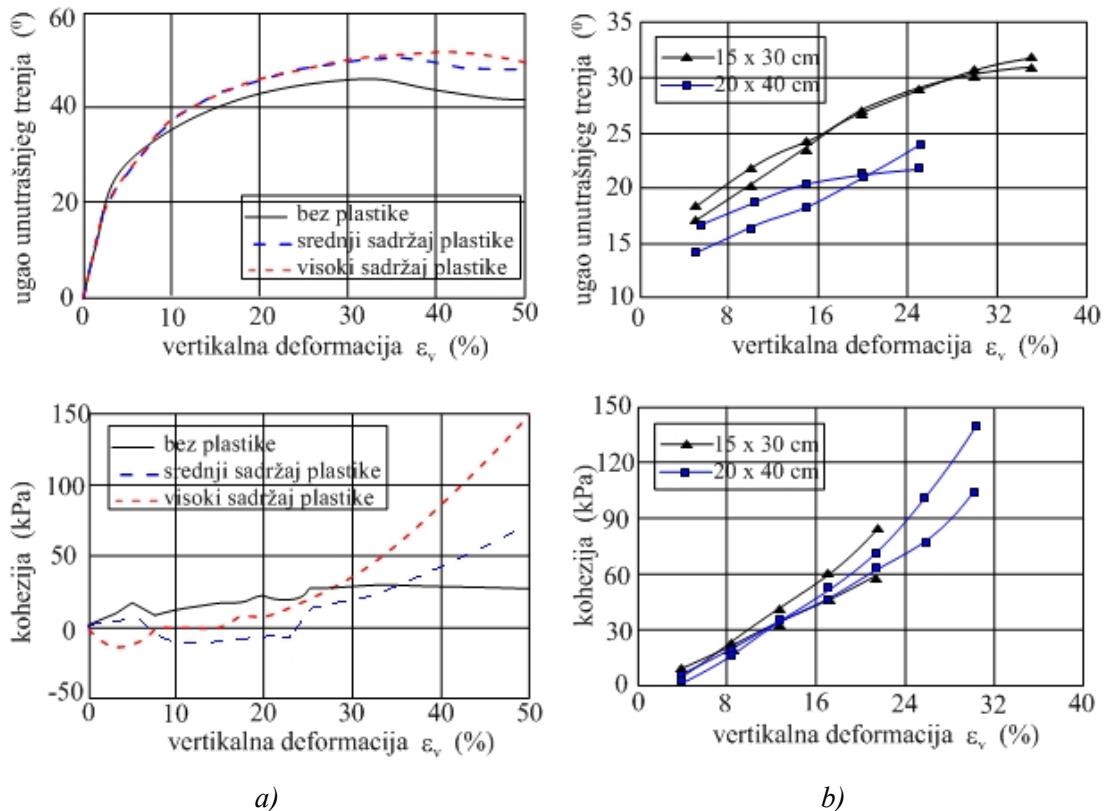
I u ovakvim uslovima, (kao što su opisali Jessberger i dr.), ugao unutrašnjeg trenja se mobiliše pri velikim deformacijama, dok vrednosti kohezije zavise od sadržaja armirajućih frakcija, tako da ona počinje da se mobiliše pri aksijalnim deformacijama većim $\epsilon_1 > 10\%$, s tim da se vršna vrednost i dalje ne može utvrditi tj. ne može da se odredi naponsko stanje pri lomu, primenom uobičajenih naponsko-deformacijskih kriterijuma loma. U vezi sa napred navedenim, Machado i dr., na Slici 6.45a prikazuju rezultate Kockel i Jessberger-a (1995) koji se odnose na komunalni otpad sa različitim sadržajem plastičnog materijala. Pored toga, na slici 6.45b su prikazani i tipični rezultati

do kojih su došli Machado i dr. (2002). Autori navode da se radi o sličnom ponašanju u oba analizirana slučaja, s tim da vrednosti ugla unutrašnjeg trenja u drugom slučaju nisu jasno utvrđene, a kao osnovni razlog za to navode neravnomerno učešće i raspored plastičnih frakcija u ispitivanim uzorcima.



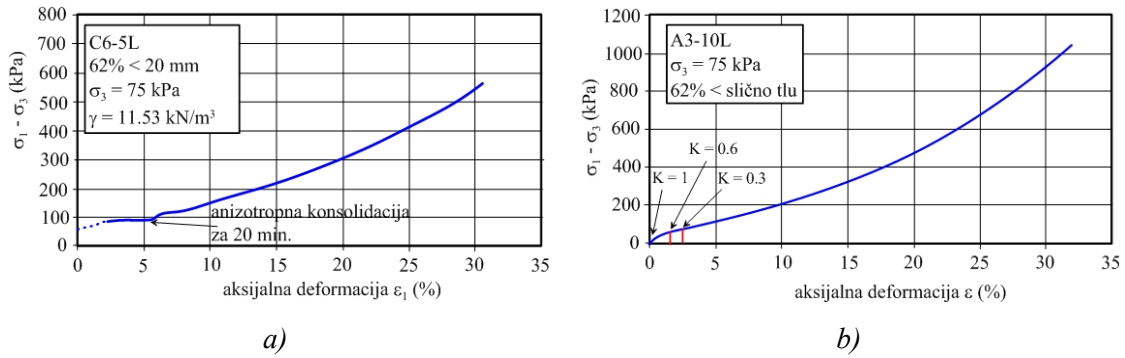
Slika 6.44. Putanje napona i linije loma za različite relativne deformacije dobijene na prirodno vlažnim uzorcima sa zapreminskom težinom $\gamma = 10 \text{ kN/m}^3$ (Machado i dr. 2002)

Zekkos (2005) je na Univerzitetu u Berkliju u Kaliforniji izveo veći broj triaksijalnih ispitivanja kako bi utvrdio uticaj zapreminske težine, vertikalnih napona, efekta pomeranja i sastav otpada na naponsko-deformacijsko ponašanje. Ukupno je ispitao 27 uzoraka koji su formirani od materijala uzetog sa tri deponije koje se nalaze na različitim lokacijama. Kao i kod opita direktnog smicanja, otpad je prethodno usitnjen kako bi se formirali uzorci sa frakcijama sitnijim od 20 mm. Pored toga, formiran je i veći broj uzoraka dodavanjem frakcija otpada koje su krupnije od 20 mm. Za formiranje osam uzoraka, upotrebljen je samo materijal sa frakcijama manjim od 20 mm, od čega je manji broj formiran sa prečnicima 71 mm. Za formiranje većih uzoraka, sa prečnikom 305 mm i visinama koje su se kretale između 600 i 630 mm, upotrebljene su i krupnije frakcije, a procenat frakcija sitnijih od 20 mm iznosio je 11 – 76 %, s tim da je najveći broj uzoraka imao 62 % frakcija sitnijih od 20 mm (ukupno 14). Zapreminske težina uzoraka kretale su se u rasponu $\gamma = 7.5 - 14.7 \text{ kN/m}^3$, a vlažnost u granicama $w = 7.5 - 25.3 \%$. Vrednosti ćelijskih pritisaka su se kretale od $\sigma_3 = 68$ do 1150 kPa, s tim da je najveći broj uzoraka ispitan sa ćelijskim pritiskom od $\sigma_3 = 75 \text{ kPa}$.



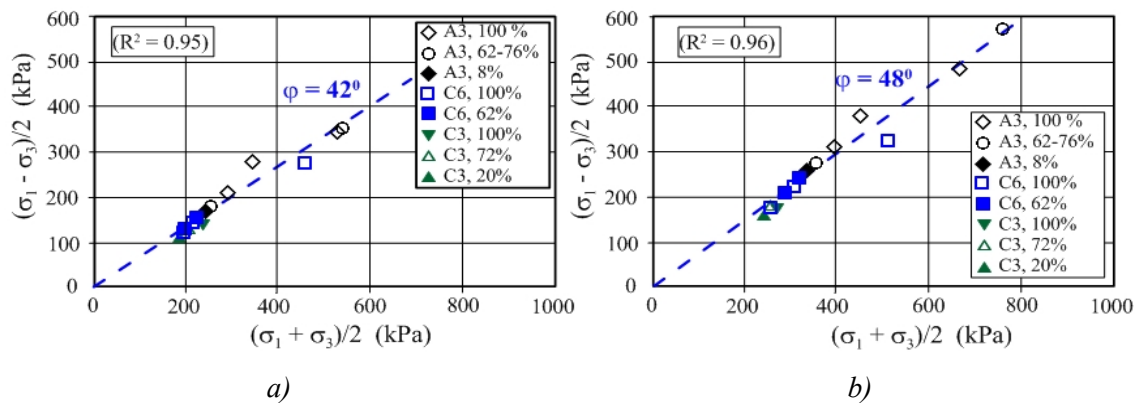
Slika 6.45. Mobilisani parametri čvrstoće smicanja u funkciji aksijalnih deformacija (Kockel and Jessberger, 1995; Machado et al., 2002)

Ispitivanja su pokazala da se kod uzoraka formiranih od 100 % frakcija sitnijih od 20 mm, pri velikim aksijalnim deformacijama (oko 20 %), otpadni materijal ponašao približno ponašanju zbijenog granularnog, odnosno prekonsolidovanog fino-zrnog tla. Sa povećanjem sadržaja armirajućih frakcija u otpadu, naponsko-deformacijsko ponašanje bilo je slično ponašanju tla sa deformacijskim očvršćavanjem (monotoni rast krive smicanja), što je na osnovu iskustva pri optima direktnog smicanja, pripisano aktiviranju armirajućih frakcija. Autor je, analizirajući putanje napona i relativna pomeranja, predložio da početno naponsko stanje pri smicanju bude K_0 stanje, a ne uobičajeni izotropni laboratorijski uslovi sa $K_0 = 1.0$. Razlog za to je taj što izotropni uslovi nisu reprezentativni za terenske uslove ($\sigma_h < \sigma_v$). Na osnovu literaturnih podataka, autor je za početno geostatičko stanje, kao reprezentativnu vrednost za komunalni otpad, usvojio $K_0 = 0.3$, a za aksijalnu deformaciju vrednost $\varepsilon_1 = 5 \%$. U vezi sa tim, uzorci su podvrgnuti izotropnoj konsolidaciji u trajanju od 24 h delovanjem svestranog ćelijskog pritiska od $\sigma_3 = 75$ kPa. Nakon toga je izvršena anizotropna konsolidacija u trajanju od svega 20 min, u uslovima $K = 0.3$ i $\sigma_3 = 75$ kPa.



Slika 6.46 a) Naponsko-deformacijska kriva za anizotropno konsolidovani uzorak b) Deformacije do dostizanja različitih K uslova tokom tipičnih opita koji su obavljani na Univerzitetu u Berkliju (Zekkos, 2005)

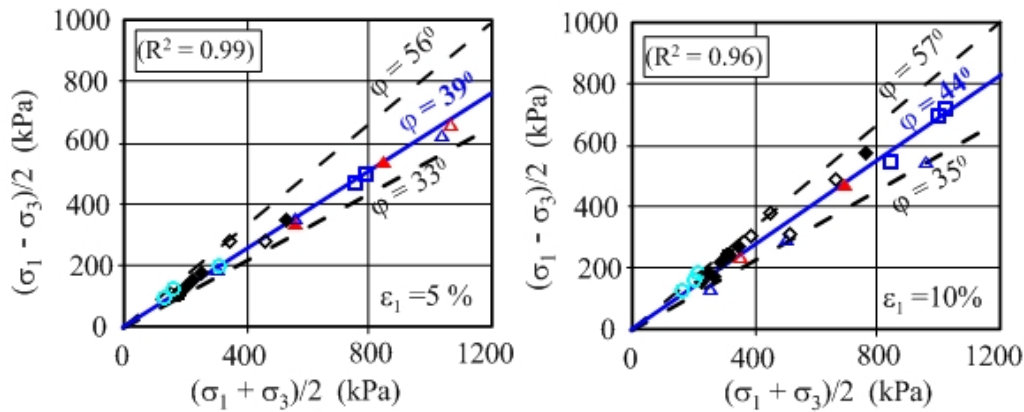
Za ovako kratko vreme anizotropne konsolidacije, dostignuta je aksijalna deformacija $\varepsilon_1 = 6\%$ (Slika 6.46). Autor je čvrstoću smicanja komunalnog otpada definisano na osnovu mobilisanog napona smicanja pri $K = 0.3$ za 5 i 10% aksijalnih deformacija. Na taj način su dobijeni uglovi unutrašnjeg trenja $\varphi = 42^\circ$ i 48° (Slika 6.47).



Slika 6.47. Mobilisani naponi i anvelopa loma za $K = 0.3$ i za a) 5% aksijalne deformacije i b) 10% aksijalne deformacije (Zekkos, 2005)

Pored toga, čvrstoća smicanja otpada analizirana je i pri mobilisanim naponima smicanja za $K = 1.0$ i 0.6 , takođe za 5% i 10% aksijalnih deformacija. Zaključeno je da se sa povećanjem nivoa napona znatno smanjivalo rasipanje podataka, dok se čvrstoća smicanja povećavala. Autor je dobijene rezultate upoređivao i sa literaturnim podacima (Grisolia i dr. 1995; Jessberger i Kockel, 1995; Vilar i Carvalho, 2002; Towhata i dr. 2004). Zapaženo je da je rasipanje rezultata znatno manje za veće nivoje napona. Na osnovu ovih analiza je dobijen ugao unutrašnjeg trenja koji se kretao u intervalu $\varphi = 33 - 57^\circ$, pri čemu je kao reprezentativna vrednost za kriterijum $K = 0.3$ i 5% aksijalnu

deformaciju, usvojen ugao unutrašnjeg trenja $\varphi = 39^\circ$ a za $K = 0.3$ i 10 % aksijalnu deformaciju, usvojen je $\varphi = 44^\circ$ (Slika 6.48).

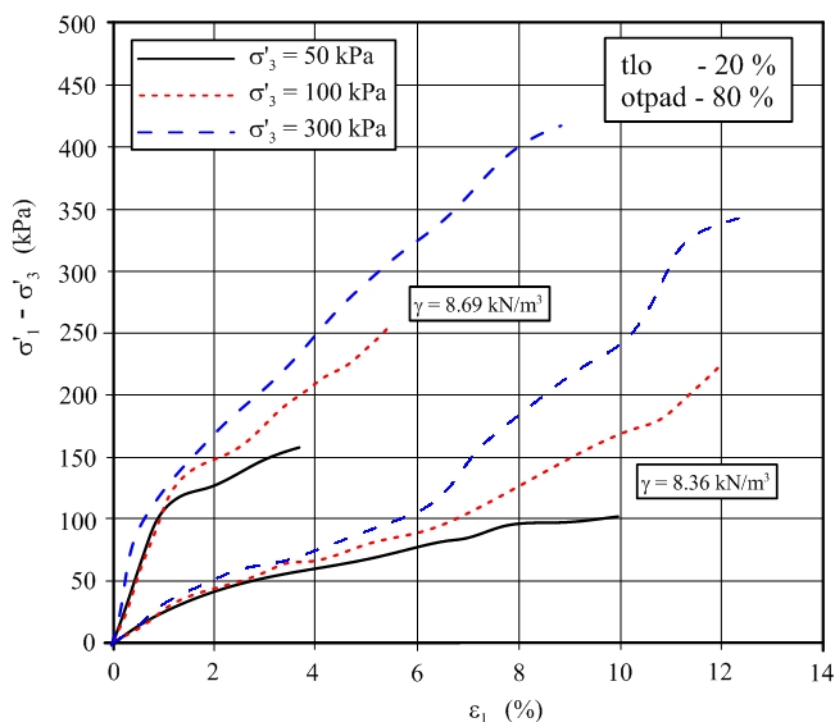


Slika 6.48. Parametri čvrstoće smicanja za $K=0.3$ i za različite aksijalne deformacije (Zekkos, 2005)

Na tri uzorka su vršeni i opiti rasterećenja, a rezultati pokazuju da materijal otpada koji je prethodno u više faza „konsolidovan“, tako što bi nakon dostizanja određenog nivoa napona bio rasterećen i ponovno opterećen, ima znatno veću čvrstoću smicanja nego što je čvrstoća smicanja otpada pri konstantnim naponima konsolidacije. Objasnjenje za ovaj efekat autor je tražio u armirajućoj prirodi otpadnog materijala i potencijalnom uklapanju frakcija. Pored toga, treba napomenuti da je autor izvršio i triaksijalne opite istezanja, pri čemu je dobijen ugao unutrašnjeg trenja koji je istog reda veličine kao i ugao dobijen klasičnim kompresionim triaksijalnim ispitivanjima pri većim aksijalnim deformacijama. Međutim, uslovi vršnog napona smicanja pri zatezanju su postignuti pri relativno malim istezanjima od oko 1 %, za razliku od triaksijalnih opita kompresije u kojima su uslovi vršnog napona smicanja dostignuti pri aksijalnim deformacijama većim od $\varepsilon_1 = 20\%$. Pored toga, kod opita istezanja naponsko-deformacijska kriva nije pokazala rast naviše kao kod klasičnih triaksijalnih opita kompresije. Zekkos (2005) je na kraju preporučio da veće čvrstoće smicanja, koje su utvrđene triaksijalnim opitima, ne bi trebalo koristiti pri projektovanju kosina deponija. Međutim, treba ih uzeti u obzir pri povratnim analizama stabilnosti i kod analiza stabilnosti kosina čija klizna površina preseca uslojene materijale deponije.

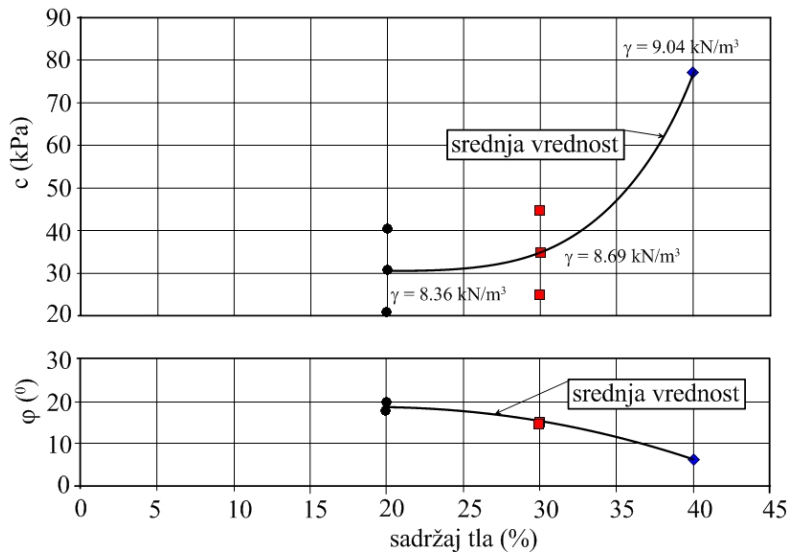
Za potrebe projektovanja deponije otpada u opštini Centar Župa u Makedoniji, Papić i saradnici (2007) su u laboratoriji za mehaniku tla građevinskog fakulteta u Skoplju

izveli pet dreniranih triaksijalnih opita. Ispitivane su tri serije uzoraka sa različitim masenim sadržajem tla (20, 30 i 40 %) i otpada (80, 70 i 60 %). Ispitivani su uzorci visine $h = 20.2$ cm i prečnika $d = 10.1$ cm, sa zapreminskim težinama $\gamma = 8.28 - 9.17$ kN/m³. Konsolidacija je obavljena sa ćelijskim pritiscima $\sigma_3 = 50, 100$ i 300 kPa, i trajala je 24 h. Nakon obavljene konsolidacije uzorci su smicani brzinom od 0.05 mm/min, u dreniranim uslovima, čime se simuliralo nesmetano kretanje filtrata u deponiji. Ispitivanja su i u ovom slučaju potvrdila da sa porastom devijatora napona, aksijalne deformacije monotono rastu. (Slika 6.49).



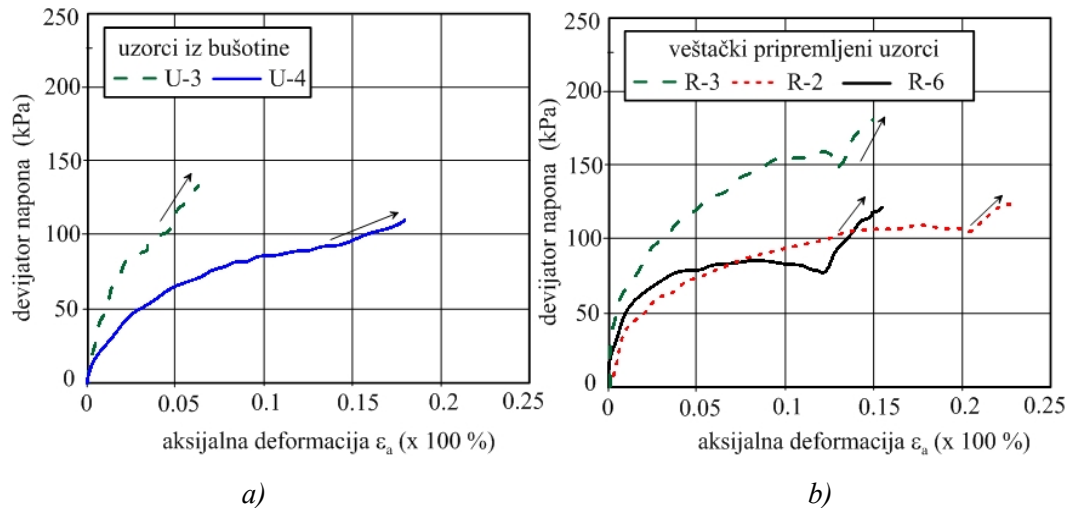
Slika 6.49. Rezultati triaksijalnih ispitivanja otpada (Papić i sar. 2007)

Rezultati parametara čvrstoće smicanja, u zavisnosti od procentualnog sadržaja tla i otpada, prikazani su na Slici 6.50. Primećuje se da sa porastom sadržaja tla, dolazi do opadanja ugla unutrašnjeg trenja, za razliku od kohezije koja značajno raste. Ovo je, pre svega, posledica sobina zemljastog materijala, ali i veće zapreminske težine uzorka koji je pripremljen sa 40 % sadržaja tla. Karakteristično je to što se na svim ispitivanim uzorcima pokazalo odstupanje od Mor-Kulonove anvelope loma, pojavom nelinearnosti pri niskim nivoima normalnih napona.



Slika 6.50. Parametri čvrstoće smicanja u zavisnosti od sadržaja tla (Papić i sar. 2007)

Singh (2008) je vršio triaksijalne konsolidovane nedrenirane opite u velikoj ćeliji na uzorcima otpada dobijenim direktno istražnim bušenjem, pomoću specijalne opreme za bušenje i na veštački pripremljenim uzorcima. Neporemećeni uzorci su pripremljeni po posebnom programu, jer su nakon određivanja prirodne vlažnosti i zapreminske težine, zasićeni a nakon toga zamrznuti, kako bi se sačuvala njihova prirodna struktura i sastav i ujedno olakšala priprema probnih tela (prečnika od 150 do 200 mm i visine 300-400 mm). Za poremećene uzorke je iskorišćen isti materijal od kojeg su formirani neporemećeni uzorci, nakon obavljenih triaksijalnih ispitivanja. Priprema uzorka je obavljena sabijanjem materijala (sabijanje je obavljeno u četiri sloja kako bi se modelirao način odlaganja otpada) u cilindru do postizanja željene zapreminske težine, a nakon toga su po istom postupku (zasićenje i zamrzavanje) pripremljena probna tela. Ukupno je obavljeno 5 opita na neporemećenim i 9 opita na poremećenim uzorcima. Zapreminska težina neporemećenih uzoraka kretala se $\gamma = 11.3 - 13.7 \text{ kN/m}^3$ dok je kod poremećenih uzoraka iznosila $\gamma = 12.6 - 15.8 \text{ kN/m}^3$. Za većinu uzoraka su dobijene neuobičajene naponsko-deformacijske krive sa kojih se vidi da je nakon dostizanja "prividne" vršne čvrstoće, daljim povećanjem devijatora napona, naponsko-deformacijska kriva nastavila da raste skoro linearno (Slika 6.51). Karakteristično je i to što su se poremećeni uzorci ponašali plastičnije i stvarali su veće porne pritiske, u odnosu na neporemećene uzorke koji su se pokazali kao manje deformabilnim i generisali su manje porne pritiske.



Slika 6.51 Naponsko-deformacijske zavisnosti triaksijalnih CU opita za a) neporemećene uzorke i b) poremećene uzorke (Singh, 2008)

Dobijeni rezultati ispitivanja su analizirani pomoću putanje efektivnih napona (Slika 6.52) i na osnovu toga su korišćenjem sledećih izraza određeni parametri čvrstoće smicanja

$$q = M \cdot p' + q_c \quad (6.7)$$

$$\varphi' = \sin^{-1} \left(\frac{3M}{6 + M} \right) \quad (6.8)$$

$$c' = k \left[\frac{3 - \sin \varphi'}{6 \cos \varphi'} \right] \quad (6.9)$$

gde je:

M – gradijent anvelope loma dobijen u dijagramu putanje napona (p' - q)

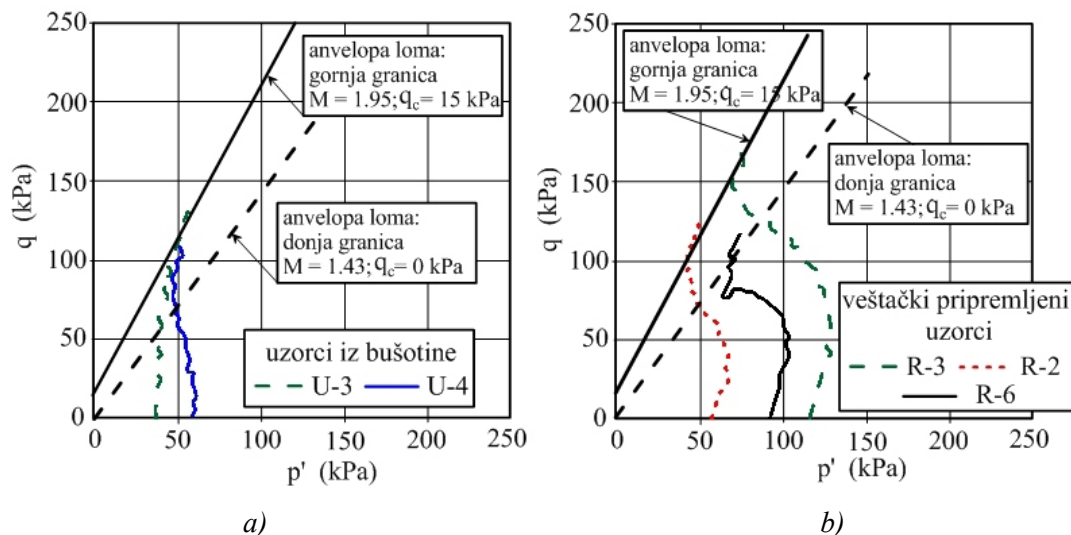
q_c – odsečak anvelope loma na q osi

$$p' = (\sigma'_1 + 2\sigma'_3)/3$$

$$q = (\sigma'_1 - \sigma'_3)$$

Autor je predložio donje i gornje granice efektivnih parametara čvrstoće smicanja, i to: za koheziju $c'_{\min} = 0$ kPa i $c'_{\max} = 8.4$ kPa, a za ugao unutrašnjeg trenja $\varphi'_{\min} = 35^\circ$ i $\varphi'_{\max} = 47^\circ$. Predložene maksimalne vrednosti su se dobro slagale i sa hiperbolički ekstrapolovanim rezultatima koji su dobijeni opitom direktnog smicanja, koji je autor izveo na jednom uzorku sa četiri probna tela. Pored toga, rezultati triaksijalnih ispitivanja su pokazali da neporemećeni i poremećeni uzorci otpada imaju dosta slične

vrednosti parametara čvrstoće smicanja. Međutim, bez obzira na slične vrednosti parametara čvrstoće smicanja, naponsko-deformacijski dijagrami tj. dijagrami putanje napona, bili su potpuno različiti za neporemećene i poremećene uzorke.



Slika 6.52. Putanje efektivnih napona sa anvelopama loma za a) neporemećene uzorke i b) poremećene uzorke (Singh, 2008)

U Tabeli 6.3 je dat detaljan prikaz parametara čvrstoće smicanja dobijenih na osnovu trikasijalnih ispitivanja. I ovde se kao i kod opita direktnog smicanja, uočava veće rasipanje rezultata, ali generalno se radi o nešto većim vrednostima parametara čvrstoće smicanja u odnosu na vrednosti prikazane u Tabeli 6.2, koja se odnosi na rezultate iz opita direktnog smicanja (Rakić i dr. 2005, 2009).

6.3.1.3. Opiti izvedeni na terenu

In-situ opiti direktnog smicanja, na neporemećenim uzorcima, bez sumnje pružaju realnije vrednosti čvrstoće smicanja u odnosu na izmerene vrednosti na nezbijenim i veštački pripremljenim uzorcima. Međutim, ovi opiti se teško izvode (skupi su i vremenski dugo traju) pa zato nisu pogodni, ako se želi izvođenje velikog broja opita za dobijanje reprezentativnih vrednosti čvrstoće smicanja komunalnog otpada. Međutim, opiti in situ koje su izvršili Hjuston i dr. (1995), Withiam i dr. (1995), Mazzucato i dr. (1999), Thomas i dr. (1999), Caicedo i dr. (2002) značajno su doprineli poznavanju čvrstoće smicanja čvrstog komunalnog otpada.

Tabela 6.3. Parametri čvrstoće smicanja određeni triaksijalnim ispitivanjima

Autori	Parametri čvrstoće smicanja		Detalji vezani za ispitivanje
	c' (kPa)	ϕ' ($^{\circ}$)	
Siegel et al. (1990)	0	44	anizotropno konsolidovani uzorci stari 2 god.
Oweis (1993)	0	43-45	UU opit sa 20 % fino-zrnih frakcija
Gabr & Valero (1995)	17	34	CU opit (mali uzorci) γ_d od 7.4-8.2 kN/m ³
Grisolia et al. (1995)	2-50	15-40	mob. vrednosti u zavisnosti od relativnih pomeranja
Jessberger et al. (1995)	20-200	21-45	veliki uzorci h = 60 cm i mali h = 20 cm, različita starost
Reuter and Nolte (1995)	?	18-44	Obrađivali podatke Jessbergera
Grisolia & Napoleoni (1996)	70	45	CD opit, pri 40 % napona
Vilar & Carvalho (2002)	23.3	20	CD opit, 10% napona, $\gamma = 10-14$ kN/m ³
	77.4	32	CD opit, 30% napona, $\gamma = 10-14$ kN/m ³
Machado et al. (2002)	2-140	14-32	uzorci prečnika 150-200 mm i visine 300-400 mm
Harris et al. (2006)	9-14	20-29	CU opit na velikim uzorcima ali i DS
Zwanenburg et al. (2007)	-	35-37	opit na velikim uzorcima
Zekkos et al. (2005)	-	34-44	$\sigma_3 = 200$ kPa, različit sadržaj frakcija sitnijih od 20 mm
Papić (2007)	21-77	6-20	opit sa različitim učešćem zemljaste frakcije od 20-40%.
Reddy et al. (2008)	38	16	svež otpad
Singh et al. (2008)	0-8.4	35-47	opit na velikim uzorcima (neporemećeni i obrađeni)

6.3.2. Literaturni podaci vezani za podatke dobijene povratnim analizama

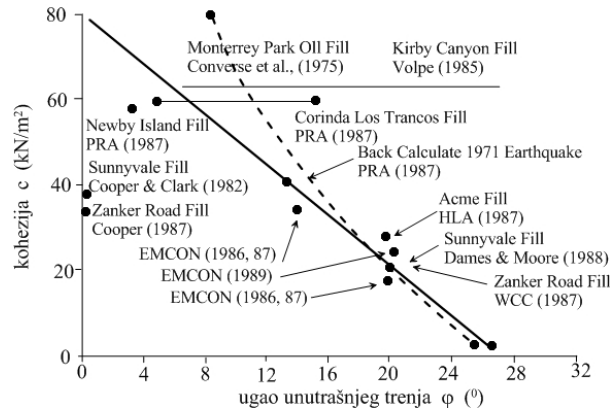
Za definisanje parametara čvrstoće smicanja često se koristi dijagram (Slika 6.53) koji su na osnovu brojnih terenskih ispitivanja i praćenja deformacija na deponijama u Los Anđelesu, predložili Singh i Murphy (1990). Parametre čvrstoće dobijene na osnovu analiza terenskih podataka, upoređivali su sa parametrima dobijenim povratnim analizama za različite kombinacije kohezije i ugla unutrašnjeg trenja. Pri tome je usvajan faktor sigurnosti $F_s = 1.3$ i 1.5 . Ovaj dijagram može korisno da posluži za dobijanje orijentacionih vrednosti parametara čvrstoće smicanja ali uz pažljivu interpretaciju, jer su kosine velikih deponija uglavnom umerenog nagiba i vrlo retko pokazuju znakove nestabilnosti. Pored toga, povratnim analizama stabilnosti može se odrediti veći broj kombinacija parametara čvrstoće smicanja koji ispunjavaju uslov ravnoteže, predstavljen jednom jednačinom sa dve nepoznate. Mnogi autori opravdavaju njegovo korišćenje time što ove vrednosti predstavljaju donju granicu raspoložive čvrstoće smicanja otpada, čime se dodatno povećava sigurnost u fazi

projektovanja kosina budućih deponija. Naime, i sami autori su konstatovali konstatuju da vrednosti parametara čvrstoće smicanja dobijene povratnim analizama, odgovaraju minimalnoj raspoloživoj smičućoj čvrstoći otpada. Oni su, pored toga, analizirali i parametre čvrstoće smicanja dobijene povratnim analizama na nekoliko deponija u južnoj Kaliforniji za vreme zemljotresa 1971 i 1987. god. Treba napomenuti da se u vezi sa ovim citiraju razni autori koji konstatuju da i nakon zemljotresa, kosine deponija sa strmim pa čak i vertikalnim nagibom, ostaju stabilne.

Na osnovu podataka o lomu deponija, Howland i Landva (1992) su analizirali dva slučaja čvrstoće smicanja komunalnog otpada. Prvi slučaj se odnosio na deponiju u Nju Džersiju, gde je do loma došlo nakon što je za 4 - 5 meseci odloženo približno 15.5 m novog komunalnog otpada, preko postojećeg otpada starog 15 godina. Autori napominju da je lom najverovatnije izazvalo padanje jake kiše u trajanju od tri dana. Drugi slučaj koji su autori analizirali, odnosi se na jednu deponiju u južnoj Kaliforniji. Naime, na površini ove deponije je izvršen opit opterećenja koji je izazvao lom kosine. Horizontalna pomeranja su praćena pomoću postavljenih inklinometara, na osnovu kojih je registrovano maksimalno pomeranje 43,2 cm. Po završetku opterećenja, pomeranja su se znatno smanjila, tako da se može smatrati da je kosina deponije bila u stabilnom stanju. U oba slučaja parametri čvrstoće smicanja su dobijeni su na osnovu rezultata povratnih analiza stabilnosti (Slika 6.54). Usvojena je vrednost faktora sigurnosti $F_s = 1.0$, kao i zapreminska težina komunalnog otpada $\gamma = 7.2 \text{ kN/m}^3$. Ovako dobijene vrednosti parametara čvrstoće smicanja (slučaj 3), upoređivali su sa rezultatima laboratorijskih ispitivanja koje su sproveli Landva i Clark (1990), u aparatu za direktno smicanje, i rezultatima terenskog opita direktnog smicanja (slučaj 4) koji su izveli Richardson i Reynolds (1991).

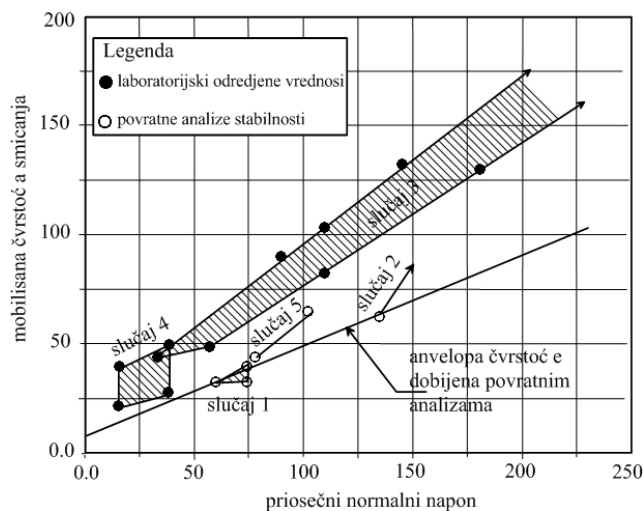
Opšti zaključak do kojeg su autori došli, odnosi se na to da je čvrstoća smicanja komunalnog otpada, dobijena povratnim analizama, znatno manja od čvrstoće smicanja dobijene opitima direktnog smicanja. Autorima nisu poznati razlozi koji su izazvali ovako velike razlike dobijenih rezultata, ali kao jednu od mogućnosti oni navode veći uticaj armirajućih materijala na merenja koja se izvode u aparatima koji su znatno

manjih dimenzija, nego što su dužine kliznih površina za koje su vršene povratne analize.



Slika 6.53. Parametri čvrstoće smicanja dobijeni povratnim analizama (Singh i Murphy, 1990)

Pored toga, kao jedan od mogućih razloga, navode da su parametri čvrstoće smicanja dobijeni povratnim analizama, često dobijani za kosine gde nije došlo do loma (klizanja). Iz tih razloga oni se zalažu da rezultate povratnih analiza uvek treba da prate i podaci koji se dobijaju iz opita direktnih smicanja. Na osnovu sprovedenih analiza, autori su za donje granice parametara čvrstoće smicanja predložili koheziju $c' = 10 \text{ kPa}$ i ugao unutrašnjeg trenja $\phi' = 23^\circ$.



Slika 6.54. Parametri čvrstoće smicanja komunalnog otpada dobijeni povratnim analizama, terenskim i laboratorijskim ispitivanjima (Howland i Landva, 1992)

Kavazanjian i dr. (1995) su primetili da sprovedene povratne analize na deponiji u Nju Džersiju, koje su prikazali Howland i Landva (1992), podcenjuju čvrstoću smicanja

komunalnog otpada, iz razloga jer se lom tla močvarne podloge najverovatnije dogodio pri relativno malim pomeranjima, što je uticalo da se na taj način mobilise samo mali deo čvrstoće komunalnog otpada. Drugim rečima, na prikazane rezultate, veliki uticaj ima i pretpostavljena čvrstoća smicanja podloge deponije. Isti autori takođe smatraju da opit opterećenja (koji je izveden u drugom slučaju), nije u potpunosti završen, bez obzira što su izmerene velike horizontalne deformacije, tj. kosina deponije nije pretrpela lom. Zato povratne analize koje su urađene sa faktorom sigurnosti $F_s = 1.0$, a da pri tom nije došlo do klizanja kosine, podcenjuju čvrstoću smicanja komunalnog otpada. Iz tih razloga Kavazanjian i dr. (1995) predlažu bilinearnu anvelopu lopa koja se zasniva prvenstveno na čvrstoći smicanja dobijenoj povratnim analizama, pri stvarnim slučajevima loma tj. klizanja, kao i na osnovu rezultata in situ opita (Slika 6.23, Poglavlje 6.3.1.1). Prilikom predlaganja ove anvelope loma laboratorijski podaci nisu korišćeni, osim jedne serije podataka dobijene u velikom aparatu za direktno smicanje (Landva i Clark, 1990). Svi terenski i laboratorijski rezultati su prikazani u Tabeli. 6.4.

6.4. Terenski i laboratorijski podaci sa preporukama parametara čvrstoće smicanja (Kavazanjian i dr. 1995)

Referenca	Metoda određivanja podataka	Rezultati	Komentar
Pagotto and Rimoldi (1987)	Povratne analize nakon prethodnog opita opterećenja	$\varphi = 22^0$; $c = 29$ kPa	Nema podataka o vrsti otpada, načina i uslova izvođenja
Landva and Clark (1990)	Laboratorijski podaci iz opita direktnog smicanja	$\varphi = 24^0$; $c = 23$ kPa do $\varphi = 39^0$; $c = 16$ kPa	Normalni napon do 480 kPa
Richardson and Reynolds (1991)	Opiti direktnog smicanja u velikim aparatima izvedeni in situ	$\varphi = 18^0$ do 43^0 i $c = 10$ kPa	Normalni napon u intervalu od 14 do 38 kPa. Zapreminska težina otpada sa prekrivkom $\gamma = 15$ kN/m ³

U Tabeli 6.5 su prikazane su vrednosti parametara čvrstoće smicanja komunalnog otpada koje preporučuju Kavazanjian i dr. (1995), a koje su dobijene povratnim analizama na četiri deponije. Povratne analize stabilnosti vršene su Bišopovom modifikovanom metodom lamela, uz usvajanje kohezije $c' = 5$ kPa. S obzirom da se radilo o stabilnim kosinama, pretpostavljen je faktor sigurnosti $F_s = 1.2$.

6.5. Ugao unutrašnjeg trenja na kosinama postojećih deponija (Kavazanjian i dr. 1995)

Deponija	Maksimalna kosina		Čvrstoća smicanja otpada*, ϕ		
	Visina (m)	Nagib (H : V)	$F_s = 1.0$	$F_s = 1.1$	$F_s = 1.2$
Lopez Canyon, CA	35	1.7 : 1	25 ⁰	27 ⁰	29 ⁰
Oll, CA	20	1.6 : 1	28 ⁰	30 ⁰	34 ⁰
Babylon, NY	10	1.25 : 1	30 ⁰	34 ⁰	38 ⁰
Private Landfill, OH	10	1.2 : 1	30 ⁰	34 ⁰	37 ⁰

* faktor sigurnosti F_s određen povratnim analizama sa usvojenom kohezijom $c = 5$ kPa

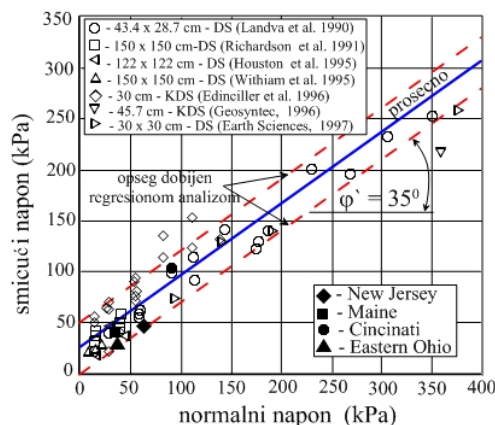
Augello i dr. (1995) su prikazali su rezultate istraživanja seizmičkog ponašanja deponija komunalnog otpada za vreme zemljotresa u Northridge, 1994. Autori su u svojim analizama koristili preporuke koje su predložili Kavazanjian i dr. (1995), a koje se odnose na zapreminsku težinu i čvrstoću smicanja. Analize su pokazale da se statički uglovi unutrašnjeg trenja, za faktor sigurnosti $F_s = 1.2$, kreću između $\phi_{st} = 19 - 35^0$, dok su se vrednosti dinamičkih uglova unutrašnjeg trenja komunalnog otpada, kretale između $\phi_{din} = 30 - 40^0$. Ovo dovodi do zaključka da je čvrstoća komunalnog otpada na deponiji, u dinamičkim uslovima, veća od čvrstoće smicanja u analizama statičke stabilnosti. Isti autori su nešto kasnije (Augello i dr. 1998) dopunili postojeće rezultate seizmičkog ponašanja deponija komunalnog otpada za, vreme zemljotresa u Northridge, 1994., analizama koje su uključile i novije podatke o čvrstoći smicanja otpada. Povratne analize su radili sa statičkim i dinamičkim parametrima čvrstoće smicanja, uključujući i brzine smičućih talasa i zapreminske težine po Kavazanjianu et al. (1996). U statičkim povratnim analizama, za pretpostavljeni faktor sigurnosti $F_s = 1.3$, dobijene su vrednosti ugla unutrašnjeg trenja $\phi_{st} = 25 - 41^0$. Povratnim analizama stabilnosti u dinamičkim uslovima, koje su sprovedene za tri deponije, dobijene su vrednosti ugla unutrašnjeg trenja $\phi_{din} = 27 - 45^0$. Na osnovu ovih rezultata, autori su predložili da se u analizama stabilnosti koriste osrednjene vrednosti ugla unutrašnjeg trenja u rasponu od $\phi' = 33^0 - 38^0$.

Gilbert i dr. (1998) opisuju poteškoće vezane za dobijanje realnih vrednosti parametara čvrstoće smicanja iz povratnih analiza. Po njihovom mišljenju povratne analize imaju prednost nad laboratorijskim opitima, pre svega zbog razmere posmatranja i činjenice da se odnose na materijal koji se nalazi na licu mesta. Međutim, autori navode i nekoliko poteškoća vezanih za povratne analize, koje su zapazili drugi autori:

- vrlo retko je poznata tačna geometrija kosine, građa podloge i tačno definisana klizna površina
- teško se utvrđuje mehanizam loma, kao što je recimo progresivni lom
- podaci koji se odnose na porne pritiske po pravilu su oskudni, a često ih i nema
- postoji više načina prikaza čvrstoće smicanja, kao što su različite kombinacije kohezije i ugla unutrašnjeg trenja, ili recimo linearna, odnosno, nelinearna anvelopa loma

Iz tih razloga autori predlažu kombinovanje podataka iz svih mogućih izvora, tj. laboratorijska i terenska ispitivanja i iskustva vezana za dobijanje potencijalnih kliznih površina iz povratnih analiza stabilnosti.

Eid i dr. (2000) su za određivanje parametara čvrstoće smicanja koristili rezultate opita direktnog smicanja u velikoj razmeri, kao i rezultate povratne analize na nestabilnim kosinama deponija. Oni su analizirali podatke za četiri deponije, za koje su podaci bili dovoljno kvalitetni i na kojima je pouzdano utvrđena čvrstoća smicanja komunalnog otpada. Analize su urađene za još devet deponija, ali zbog nepouzdanosti podataka, koji se odnose na geometrijske karakteristike kliznog tela, porne pritiske i litološku građu podloge, nisu prikazani na zbirnom dijagramu čvrstoće smicanja (Slika 6.55).



Slika 6.55. Dijagram čvrstoće smicanja dobijen na osnovu laboratorijskih opita i podataka dobijenih povratnim analizama (Eid i dr. 2000)

Autori smatraju da se za definisanje čvrstoće smicanja komunalnog otpada može primeniti linearni Kulon-Mor-Tercagijev kriterijum loma. Na osnovu svojih i brojnih

literaturnih podataka, autori su za definisanje parametara čvrstoće smicanja predložili uzanu zonu sa efektivnom kohezijom $c' = 0-50$ kPa, odnosno linearnu anvelopu loma kojoj odgovaraju prosečna vrednost kohezije $c' = 25$ kPa i ugao unutrašnjeg trenja $\phi' = 35^{\circ}$. Donja i gornja granica predložene zone, u stvari, predstavljaju čvrstoću smicanja otpada koji sadrži više zemljastih i muljevutih frakcija, odnosno više frakcija plastike. Autori ne objašnjavaju zašto su vrednosti parametara čvrstoće smicanja visoke, ali kao jedan od mogućih razloga navode to što su plastične frakcije i drugi materijali u otpadu međusobno vezani.

Treba napomenuti da su još neki autori analizirali parametre čvrstoće smicanja na osnovu rezultata povratnih analiza, pre svih Cowland i dr. (1993) i Fassett i dr. (1994). Analize su se odnosile na stabilnost kosina deponija kod kojih nije došlo do loma za vreme zemljotresa.

U Tabeli 6.6 je dat se skupni prikaz parametara čvrstoće smicanja dobijenih na osnovu povratnih analiza i na osnovu predloga pojedinih autora, bilo da su vršili sopstvena istraživanja ili da su analizirali rezultate drugih autora (na osnovu laboratorijskih i terenskih ispitivanja). Očigledno je da su ovde rasipanja rezultata znatno manja, u poređenju sa podacima prikazanim u Tabelama 6.2 i 6.3.

Tabela 6.6. Parametri čvrstoće smicanja dobijeni povratnim analizama i na osnovu predloga autora

Autori	Parametri čvrstoće smicanja		Detalji vezani za ispitivanje
	c' (kPa)	ϕ' ($^{\circ}$)	
Pagotto and Rimoldi (1987)	29	22	povratne analize nakon obavljenih opterećenja
Singh and Murphy (1990)	0-80	0-27	povratne analize sa komb. param. za $F_s = 1.3$ i 1.5
Howland et al. (1992)	10	23	povratne analize iz opita opterećenja sa izazivanjem loma
Jessberger (1994)	0-28	15-42	zasnovano na povratnim analizama (2), procenama (2), i predloženo ali nepotvrđeno (3)
Fassett et al. (1994)	10	23	predloženo od strane autora
Kolsch (1995)	15-18	15-22	predloženo od strane autora (1), povratna analiza (1)
Kavazanjian et al. (1995)	5	25-37	predložili bilinearnu anvelopu ($F_s = 1.0; 1.1; 1.2$)
Augello et al. (1995)	0	19-35	pri statičkim uslovima
		30-40	pri dinamičkim uslovima
		33-38	predloženo od strane autora
Manassero et al. (1996)	20	0	predložene vrednosti u zavisnosti od normalnih napona
	0	38	
	20	24	
Jones et al. (1997)	5	25	predlog na osnovu izvršenih ispitivanja
	10.5	31	predlog na osnovu literaturnih podataka
Zeccos (2005)	0	39	predlog na osnovu izvršenih triaksijalnih ispitivanja

Na osnovu nekih podataka vezanih za degradaciju organskog tla (Andersland i Al-Khafaji 1980, Wardwell i Nelson 1981, Al Khafaji i Andersland 1981), može se pretpostaviti da kod komunalnog otpada, zbog visokog sadržaja organskih materija, čvrstoća smicanja vremenom opada. Međutim, u literaturi nema mnogo podataka koji se odnose na čvrstoću smicanja komunalnog otpada u funkciji vremena. Landva i dr. (1984) su primetili blagi pad ugla unutrašnjeg trenja kada je u pitanju jednogodišnji zasićeni otpad. Kavazanjian (1995) je došao do sličnog zaključka koji se odnosi i na ugao unutrašnjeg trenja, ali i na koheziju, kada su u laboratorijskim uslovima sprovedeni opiti nakon ubrzane degradacije komunalnog otpada. Ali, podatke koje su dobili Van Impe i dr. (1998) su u suprotnosti sa ovim zapažanjima, jer su njihovi rezultati pokazali povećanje parametara čvrstoće smicanja na uzorcima starijeg otpada, u odnosu na uzorke sveže deponovanog otpada. Do sličnih rezultata je došao i Hossain (2002), koji je izučavao parametre čvrstoće smicanja pri ubrzanom raspadanju koje je kvantifikovano merenjem odnosa $(C+H)/L$.

6.4. METODE I PROGRAM ISPITIVANJA

Fizičke osobine otpada kao što je veličina frakcija (krupnoća), zapreminska težina ili vlažnost, zajedno sa biološkim osobinama kao što je sadržaj organskih materija, starost i brzina raspadanja otpada, u velikoj meri utiču na izbor metode i način izvođenja opita (npr. veličinu horizontalnih pomeranja, brzinu smicanja). Landva i Clark (1990) su zapazili razlike u vrednostima čvrstoće smicanja određene različitim metodama. Oni navode da je čvrstoća smicanja određena triaksijalnim opitom vrlo visoka za otpad sa velikim sadržajem armirajućih materijala i da se znatno smanjuje sa opadanjem ovih frakcija. Međutim, ukoliko se opit direktnog smicanja izvede na otpadu sa armirajućim frakcijama koje su orijentisane paralelno ravni smicanja, dobija se minimalna čvrstoća smicanja. Isti autori su primetili da čvrstoća smicanja ne zavisi samo od vrste otpadnog materijala, već i od načina deformisanja i smicanja.

6.4.1. Metode ispitivanja

Bez obzira na to što se komunalni otpad znatno razlikuje od prirodnih sredina, za određivanje mehaničkih karakteristika otpada, koriste se metode koje su razvijene za

tlo. U praksi se primenjuju tri metode za određivanje parametara čvrstoće smicanja otpada:

- laboratorijski opiti (opit direktnog smicanja - DS i opit triaksijalne kompresije - TX)
- opiti in situ (standardna penetracija SPT, statička penetracija CPT i krilna sonda) koji uključuju i opite direktnog smicanja koji se izvode u pripremljenim iskopima u samom otpadu
- rezultati povratne analize i osmatranja na utvrđenim kliznim telima ili nestabilnim kosinama na deponijama

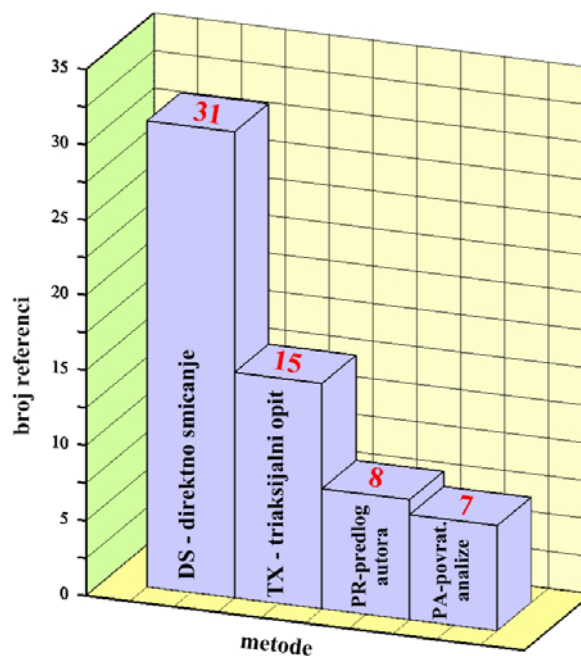
Od laboratorijskih opita, najčešće se koristi direktno smicanje, pre svega zbog nešto jednostavnije pripreme uzoraka, a i činjenice da se mogu konstruisati i aparati većih dimenzija. Primenjuju se aparati tj. kutije kvadratne osnove (ređe pravougaone i kružne), sa dimenzijama koje se kreću u rasponu od 60 x 60 mm pa do 1500 mm x 1500 mm. Opiti triaksijalne kompresije su nešto ređi i po pravilu se izvode na uzorcima dimenzija, prečnika $d = 38-100$ mm i visine $h = 76-200$ mm, koristeći standardne ćelije. Znatno ređe se koriste i specijalno izrađene ćelije znatno većih dimenzija.

Uobičajeni opiti in situ (SPT, CPT) nisu sasvim pouzdani, jer se odnose na rezultate koji se dobijaju na manjem delu heterogene mase otpada. Međutim, opiti direktnog smicanja, koji se izvode na terenu na znatno većim i neporemećenim uzorcima, daju realnije rezultate. Osnovni razlog za to je što se uzorak formira tako da se ne remeti njegova unutrašnja struktura, već samo bočne strane uzorka (kopanjem u samom otpadu). Na taj način se formira uzorak koji po dimenzijama odgovara aparatu za izvođenje opita (po pravilu se radi o velikim aparatima dimenzija od 1.0 x 1.0 m i većim).

Literaturni podaci pokazuju da je najveći broj ispitivanja vršen u laboratorijskim uslovima, na uzorcima manjih dimenzija, što podrazumeva i manji deo otpadnog materijala. Zato predlog Cowland i dr. (1993) da se osmatranje vrši na veštački formiranim kosinama i sa probnim opterećenjima, treba da da pouzdanije rezultate, s

obzirom da se posmatra veća količina heterogene sredine. Pored toga, klizanje izazvano na formiranoj kosini deponije je interesantno, jer klizna površina odgovara procesu smicanja duž veće površine, pa se dolazi do prosečne vrednosti napona smicanja. Međutim, i kod ovakvog načina ispitivanja javljaju se neke neodređenosti na koje ukazuju Gilbert i dr. (1998), kao što su tačan oblik tj. geometrija kosine, mehanizam loma i porni pritisci. To znači da se čvrstoća smicanja i, u ovim realnijim uslovima, ne može dovoljno precizno da odredi bez usvajanja određenih pretpostavki. Upoređujući ispitivanja in situ i u laboratoriji, Singh i Murphy (1990) i Howland i Landva (1992) su zapazili da su parametri čvrstoće smicanja određeni laboratorijski, veći od onih utvrđenih merenjima na terenu i dobijenih povratnim analizama.

Za opit direktnog smicanja se može reći da je u širokoj upotrebi i vrlo je "popularan" prilikom određivanja čvrstoće smicanja komunalnog otpada, bez obzira na određene nedostatke kao što su: neujednačena raspodela napona duž ravni loma i unapred definisana horizontalna klizna površina. Na Slici 6.56 prikazano je korišćenje različitih opita za određivanje čvrstoće smicanja komunalnog otpada na osnovu broja referenci koje su hronološki prikazane u literaturi, odnosno u Tabelama 6.2, 6.3 i 6.6.

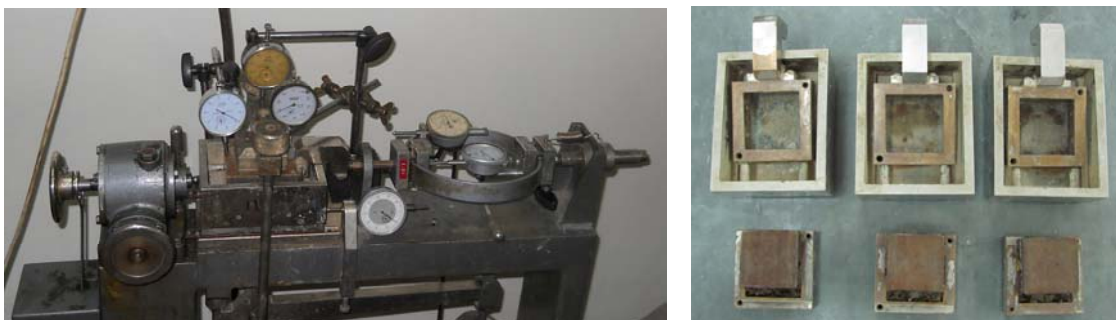


Slika 6.56. Analizirane reference metoda određivanja čvrstoće smicanja komunalnog otpada

Na osnovu analize raspoloživih podataka odlučio sam se da, za izradu doktorske disertacije, čvrstoću smicanja komunalnog otpada definišem na osnovu opita direktnog smicanja. Osnovni razlozi sa to su sledeći:

- opit direktnog smicanja je najčešći opit za određivanje čvrstoće smicanja komunalnog otpada u svetu
- mogućnosti koje nudi raspoloživa laboratorijska oprema u Srbiji, uglavnom su vezane za opit direktnog smicanja
- korišćeni materijal za izvođenje opita, može se više puta iskoristiti za formiranje uzorka koji mogu biti različitih dimenzija
- ovaj opit omogućava da se isti uzorak više puta izlaže smičućim silama, uz povećanje normalnog napona
- s obzirom da je površina smicanja unapred definisana (obavezno je horizontalna), aparat omogućuje i ugradnju uzoraka sa različitom orijentacijom frakcija u odnosu na površinu smicanja. Na ovaj način se pruža mogućnost analize čvrstoće smicanja komunalnog otpada u anizotropnim uslovima

Većina ispitivanja je obavljena u laboratoriji za mehaniku tla Rudarsko-geološkog fakulteta u Beogradu tokom 2010 i 2011 god. Pri tome je korišćen aparat za direktno smicanje manjih dimenzija, 60 x 60 mm u koji se ugrađuje uzorak visine $h = 25$ mm (Slika 6.57).



Slika 6.57. Aparat za direktno smicanje sa dimenzijama kutije 60 x 60 mm – RGF Beograd

Deo ispitivanja je obavljen u geomehaničkoj laboratoriji Instituta za ispitivanje materijala – IMS Beograd, korišćenjem većeg aparata sa dimenzijama 100 x 100 mm i uzorkom visine $h = 23$ mm (Slika 6.58). U vezi sa tim naglasio bih da geomehaničke laboratorije u Srbiji nemaju aparate većih dimenzija.



Slika 6.58. Aparat za direktno smicanje sa dimenzijama kutije 100 x 100 mm – IMS Beograd

6.4.2. Program laboratorijskih ispitivanja

Prilikom definisanja programa laboratorijskih ispitivanja, pošao sam od toga da se za različite vrednosti zapreminske težine i sa prirodnim vlažnostima uzoraka otpada, definiše čvrstoća smicanja saglasno utvrđenim principima mehanike tla. To je podrazumevalo prethodnu pripremu materijala otpada, u smislu usitnjavanja da bi se dobila zadovoljavajuća granulacija, a kasnije i veštačko formiranje uzoraka prema prethodno definisanom programu ispitivanja.

6.4.2.1 Kvalitet uzorka

Jedno od brojnih pitanja prilikom ispitivanja čvrstoće smicanja komunalnog otpada, vezano je i za kvalitet uzoraka, tj. za način pripreme poremećenih - veštački pripremljenih, i neporemećenih - prirodnih uzoraka otpada, i u vezi sa tim tumačenje rezultata opita.

Slično kao i kod nevezanih granularnih materijala, tako je i kod komunalnog otpada, problematično dobijanje neporemećenih uzoraka za laboratorijska ispitivanja. U nedostatku standardizovane opreme za vađenje neporemećenih uzoraka komunalnog otpada, istraživači su koristili različite metode, uglavnom bez većih uspeha (npr. specijalni bušaći pribor tipa Becker, dvodelni uzorkivač i sl.). Poteškoće su se odnosile na začepljenje cilindra velikim i čvrstim komponentama otpada koje se teško buše. Zatim, dolazilo je do premeštanja i remećenja strukture usled formiranja tzv. "mostova" od elastičnih fragmenata otpada, a dešavale su se i česte zaglave pribora za bušenje. Pokušaji da se dobiju neporemećeni uzorci otpada, korišćenjem cilindra sa tankim zidovima, takođe nisu dali zadovoljavajuće rezultate jer je dolazilo do njihovog

lomljenja pa i drobljenja tokom utiskivanja. Heterogenost otpada i problemi vezani za dobijanje neporemećenih uzoraka, uslovljavaju da se prethodno obezbedi znatno veća količina neobrađenog otpadnog materijala od one koja će se upotrebiti za opite. Pored toga, i različite tehnike vađenja uzoraka otpada sa određene dubine, u velikoj meri utiču na sastav otpada, što dovodi do izrazite varijabilnosti mehaničkih osobina komunalnog otpada. Zato se kao najefikasniji način vađenja otpada sa većih dubina, pokazalo bušenje korišćenjem spiralnih burgija (svrdla), različitih prečnika od 100 pa do 400 mm. Bez obzira na to što se na ovaj način remeti struktura otpada u deponiji, one omogućuje dobijanje veće količine materijala sa različitih dubina, a time i različitih faza degradacije.

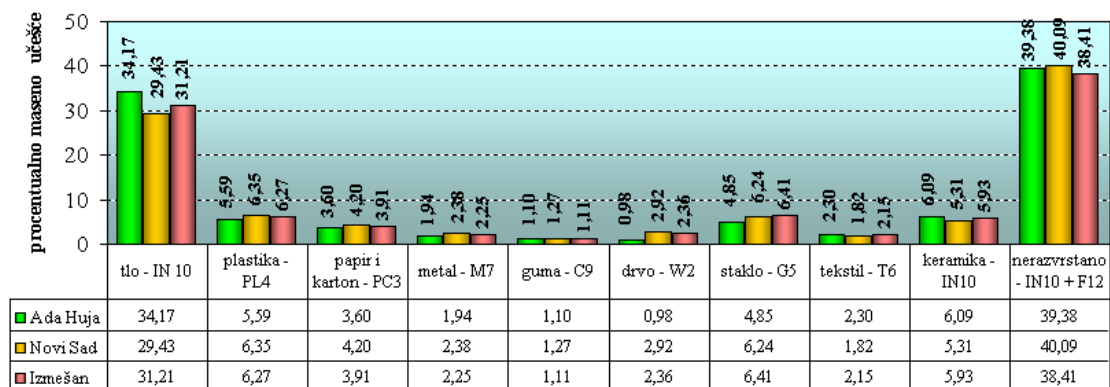
Upravo zbog ovih teškoća, vezanih za dobijanje neporemećenih uzoraka, istraživači su laboratorijska ispitivanja uglavnom obavljali na veštački pripremljenim uzorcima (npr. usitnjeni, sortirani po sastavu i sl.), što je podrazumevalo mešanje različitih materijala koji se nalaze na komunalnim deponijama. Ovakav način pripreme uglavnom su koristili mnogi autori, što se iz ranijeg teksta moglo i videti (Grisolia i dr. 1995; Landva i dr. 2000; Pelkey i dr. 2001; Zeccos, 2005; Dixon i Langer, 2008 i dr.). Međutim, zbog izrazite heterogenosti komunalnog otpada, osnovni nedostatak koji se javlja prilikom laboratorijskih ispitivanja, vezan je za korišćenje relativno malih uzoraka. To je dovelo do konstruisanja velikih laboratorijskih uređaja, kako bi ispitivanja bila što reprezentativnija. Ovi aparati još uvek nisu konvencionalni, jer su razvijeni kao posebni uređaji u specijalnim laboratorijama.

Pored toga, ispitivanja su vršena i na prirodnim uzorcima otpada, i to direktno na terenu, na velikim uzorcima (1.0 x 1.0 m i većim) korišćenjem specijalne, ali skupe laboratorijske opreme. Nekoliko autora (Cowland i dr. 1993; Houston i dr. 1995) je određivalo parametre čvrstoće smicanja na ovaj način, ali se ipak može reći da on nije stekao naročitu popularnost. Njegova glavna prednost je u tome što se opiti izvode u aparatima velikih dimenzija u kojima se ugrađuju i formiraju znatno veći uzorci (blokovi) komunalnog otpada, koji uključuju i frakcije prirodnih dimenzija, bez prethodnih priprema. Treba istaći da su ovakvi opiti ograničeni na veoma plitke dubine (prosečno od 1.0 – 2.0 m), tako da ne daju realnu sliku vezanu za stepen degradacije, pa samim tim ni za sastav otpada. Problemi koji su bili vezani za poremećaj strukture

otpada, ostali su i dalje aktuelni, jer se i u takvim aparatima otpad mora da zbija. Literaturni podaci ukazuju na to da je u pojedinim slučajevima i za ispitivanje čvrstoće smicanja na terenu u velikim aparatima, takođe korišćen prerađen i prethodno pripremljen komunalni otpad, pa se može reći da su opiti izvedeni na poremećenim - veštački pripremljenim uzorcima.

6.4.2.2 Priprema uzorka

Sva laboratorijska ispitivanja su izvršena na otpadu koji je ranije detaljno opisan u Poglavlju 4. Ispitivanja su obavljena na veštački pripremljenim uzorcima iz pomenutih deponija. Na slici 6.59, uporedno je prikazan materijalni sastav otpada, koji je iskorišćen za formiranje svih uzoraka.



Slika 6.59. Materijalni sastav komunalnog otpada koji je korišćen za ispitivanje

Prvo je napravljen program koji je podrazumevao ispitivanje na uzorcima sa različitim zapreminskim težinama. U vezi sa tim, izvršeno je odmeravanje prirodnog materijala uzetog sa deponije, vodeći računa o dimenzijama korišćenih kutijastih aparata. Pri tome je sa obe deponije (Ada Huja, Novi Sad) upotrebljena približno ista masa materijala koja je bila oko dva puta veća od mase koja je upotrebljena za formiranje svih uzoraka.

Na ovaj način, a na osnovu pripremljenog plana laboratorijskih ispitivanja čvrstoće smicanja, veštački su pripremljene četiri serije (A, B, C i D) od po tri uzorka, tj. ukupno je pripremljeno 12 uzoraka (36 probnih tela), sa različitim zapreminskim težinama i sa prirodnim vlažnostima.

Sama priprema uzorka podrazumevala je prethodnu homogenizaciju, mešanje i usitnjavanje pojedinih komponenti otpada. Prvo je izvršeno mešanje i četvrtanje kompletnog materijala. Na ovaj način, svaki uzorak sadrži određeni procenat frakcija iz svih izdvojenih kategorija, čime je ostvarena potpuna heterogenost. Pri tome treba naglasiti da se radi o masenim procentima izdvojenih komponenti. Nakon toga je izvršeno usitnjavanje materijala u pogodnim plastičnim sudovima, uz zadržavanje odgovarajućeg sastava otpada. Ovo je bilo neophodno kako bi se obezbedio odgovarajući odnos granulometrijskog sastava otpada i dimenzije aparata u kojem su vršena ispitivanja. Preporuka, koju je trebalo ispoštovati a koja se pominje i kao jedan od zahteva u Evropskim normama (EN 1997-2, ASTM 2007-a, 2007-b) vezanim za laboratorijska ispitivanja, jeste odnos najmanje dimenzije ispitivanog uzorka (u konkretnom slučaju visine uzorka - h), prema najvećoj dimenziji nehomogenosti tj. veličini najkrupnije frakcije u uzorku – d. Taj odnos treba da je $h/d \geq 5$. To znači da, sa jedne strane, frakcije treba da budu dovoljno sitne kako bi zadovoljile traženi odnos veličine frakcija i karakteristične dimenzije aparata, a sa druge strane treba da budu dovoljno krupne, kako bi bila zadovoljena prirodna heterogenost otpada. U vezi sa tim, izabrane su maksimalne veličine frakcija pojedinih komponenti koje su dobijene usitnjavanjem. Tako je za ispitivanja koja su obavljena u Institutu za ispitivanje materijala maksimalna veličina frakcija iznosila 20 mm, dok je zbog manjih dimenzija kutije aparata, koji je korišćen u laboratoriji za mehaniku tla Rudarsko-geološkog fakulteta, maksimalna veličina frakcija iznosila 12 mm. Samo manji težinski deo (ne više od 5 %), uglavnom plastičnih frakcija, bio je i nešto većih dimenzija i to u intervalu od 20 – 40 mm (Rakić i dr, 2012a) .

Ovako pripremljeni materijal iz obe deponije, odložen je u veće plastične kese a one su odložene u pogodne plastične sudove sa poklopcem, i ostavljeno je da odleže nedelju dana. Nakon toga, u zavisnosti od prethodno definisanih zapreminskih težina, izvršeno je odmeravanje ovog materijala za svako probno telo i odlaganje u manje plastične kese (ukupno 18 kesa), koje su čuvane u plastičnim sudovima (kantama). Materijal iz pojedinačnih kesa je kasnije iskorišćen za formiranje uzoraka (po tri za svaki opit), sa približno istim zapreminskim težinama. To je urađeno tako što je kompletan materijal iz manjih i obeleženih plastičnih kesa, direktno ugrađivan u kutije aparata za direktno

smicanje (utiskivanjima i zbijanjem sa malim maljem kružnog poprečnog preseka). Uzorci nisu dodatno provlažavani, već je manja količina materijala iskorišćena da se odredi vlažnost pre opita, a celokupni materijal nakon završetka opita je iskorišćen za određivanje vlažnosti nakon opita. Ovakav način pripreme, ne podrazumeva da su težinski procenti pojedinih komponenti za svako probno telo identični, ali se može reći da su razlike relativno male, i da nemaju značajniji uticaj na rezultate opita.

Ovaj postupak pripreme, primenjen je i za otpad uzet sa deponije u Novom Sadu i sa zatvorene deponije na Ada Huji. Pripremljeni materijal, poslužio je za formiranje uzoraka dve posebne serije: serije A – materijal sa deponije Ada Huja i serije B – materijal sa deponije u Novom Sadu (po tri uzorka za svaku tj. po devet probnih tela). Serija A podrazumevala je formiranje uzoraka: U-1, U-2 i U-3, a upotrebljen je materijal iz dve istražne bušotine koje su izvedene na toj lokaciji. Za pripremu uzoraka serije B, korišćen je otpad uzet sa deponije u Novom Sadu, a iskorišćeni su delovi jezgra iz pet istražnih bušotina, kao i materijal koji je dobijen iskopom istražne jama J-2. Materijal sa ove deponije je iskorišćen za formiranje uzoraka: U-4, U-5 i U-6 (lokacije istražnih radova sa obe deponije, prikazane su u Poglavlju br. 4).

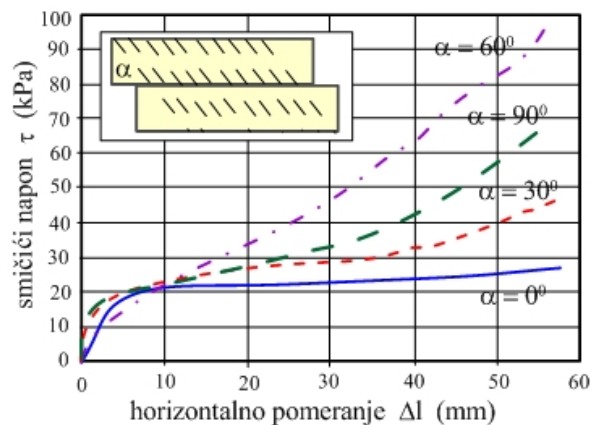
Preostali pripremljeni materijal sa deponije u Novom Sadu i sa deponije Ada Huja je izmešan i iskorišćen za pripremu uzoraka serija C i D. Ponovljen je isti postupak sa odmeravanjem određenih količina materijala koje su bile neophodne za formiranje još 18 probnih tela. Na ovaj način su formirani uzorci serije C: U-7, U-8 i U-9. Ovi uzorci su ispitani u geomehaničkoj laboratoriji Instituta za ispitivanje materijala – IMS. Uzorci iz serija A, B i D, ispitani su u laboratoriji za mehaniku tla Rudarsko-geološkog fakulteta.

Priprema uzoraka iz serija A, B i C, obavljena je zbijanjem materijala u horizontalnim slojevima, što je slično i načinu deponovanja otpada na deponijama. Ovakav način deponovanja a kasnije i sleganje celokupne mase otpada pa i pojedinačnih komponenti, uslovljavaju da otpad ima prilično ujednačene osobine u dva horizontalna pravca.

Međutim, ovako formirana struktura otpada u deponiji podrazumeva da je čvrstoća otpada u horizontalnom i vertikalnom pravcu, različita. Zato otpad pored izraženih izotropnih, pokazuje i anizotropne karakteristike koje su naročito izražene u

vertikalnom pravcu. To dovodi do zaključka da komunalni otpad može da ima različite vrednosti parametara čvrstoće smicanja ukoliko bi se armirajuće frakcije ugradile sa različito orijentisanim uglovima u odnosu na ravan smicanja (uobičajena orijentacija je horizontalna tj. $\alpha = 0^\circ$). Naime, neki literaturni podaci (Athanasopoulos i dr. 2008) su pokazali da se opitima direktnog smicanja dobijaju maksimalne vrednosti parametara čvrstoće smicanja, kada se armirajuće frakcije uzorka ugrađuju pod uglom od oko $\alpha = 60^\circ$ u odnosu na horizontalu tj. na ravan smicanja u aparatu za direktno smicanje (Slika 6.60).

U cilju provere ovog uticaja, izvršena je priprema uzoraka serije D, koja je obuhvatala uzorke: U-10, U-11 i U-12. Međutim, formiranje uzoraka sa različitom orijentacijom (nagibom) armirajućih frakcija, zahteva znatno veće dimenzije aparata. Kako takvih aparata kod nas još uvek nema, za razliku od prethodnih serija, uzorci iz serije D formirani su na drugačiji način, tj. armirajuće frakcije orijentisane su pod uglom od $\alpha = 90^\circ$ u odnosu na horizontalnu ravan smicanja u aparatu. Vertikalna orijentacija armirajućih frakcija, potvrđena je nakon završetka opita.



Slika 6.60. Naponsko-deformacijska zavisnost komunalnog otpada u zavisnosti od orijentacije armirajućih frakcija (Athanasopoulos i dr. 2008)

Samo formiranje uzoraka je obavljeno u posebno napravljenoj kutiji, na sličan način kao što su pripremani uzorci iz serije A, B i C. Međutim, ova priprema je podrazumevala da se kutija prethodno vertikalno uspravi. Nakon toga je izmerena količina pripremljenog materijala, koji je u slojevima zbijan direktno u kutiji. Nakon formiranja uzorka, kutija je vraćena u horizontalni položaj, a ispod nje je postavljen deo kutije aparata u kojoj će se izvesti opit. Zatim je izvršeno utiskivanje uzoraka, uz pomoć filter ploče. Na ovaj

način su frakcije otpada u uzorku orijentisane upravno na ravan smicanja, u aparatu za direktno smicanje, odnosno površina smicanja je trebalo da bude približno pod uglom $\alpha = 90^0$, u odnosu na prethodno pripremljene i orijentisane uzorke.

6.4.2.3. Postupak ispitivanja

Nakon ovako formiranih uzoraka i njihove ugradnje u kutijaste aparate, obavljena je konsolidacija u trajanju od 24 h. S obzirom da komunalni otpad ispoljava velike deformacije tokom smicanja, bez jasno izraženog loma, posebno se vodilo računa o veličini i rasponu normalnih napona za konsolidaciju uzoraka. Uzimajući u obzir da postojeće deponije u Srbiji retko prelaze visinu od 10 m, za konsolidaciju svih uzoraka su odabrani su normalni naponi od $\sigma' = 25, 50$ i 100 kPa. Ovakav način konsolidacije sa nižim vrednostima normalnih napona, omogućuje da se parametri smičuće čvrstoće otpada definišu preko linearne, ali i nelinearne anvelope loma.

Smicanje svih uzoraka, koje je obavljeno u aparatu za direktno smicanje Rudarsko-geološkog fakulteta, trajalo je oko 2 h, sa brzinom smicanja od oko 0.125 mm/min. Smicanje uzoraka iz grupe C (izvedeno u aparatu za direktno smicanje Instituta IMS na uzorcima dimenzija 100×100 mm), trajalo je oko 1 h, tako da je obavljeno brzinom smicanja od 0.25 mm/min. Normalni naponi su bili konstantni tokom čitavog opita, a očitavani su smičuća sila i horizontalna pomeranja. S ozirom da je tokom izvođenja prvog opita uočena rotacija gornje kutije aparata, za sva ostala ispitivanja ona je onemogućena, konstruisanjem čvrste veze između jarma i kontaktne površine preko koje se prenosi normalni napon. Vertikalne deformacije uzorka, kako za vreme konsolidacije tako i za vreme smicanja, merene su pomoću komparatera postavljenih na ovaj jaram. Pored toga, postavljena su još dva komparatera na prednji i zadnji deo kutije za smicanje (Slike 6.57 i 6.58). Deformacije koje su očitavane na ovim komparaterima, poslužile su za opisivanje efekata rotacije gornje kutije aparata.

Za razliku od prirodnog tla, smičuća čvrstoća otpada se realizuje pri znatno većim pomeranjima, kada se aktiviraju „armirajuće“ frakcije otpada. Očitavanje smičuće sile je vršeno do momenta do kojeg su aparati omogućavali čitanje horizontalnih pomeranja

(oko 15 mm u oba aparata , tj. oko 25 % od početne dužine uzorka u manjem aparatu - RGF, odnosno oko 15 % početne dužine uzorka u većem aparatu - IMS).

6.5. PRIKAZ REZULTATA ISPITIVANJA

Rezultati ispitivanja čvrstoće smicanja, u zavisnosti od korišćenih aparata za direktno smicanje, za sve četiri serije uzoraka, prikazani su u nastavku teksta.

6.5.1. Prikaz rezultata ispitivanja uzoraka iz serije A

Rezultati ispitivanja za uzorke iz serije A, na kojima su izvršeni opiti direktnog smicanja, prikazani su u Tabeli 6.7.

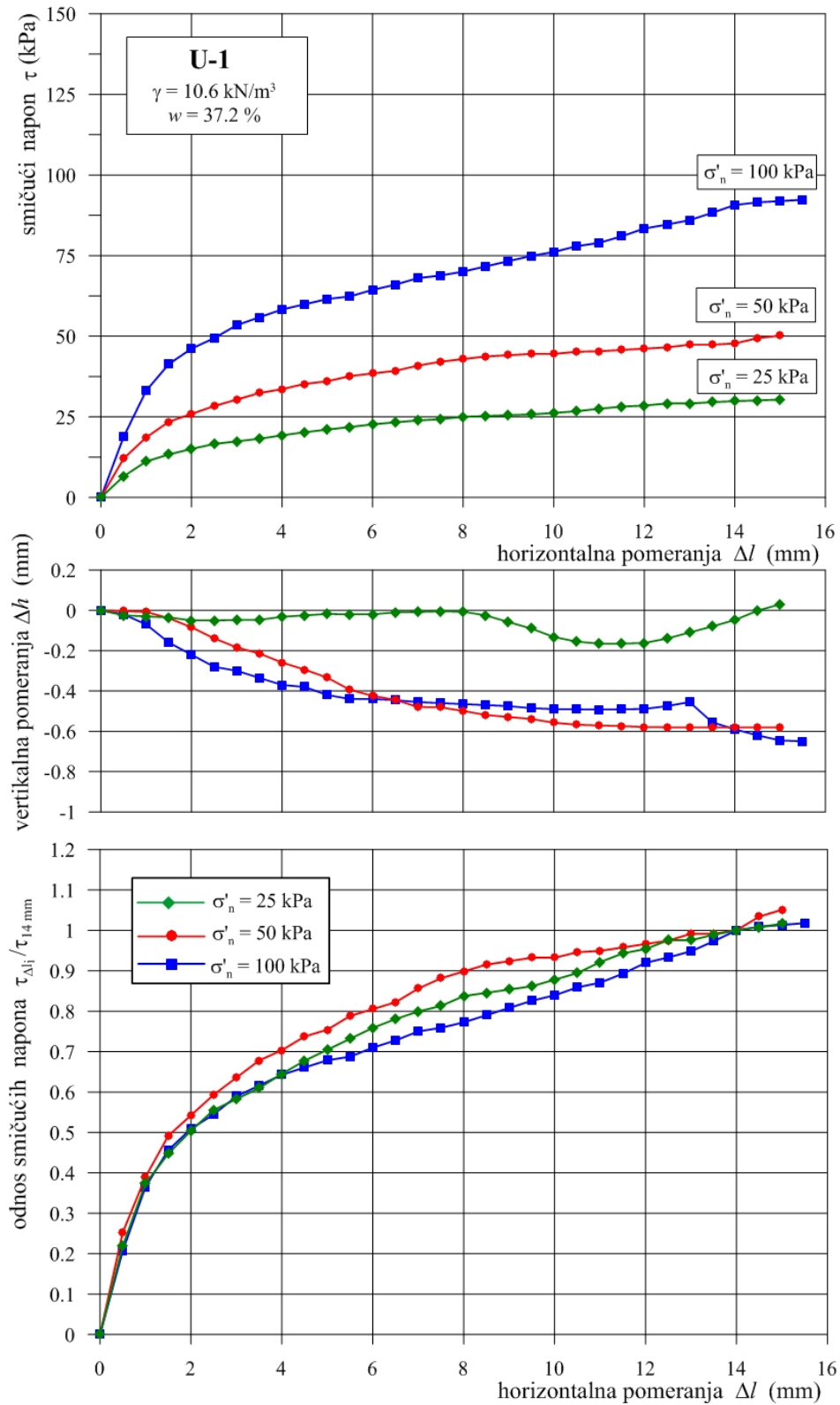
Tabela 6.7. Rezultati ispitivanja uzoraka iz serije A – otpad sa deponije Ada Huja

Serija A*	identifikaciono-klasifikacioni pokazatelji								normalni i tangencijalni naponi			
	d < 12 mm	d (12- 20 mm)	w pre opita	w posle opita	S _r	e	G _s	γ	γ _d	σ' _n	τ _{max}	τ _{14mm}
	(%)					-	-	(kN/m ³)		(kN/m ²)		
U-1	96.5	3.5	37.8	34.4	45	1.834	2.20	10.7	7.8	25	30.4	29.9
	97.2	2.8	36.2	33.4	42	1.872		10.4	7.7	50	50.2	48.8
	96.1	3.9	37.7	34.9	45	1.833		10.7	7.8	100	92.3	90.7
U-2	95.9	4.1	35.0	35.0	78	0.987	2.20	15.0	11.1	25	32.9	32.5
	97.7	2.3	38.6	38.3	82	1.033		15.0	10.8	50	53.8	53.5
	97.2	2.8	35.7	35.4	78	1.001		14.9	11.0	100	95.3	94.8
U-3	95.5	4.5	27.6	25.1	100	0.603	2.20	17.5	13.0	25	51.0	32.4
	95.2	4.8	26.2	23.0	100	0.576		17.6	13.0	50	87.8	76.1
	97.3	2.7	27.9	26.1	100	0.607		17.5	13.2	100	124.6	122.6

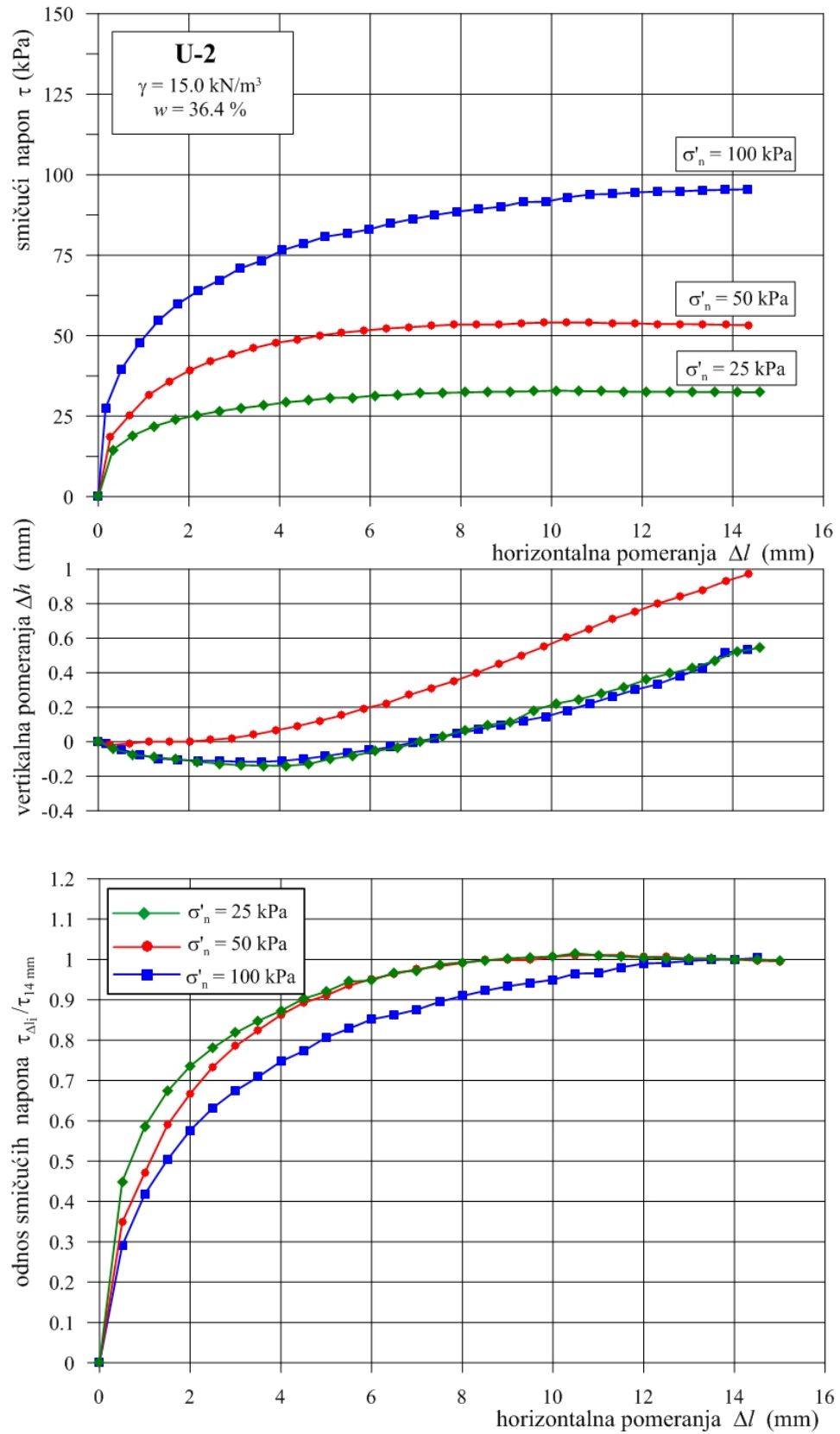
* Opiti izvedeni na uzorcima dimenzija 6 x 6 cm.

Ovde treba istaći da mnogi istraživači ne prikazuju osnovne informacije vezane za način formiranja uzoraka i način izvođenja opita. Po pravilu, podaci koji se prikazuju odnose se na način obrade materijala, koji uglavnom podrazumeva usitnjavanje. U vezi sa tim, prikazuje se procentualno učešće frakcija koje su sitnije od unapred definisane vrednosti. Obično se vodi računa o maksimalnoj veličini fragmenata, u zavisnosti od dimenzija korišćenog aparata. Pored toga, prikazuju se i podaci vezani za zapreminsku težinu i vlažnost. Informacije vezane za stepen degradacije po pravilu su retke, sem u pojedinim slučajevima kada se prikazuje starost otpada.

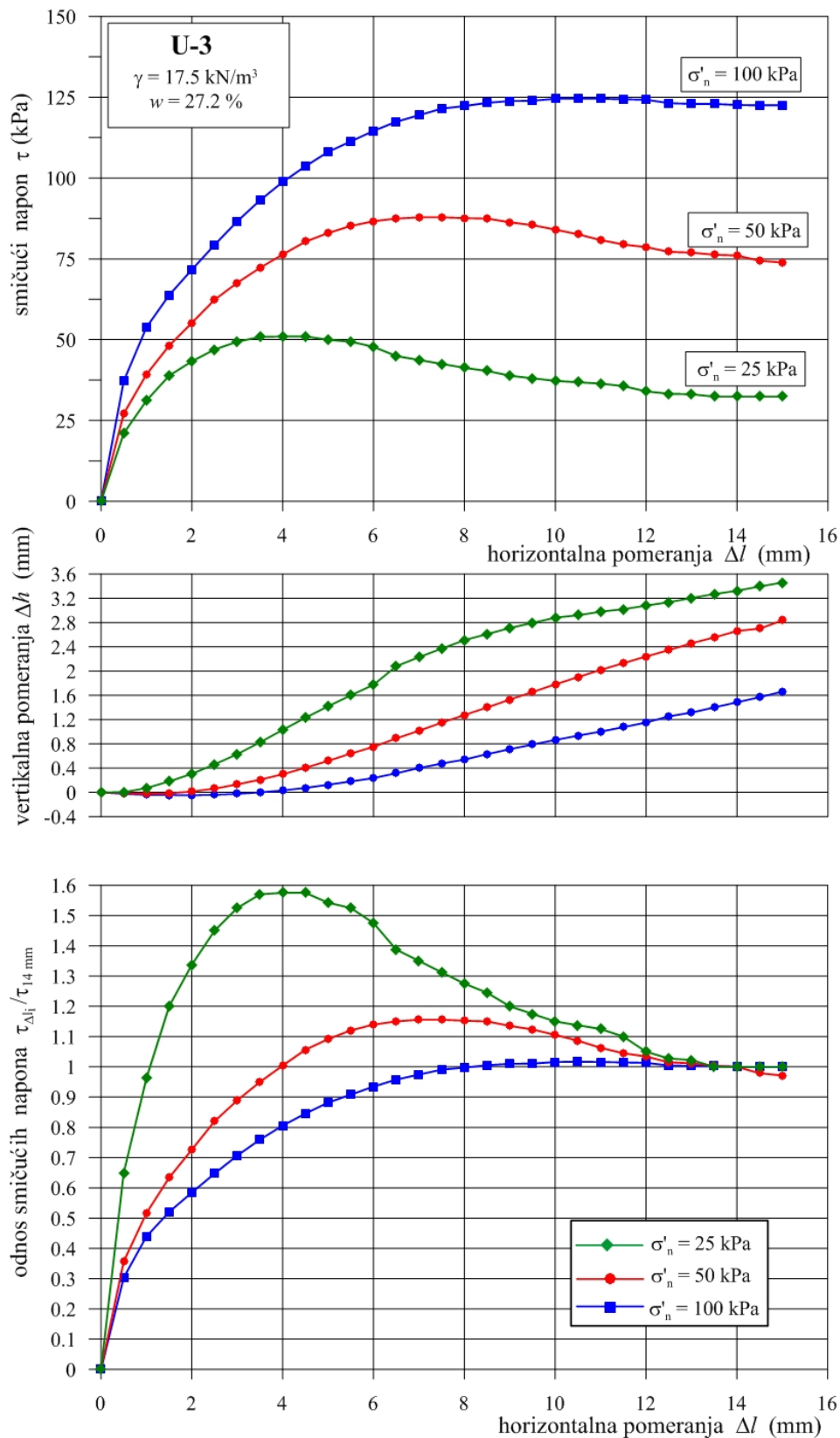
Rezultati izvršenih ispitivanja, na uzorcima iz serije A, prikazani su na slikama 6.61 do 6.63.



Slika 6.61. Zavisnost napona i pomeranja tokom smicanja uzorka U-1 iz serije A



Slika 6.62. Zavisnost napona i pomeranja tokom smicanja uzorka U-2 iz serije A



Slika 6.63. Zavisnost napona i pomeranja tokom smicanja uzorka U-3 iz serije A

Zavisnost između smičućeg napona i pomeranja, tokom izvođenja opita direktnog smicanja uzoraka iz serije A, u zavisnos od zbijenosti, tj. zapreminskih težina, pokazuju različito ponašanje otpada. Tako za slabije zbijeni uzorak U-1, sa prosečnom zapreminskom težinom $\gamma = 10.5 \text{ kN/m}^3$, zavisnost napon-pomeranje je najpribližnija ponašanju tla sa deformacijskim očvršćavanjem, pa se može reći da deformacije nisu bile dovoljno velike da bi se mobilisala sva smičuća čvrstoća otpada. Kod ovog uzorka su izmerena i relativno mala vertikalna pomeranja koja ukazuju na zanemarljivo smanjenje zapremine. Zavisnost napon – pomeranje znatno zbijenijeg uzorka U-2 ($\gamma = 15.0 \text{ kN/m}^3$), slična je ponašanju materijala kod kojeg je izražen plastičan lom, s obzirom da za određenu vrednost horizontalnih pomeranja, napon dostiže maksimalnu vrednost koja sa daljim povećanjem pomeranja ostaje približno konstantna. Najzbijeniji uzorak U-3, sa prosečnom zapreminskom težinom $\gamma = 17.5 \text{ kN/m}^3$, ukazuje na deformacijsko omekšavanje. Zato se jedino kod ovog uzorka iz serije A, može reći da je dostignut vršni napon. Pored uobičajenih dijagrama smicanja, prikazani su i dijagrami normalizovanih napona smicanja izraženi odnosom mobilisanog napona smicanja pri svakom pomeranju $\tau_{\Delta l_i}$ i napona smicanja za horizontalno pomeranje od $\Delta l = 14 \text{ mm}$ - $\tau_{14 \text{ mm}}$ tj. za usvojeno pomeranje za kriterijum loma.



Slika 6.64 Karakteristično izdizanje gornjeg rama aparata sa izgledom uzorka nakon smicanja

Kod uzoraka U-2 i U-3, vertikalne deformacije ukazuju na izvesno povećanje zapremine. Međutim, ovde treba istaći da su vertikalne deformacije uzoraka iz serije A, merene sa jednim komparaterom koji je postavljen na centralnom delu gornjeg rama aparata. Nakon završetka opita i vađenja uzorka, ustanovljeno je da je ravan smicanja ostala horizontalna i da nije došlo do izdizanja uzorka, već samo prednjeg dela gornjeg rama aparata (Slika 6.64). Najveće izdizanja kutije dešavalo se pri najnižim vrednostima normalnih napona ($\sigma'_n = 25$ kPa). Objašnjenje za ovu pojavu, može se naći u aktiviranju armirajućih frakcija otpada.

6.5.2. Prikaz rezultata ispitivanja uzoraka iz serije B

Osnovne fizičke karakteristike uzoraka serije B, koji su korišćeni za izvođenje opita direktnog smicanja, prikazane su u Tabeli 6.8, a rezultati izvršenih ispitivanja, na uzorcima iz ove serije, prikazani su na Slikama 6.65 do 6.67.

Tabela 6.8. Rezultati ispitivanja uzoraka iz serije B – otpad sa deponije Novi Sad

Serija B*	identifikaciono-klasifikacioni pokazatelji							normalni i tangencijalni naponi				
	d < 12 mm	d (12-20 mm)	w pre opita	w posle opita	S _r	e	G _s	γ	γ _d	σ' _n	τ _{max}	τ _{14 mm}
	(%)				-	-	(kN/m ³)		(kN/m ²)			
U-4	95.8	4.2	42.0	33.2	53	1.582	2.0	11.0	7.7	25	40.3	28.4
	96.3	3.7	40.2	31.4	53	1.522		11.1	7.9	50	62.5	55.6
	95.1	4.9	37.3	31.8	51	1.453		11.2	8.2	100	98.4	96.8
U-5	97.4	2.6	34.7	31.8	56	1.245	2.0	12.0	8.9	25	42.1	29.9
	96.3	3.7	33.6	32.6	59	1.148		12.4	9.3	50	66.6	64.8
	96.3	3.7	36.7	35.2	57	1.286		12.0	8.7	100	105.5	101.2
U-6	97.4	2.6	35.9	30.0	69	1.043	2.0	13.3	9.8	25	57.1	37.4
	96.1	3.9	38.1	29.8	72	1.061		13.4	9.7	50	93.5	73.9
	95.8	4.2	36.7	27.3	72	1.013		13.6	9.9	100	147.4	121.5

* Opiti izvedeni na uzorcima dimenzija 6 x 6 cm.

Vrednosti zapreminskih težina uzoraka serije B, kretale su se u rasponu $\gamma = 11.0$ – 13.5 kN/m³, što znači da razlike u zbijenosti uzoraka nisu bila izražene kao kod uzoraka iz serije A. U vezi sa tim i naponsko-deformacijske zavisnosti uzoraka iz ove serije, pokazale su mnogo sličniji trend ponašanja komunalnog otpada. Tokovi smicanja iz ove serije, ni u jednom slučaju, nisu pokazali da se radi o ponašanju komunalnog opita sa izraženim deformacijskim očvršćavanjem. Za delimično slabije zbijenije uzorke U-4 i U-5, sa prosečnom zapreminskim težinama $\gamma = 11.0$ i 12.0 kN/m³, naponsko-

deformacijske krive uglavnom su odgovarale materijalima sa izraženim plastičnim lomom. Nešto zbijeniji uzorak U-6, čija je prosečna zapreminska težina $\gamma = 13.5 \text{ kN/m}^3$, slično kao i kod serije A, ukazuje da se radi o ponašanju materijala sa deformacijskim omekšavanjem. Ono što je interesantno za ovu seriju, to je ponašanje uzoraka koji su konsolidovani normalnim naponom $\sigma'_n = 25 \text{ kPa}$, s obzirom da je kod svih ispitanih uzoraka naponsko-deformacijska zavisnost ukazivala na ponašanje materijala sa deformacijskim omekšavanjem. Ovaj način ponašanja, izraženiji je ako se posmatraju dijagrami normalizovanih napona smicanja, izraženi odnosom mobilisanog napona smicanja pri svakom pomeranju $\tau_{\Delta l_i}$ i mobilisanog napona smicanja za horizontalno pomeranje od $\Delta l = 14 \text{ mm}$ - $\tau_{14 \text{ mm}}$.

Što se tiče vertikalnih deformacija, može se reći da je kod svih uzoraka iz ove serije došlo do izvesnog povećanja zapremine, s obzirom da je kod svih opita izmereno izdizanje gornjeg rama aparata (po pravilu, najveće izdizanje se dešavalo kod uzoraka konsolidovanih sa najnižim vrednostima normalnog napona, kao i kod uzoraka iz serije A).

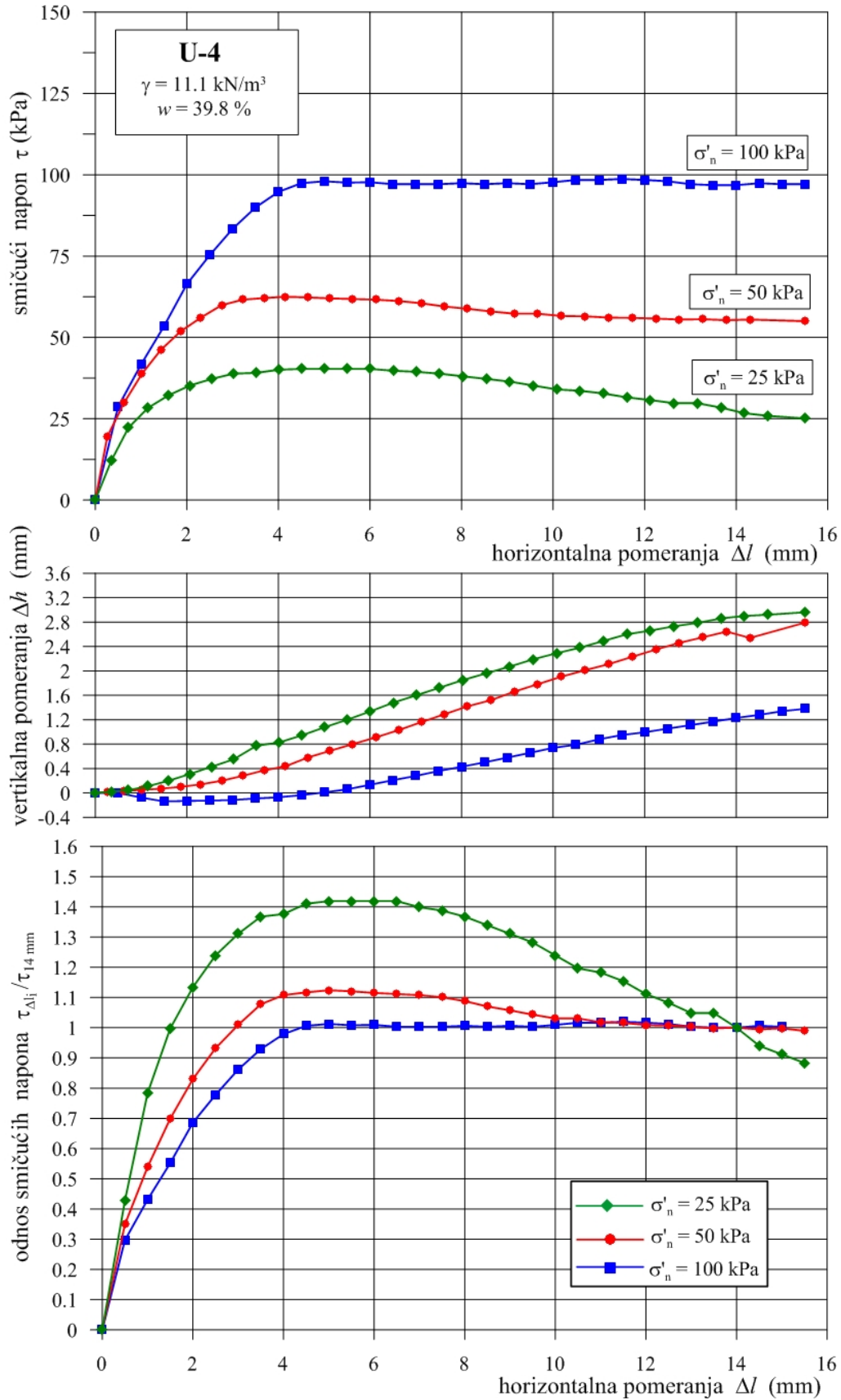
6.5.3. Prikaz rezultata ispitivanja uzoraka iz serije C

Osnovne fizičke karakteristike uzoraka serije C, koji su korišćeni za izvođenje opita direktnog smicanja, prikazane su u Tabeli 6.9, a rezultati izvršenih ispitivanja, na uzorcima iz ove serije, prikazani su na Slikama 6.68 do 6.70.

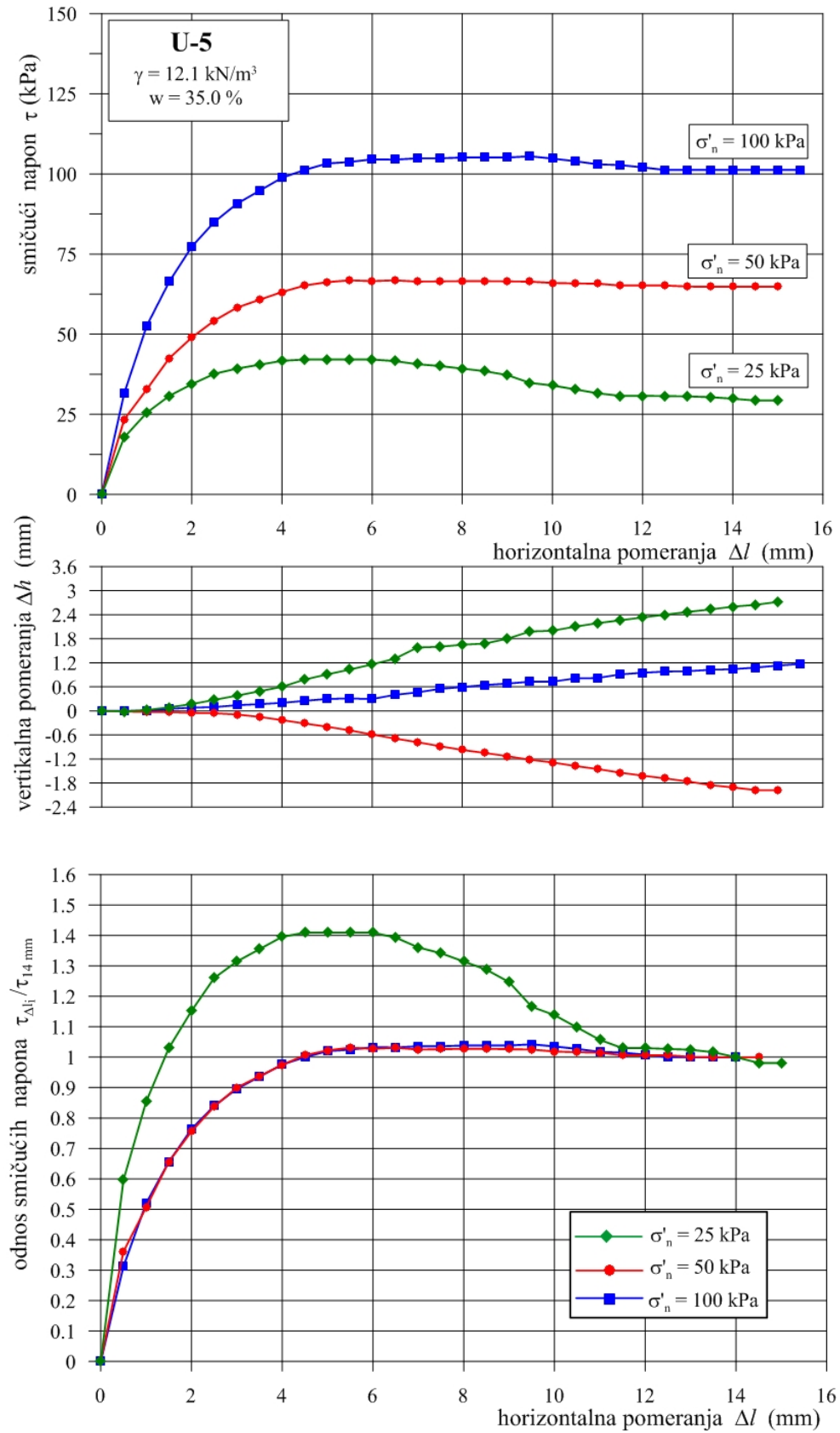
Tabela 6.9. Rezultati ispitivanja uzoraka iz serije C – izmešan otpad sa obe deponije

Serija C*	identifikaciono-klasifikacioni pokazatelji								normalni i tangencijalni naponi			
	d < 20 mm	d (20-40 mm)	w pre opita	w posle opita	S _r	e	G _s	γ	γ_d	σ'_n	τ_{\max}	$\tau_{14 \text{ mm}}$
	(%)						-	-	(kN/m ³)	(kN/m ²)		
U-7	96.2	3.8	33.6	31.2	40	1.737	2.05	10.0	7.5	25	27.6	26.9
	96.8	3.2	30.4	29.8	39	1.591		10.3	7.9	50	45.0	44.8
	95.4	4.6	28.6	26.0	35	1.679		9.8	7.7	100	74.7	71.8
U-8	97.3	2.7	34.4	32.6	55	1.271	2.05	12.1	9.0	25	32.8	32.7
	95.7	4.3	33.5	31.3	56	1.224		12.3	9.2	50	49.5	49.3
	95.2	4.8	34.0	32.2	53	1.307		11.9	8.9	100	75.7	74.8
U-9	96.9	3.1	33.0	31.4	74	0.918	2.05	14.2	10.7	25	29.8	29.8
	97.4	2.6	32.6	31.1	72	0.930		14.1	10.6	50	53.4	53.4
	95.2	4.8	33.2	32.3	77	0.880		14.5	10.9	100	80.8	79.8

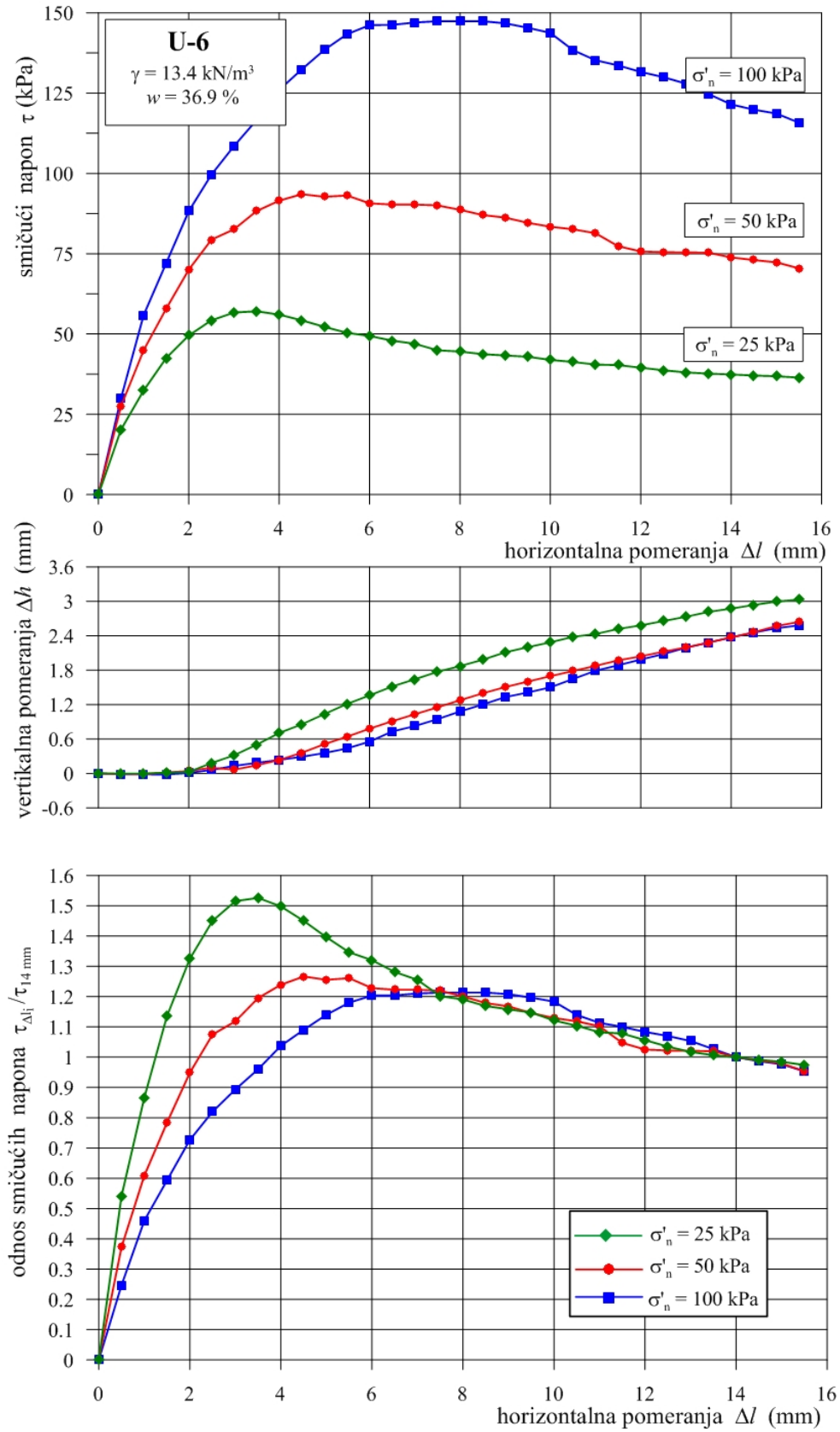
* Opiti izvedeni na uzorcima dimenzija 10 x 10 cm.



Slika 6.65. Zavisnost napona i pomeranja tokom smicanja uzorka U-4 iz serije B



Slika 6.66. Zavisnost napona i pomeranja tokom smicanja uzorka U-5 iz serije B



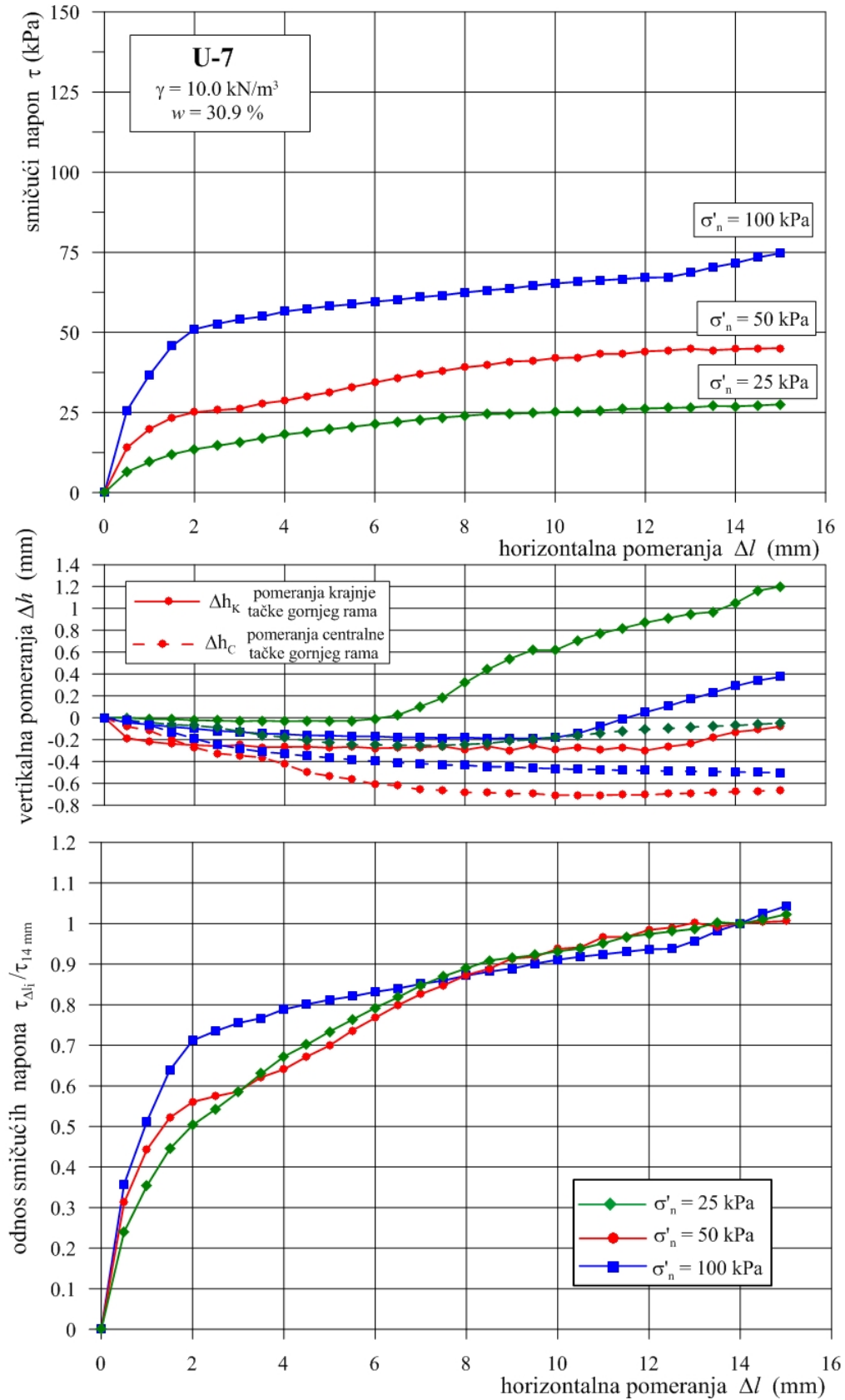
Slika 6.67. Zavisnost napona i pomeranja tokom smicanja uzorka U-6 iz serije B

Prosečne zapreminske težine uzoraka iz serije C, kretale su se u rasponu od $\gamma=10-14.3$ kN/m^3 , pa se može reći da su ispitivani uzorci srednje do jače zbijeni. Međutim, bez obzira na različitu zbijenost, dijagrami naponsko-deformacijskog ponašanja svih uzorak iz ove serije, pokazuju izvesnu sličnost. Moglo bi se reći da je naponsko-deformacijska zavisnost najpribližnija ponašanju tla sa deformacijskim očvršćavanjem, tj. da pomeranja nisu bila dovoljno velika da bi se mobilisala vršna smičuća čvrstoća otpada. Većina autora, ponašanje otpada, opisuje upravo na ovaj način. To se može videti i na osnovu dijagrama normalizovanih napona smicanja, izraženih odnosom mobilisanog napona smicanja pri svakom pomeranju $\tau_{\Delta l_i}$ i napona smicanja za horizontalno pomeranje od $\Delta l = 14 \text{ mm} - \tau_{14 \text{ mm}}$.

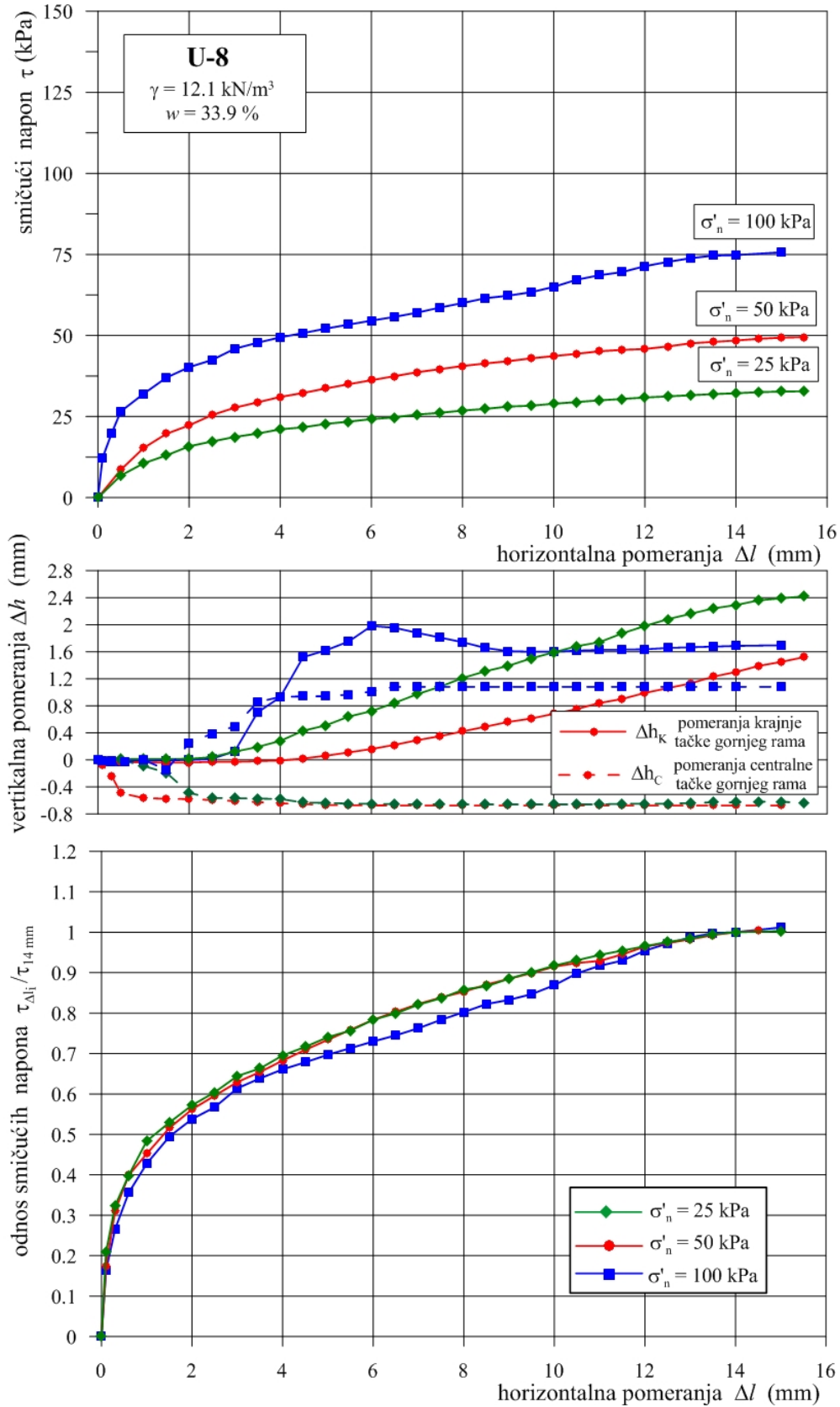
Što se tiče vertikalnih deformacija, prvo treba reći da su one merene pomoću dva komparatera (na prednjem i zadnjem delu gornjeg rama aparata – krajnje tačke i na središnjem delu rama – centralna tačka). I u ovom slučaju je konstatovano izdizanje tačke na prednjem delu gornjeg rama, što ukazuje na povećanje zapremine, dok je centralna tačka uglavnom ukazivala na blago zbijanje uzoraka, tj. na smanjenje zapremine. Kao i kod prethodnih serija A i B, najveće izdizanje pokazali su uzorci koji su konsolidovani sa najnižim vrednostima normalnih napona.

Opšti zaključak za ove tri serije uzoraka je bi da su opiti direktnog smicanja, izvedeni u aparatu za direktno smicanje sa većim dimenzijama uzoraka, pokazali izvesne razlike u odnosu na ispitivanja obavljena na manjim uzorcima, gde je ponašanje otpada bilo dosta različito. Dok se kod uzoraka iz serija A i B, ove razlike mogu objasniti različitom zbijenošću otpada, kod serije C je, bez obzira na zbijenost, ponašanje bilo slično za sva tri ispitana uzorka.

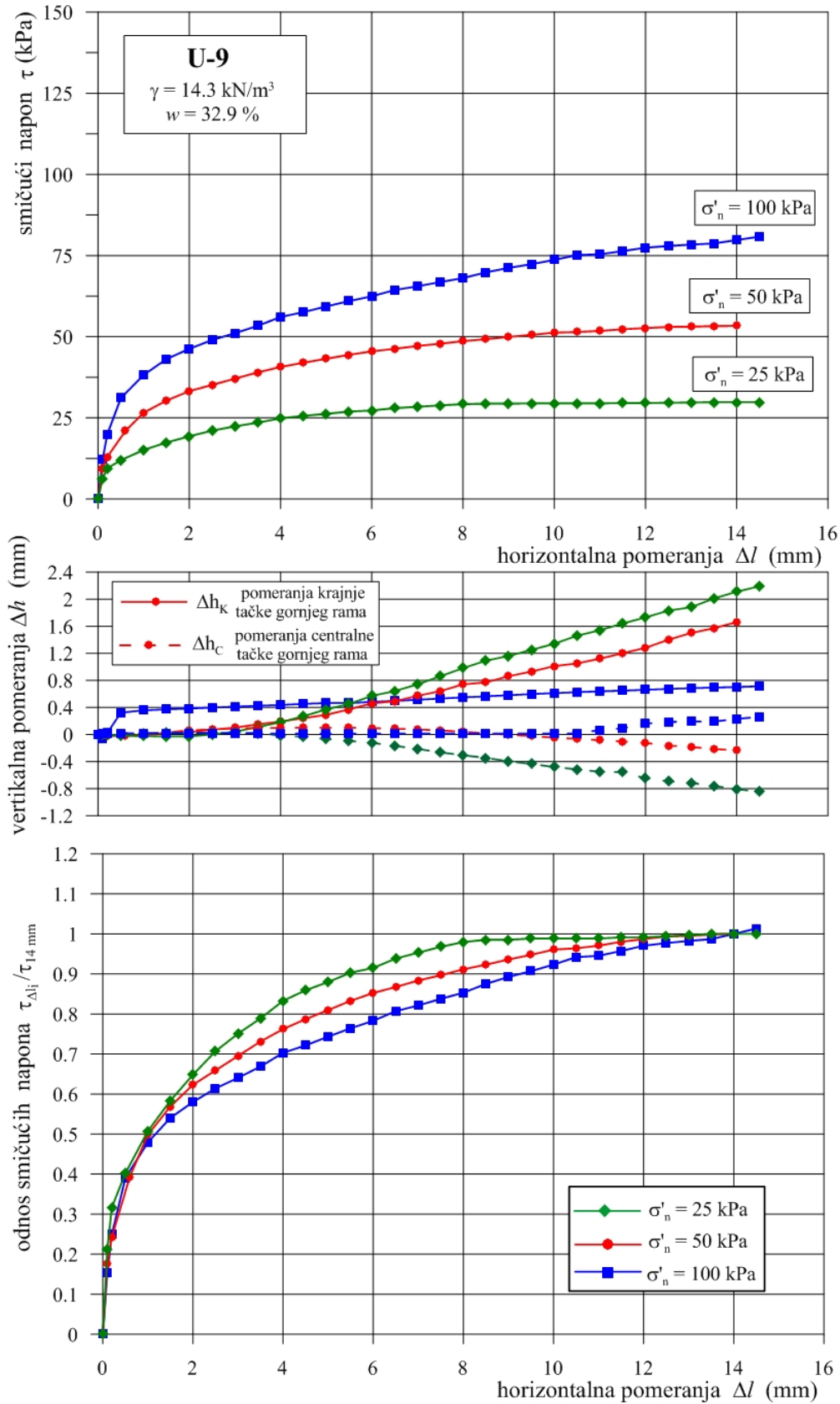
Kod sve tri serije uzoraka, smicanje je vršeno paralelno sa orijentacijom armirajućih-ljuspastih frakcija, s tim što je kod uzoraka iz serija A i B, više od 95 % frakcija bilo sitnije od 12 mm, dok je kod serije C, više od 95 % frakcija bilo sitnije od 20 mm. Očigledno da sitnije frakcije, utiču na bolju zglobljenost i zbijanje uzoraka, pa otuda doprinose i povećanju smičućih napona. Tako je za uzorke iz serija A i B (ispitani u manjem aparatu) koji su konsolidovani sa najvećim normalnim naponom od $\sigma'_n = 100$ kPa, smičući napon pri srednjim i većim deformacijama, uglavnom, iznosio preko 100 kPa.



Slika 6.68. Zavisnost napona i pomeranja tokom smicanja uzorka U-7 iz serije C



Slika 6.69. Zavisnost napona i pomeranja tokom smicanja uzorka U-8 iz serije C



Slika 6.70. Zavisnost napona i pomeranja tokom smicanja uzorka U-9 iz serije C

Kod uzoraka ispitanih u većem aparatu (serija C), smičući naponi pri istim normalnim naponima ($\sigma'_n = 100$ kPa), a pri najvećim deformacijama nisu prelazili vrednost 75 kPa. Jedno od mogućih objašnjenja jeste da određeni uticaj na čvrstoću smicanja otpada, ima veličina armirajućih frakcija. Naime, uzorci formirani sa dominantnim sadržajem frakcija maksimalne veličine do 20 mm, trebalo bi da obezbeđuju dodatno armiranje otpadu. Međutim, rezultati pokazuju obrnuto. Naime, da uzorci formirani od nešto većih frakcija, ne utiču na povećanje mobilisane čvrstoće smicanja. Objašnjenje za ovu pojavu treba tražiti u činjenici da prilikom formiranja uzorka većih dimenzija, veće frakcije lakše iskazuju tendenciju ka horizontalnoj orijentaciji, a s obzirom da se smicanje obavlja duž horizontalne ravni, onda je i čvrstoća smicanja ovako formiranih uzoraka nešto manja.

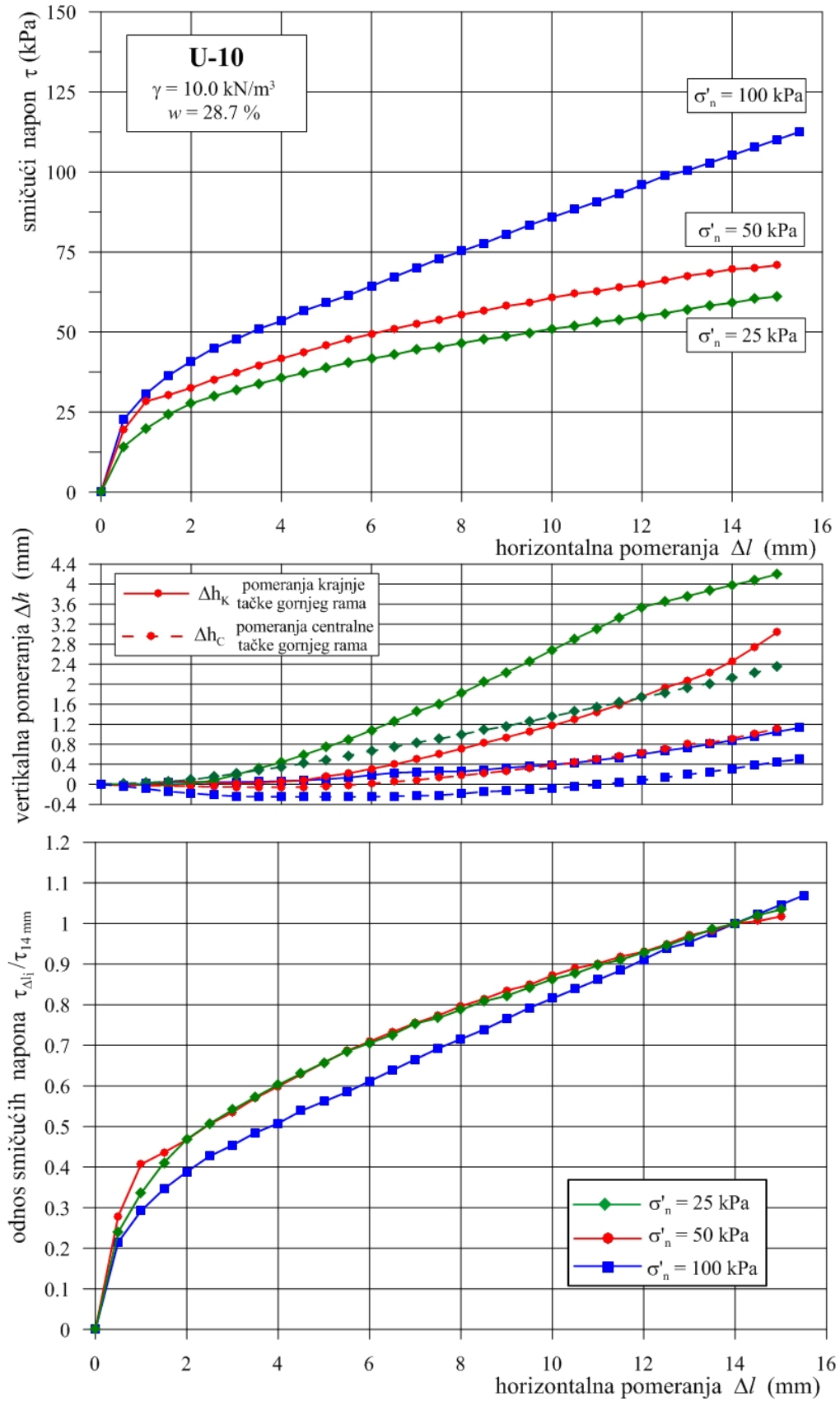
6.5.4. Prikaz rezultati ispitivanja uzoraka iz serije D

Osnovne karakteristike uzoraka iz serije D, na kojima su izvršeni opiti direktnog smicanja, prikazane su u Tabeli 6.10. U okviru ove serije ispitani su uzorci U-10, U-11 i U-12. Oni su pripremljeni na način koji je već ranije opisan (sa orijentacijom ljustastih frakcija upravnom na ravan smicanja). Prosečne zapreminske težine uzoraka iz serije D, kretale su se u intervalu od $\gamma = 10 - 14.0$ kN/m³, što je skoro identično sa prosečnim zapreminskim težinama uzoraka iz serije C. Rezultati izvršenih ispitivanja, na uzorcima iz ove serije, prikazani su na Slikama 6.71 do 6.73.

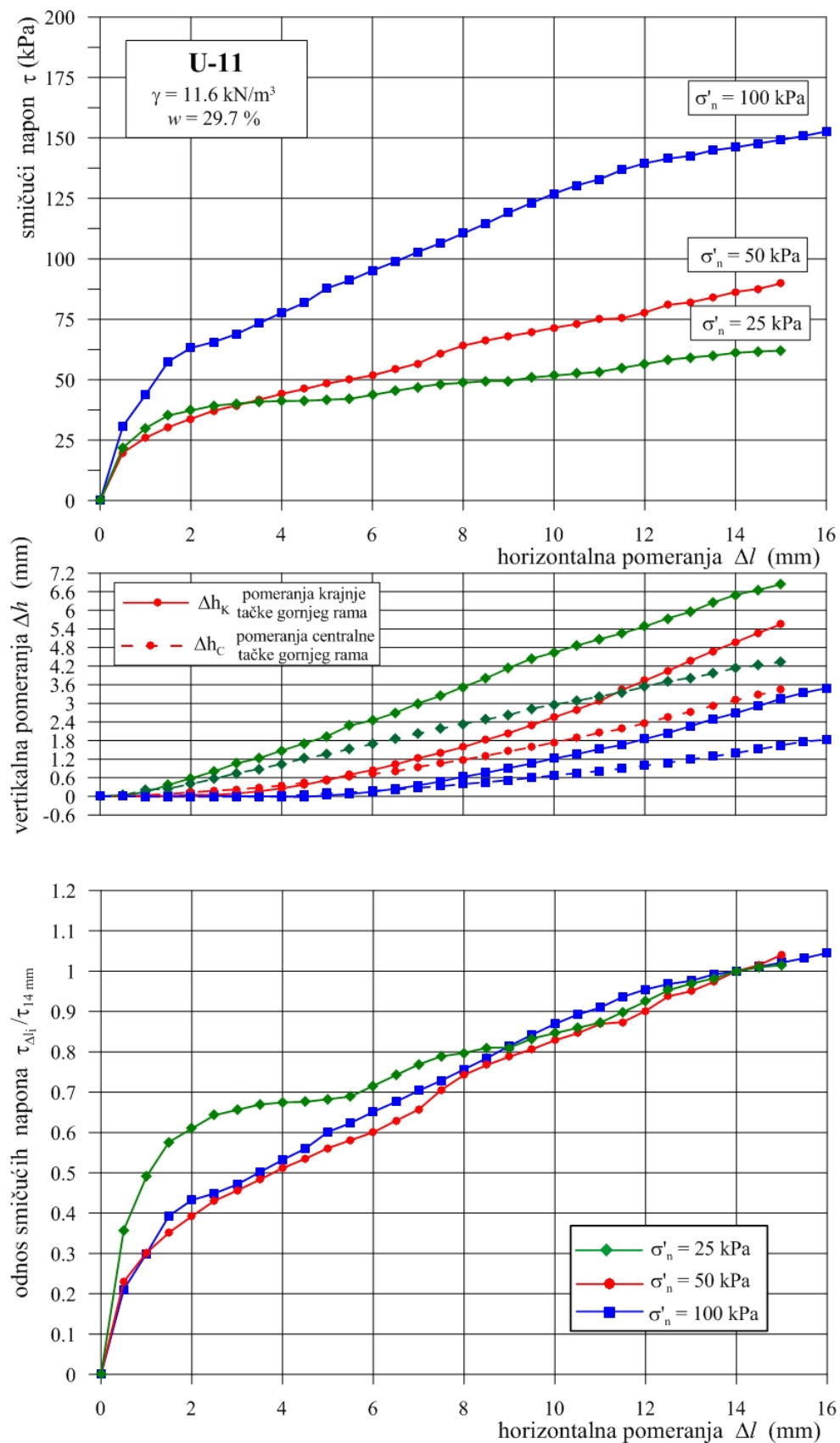
Tabela 6.10. Rezultati ispitivanja uzoraka iz serije D – izmešan otpad sa obe deponije

Serija D**	identifikaciono-klasifikacioni pokazatelji							normalni i tangencijalni naponi				
	d < 12 mm	d (12-20 mm)	w pre opita	w posle opita	S _r	e	G _s	γ	γ _d	σ' _n	τ _{max}	τ _{14mm}
	(%)						-	-	(kN/m ³)	(kN/m ²)		
U-10	96.0	4.0	23.3	21.4	31	1.549	2.05	9.9	8.0	25	61.1	59.1
	96.4	3.6	27.0	26.9	34	1.647		9.8	7.7	50	70.9	69.6
	96.5	3.5	35.9	27.1	44	1.689		10.4	7.6	100	112.5	105.3
U-11	95.7	4.3	33.5	31.2	59	1.158	2.05	11.6	9.5	25	62.0	61.1
	95.6	4.4	28.4	24.4	50	1.158		11.7	9.5	50	89.8	86.3
	97.3	2.7	27.7	23.9	46	1.228		11.4	9.2	100	152.7	146.1
U-12	96.1	3.9	31.8	30.0	63	1.041	2.05	14.2	10.0	25	98	97.2
	97.4	2.6	32.1	30.2	58	1.143		13.5	9.6	50	129.3	115.0
	96.7	3.3	31.6	29.4	64	1.012		14.3	10.2	100	199.9	188.5

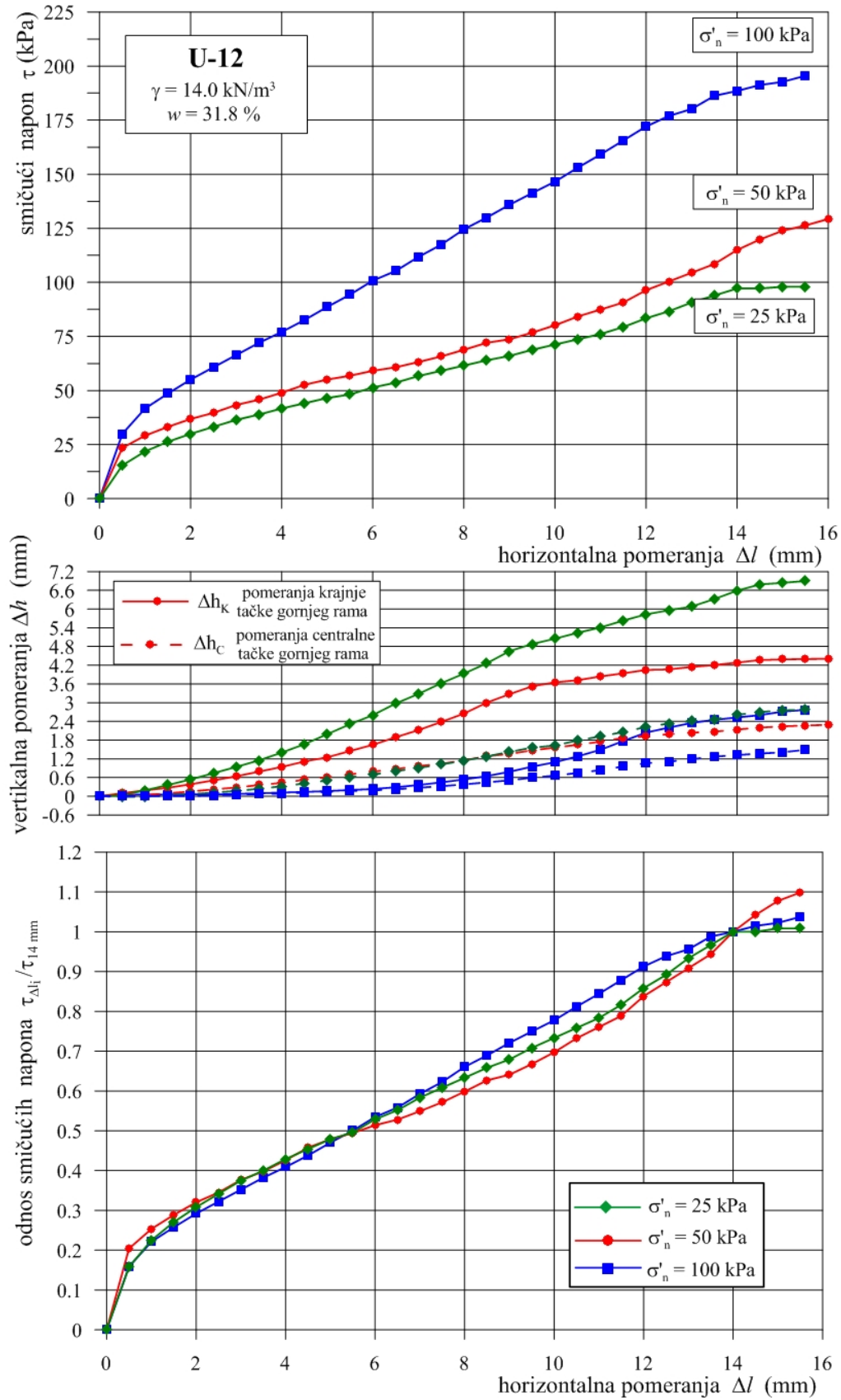
** Opiti izvedeni na uzorcima dimenzija 6 x 6 cm - opiti izvedeni na uzorcima sa ljustastim frakcijama orijentisanim upravno na ravan smicanja



Slika 6.71. Zavisnost napona i pomeranja tokom smicanja uzorka U-10 iz serije D



Slika 6.72. Zavisnost napona i pomeranja tokom smicanja uzorka U-11 iz serije D



Slika 6.73. Zavisnost napona i pomeranja tokom smicanja uzorka U-12 iz serije D

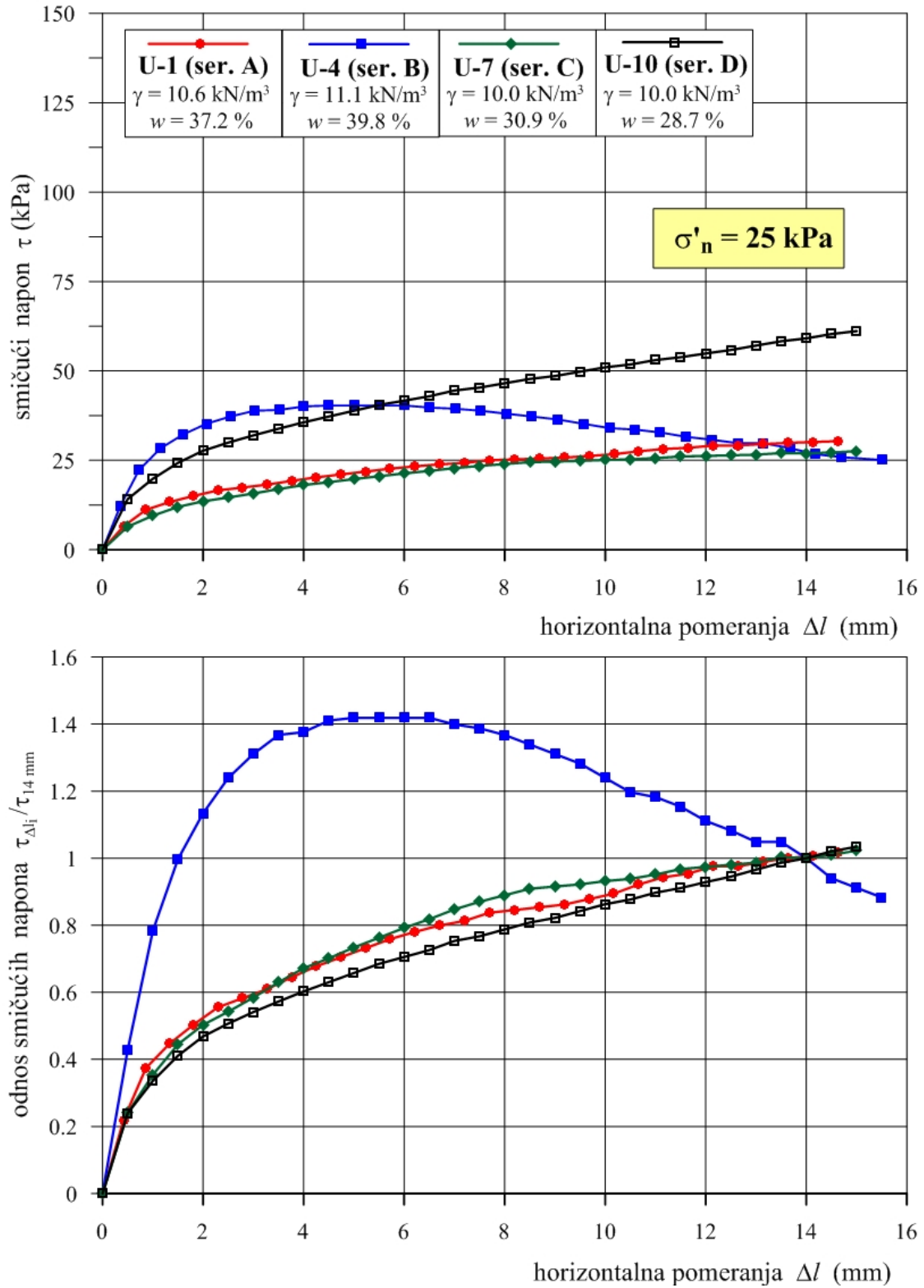
Različita zbijenost uzoraka nije znatno uticala na naponsko-deformacijsko ponašanje otpada, s obzirom da su za sve uzorke dijagrami pokazali potpunu sličnost i najpribližniji su ponašanju tla sa deformacijskim očvršćavanjem. Ono što je zajedničko za sve uzorke iz ove serije, odnosi se na vrednosti horizontalnih pomeranja, koje nisu bile dovoljne za mobilizaciju maksimalne smičuće čvrstoće otpada.

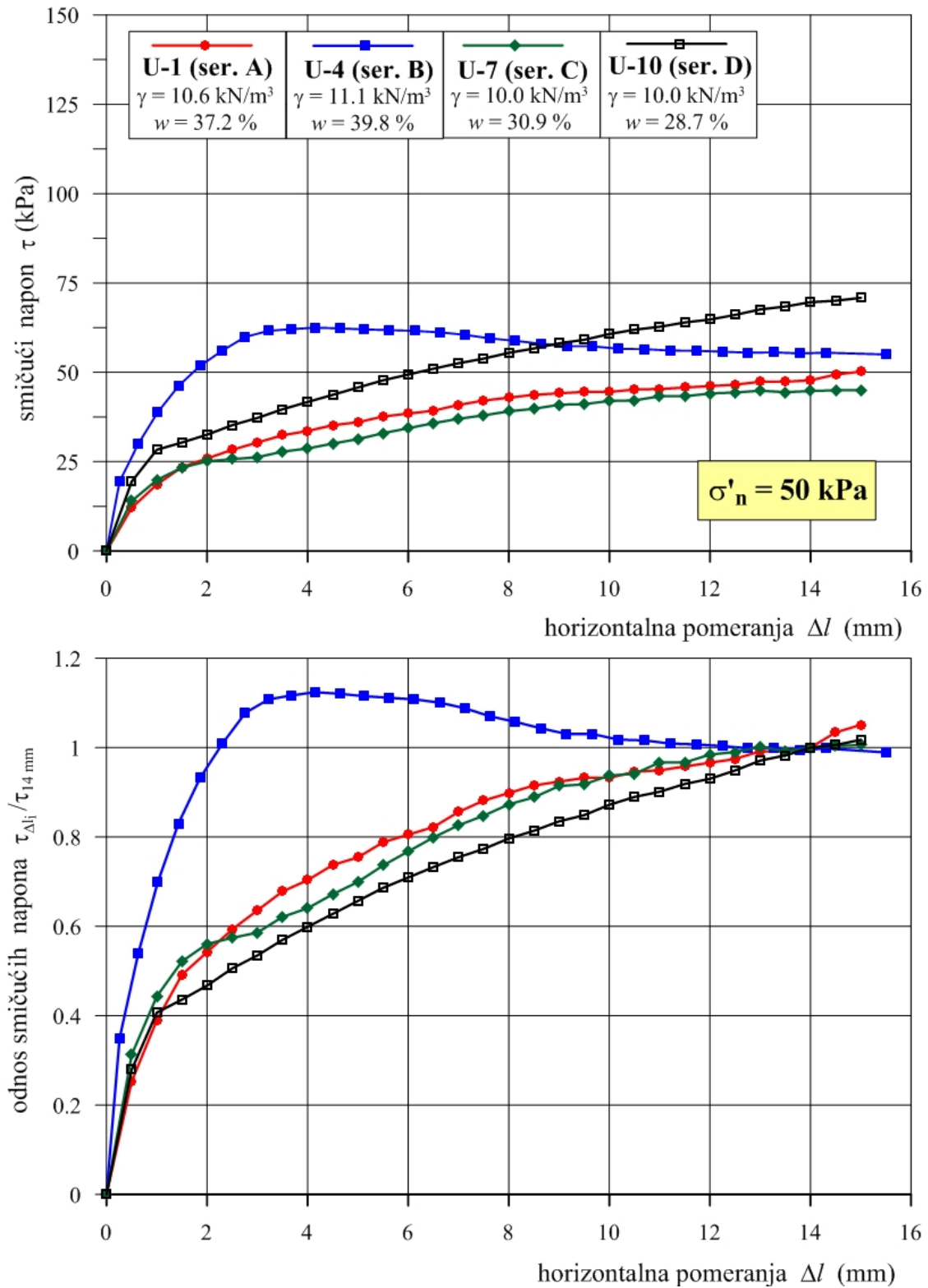
Iz rezultata prikazanih na dijagramima, može se zapaziti da se sa porastom horizontalnih deformacija, vlaknaste frakcije postepeno istežu i na taj način mobilišu. Ovakav načina ponašanja se jasno može videti na dijagramima normalizovanih napona smicanja izraženih odnosom mobilisanog napona smicanja pri svakom pomeranju $\tau_{\Delta l_i}$ i mobilisanog napona smicanja za horizontalno pomeranje $\Delta l = 14 \text{ mm} - \tau_{14 \text{ mm}}$. Kod ove serije opita, vertikalne deformacije su merene pomoću tri komparatera.

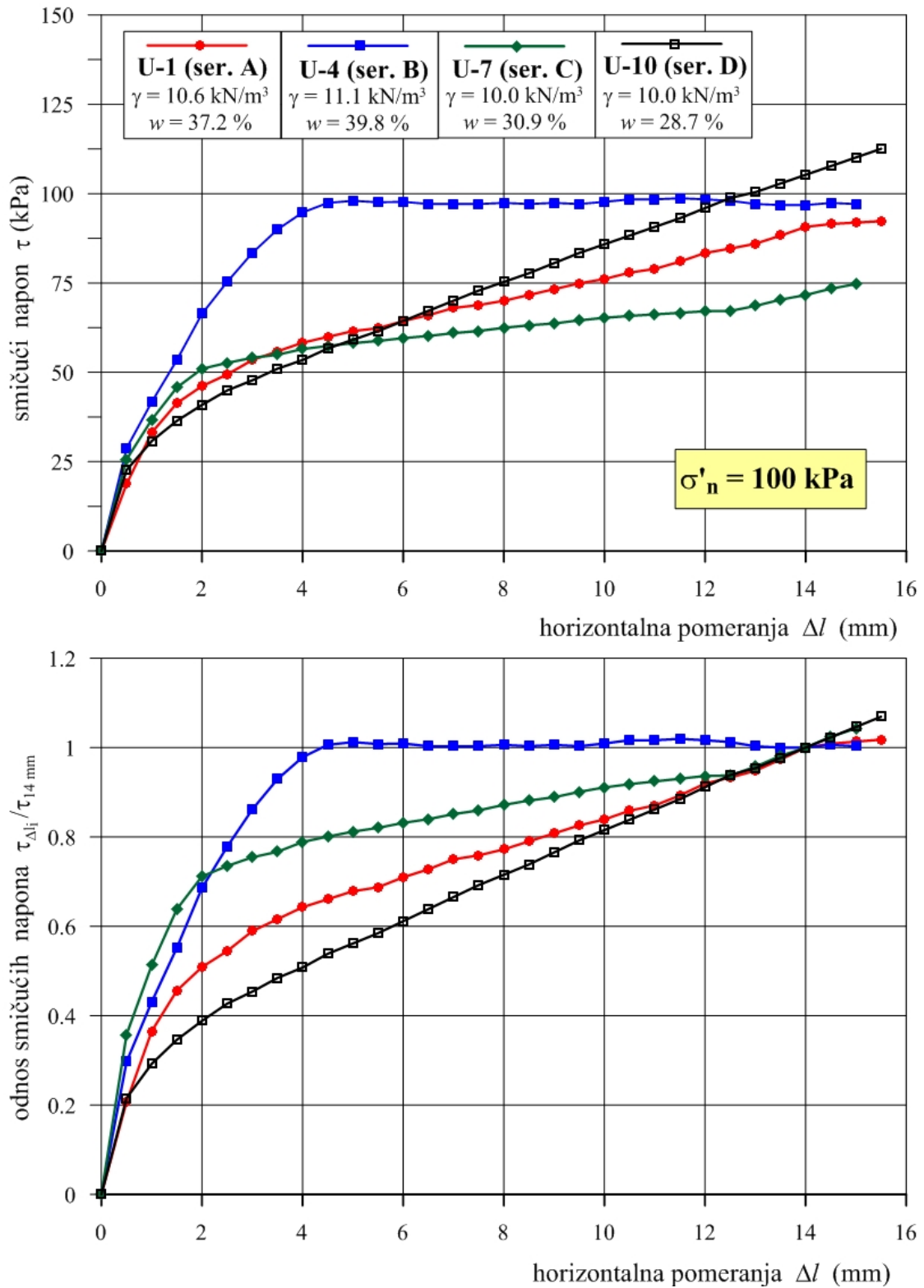
Kod svih uzoraka zabeleženo je izdizanje prednjeg dela gornjeg rama (na dijagramima predstavljeno kao pomeranje krajnje tačke rama) i centralne tačke, dok su deformacije na zadnjem delu gornjeg rama bile zanemarljive, tako da nisu prikazane. Po pravilu, najveće izdizanje i kod ove serije ispitivanja, pokazali su uzorci koji su konsolidovani najnižim normalnim naponom $\sigma'_n = 25 \text{ kPa}$, s tim da su izmerene skoro dva puta veće vrednosti u odnosu na serije A, B i C, jer je za uzorke U-11 i U-12 maksimalno izdizanje iznosilo oko 7 mm.

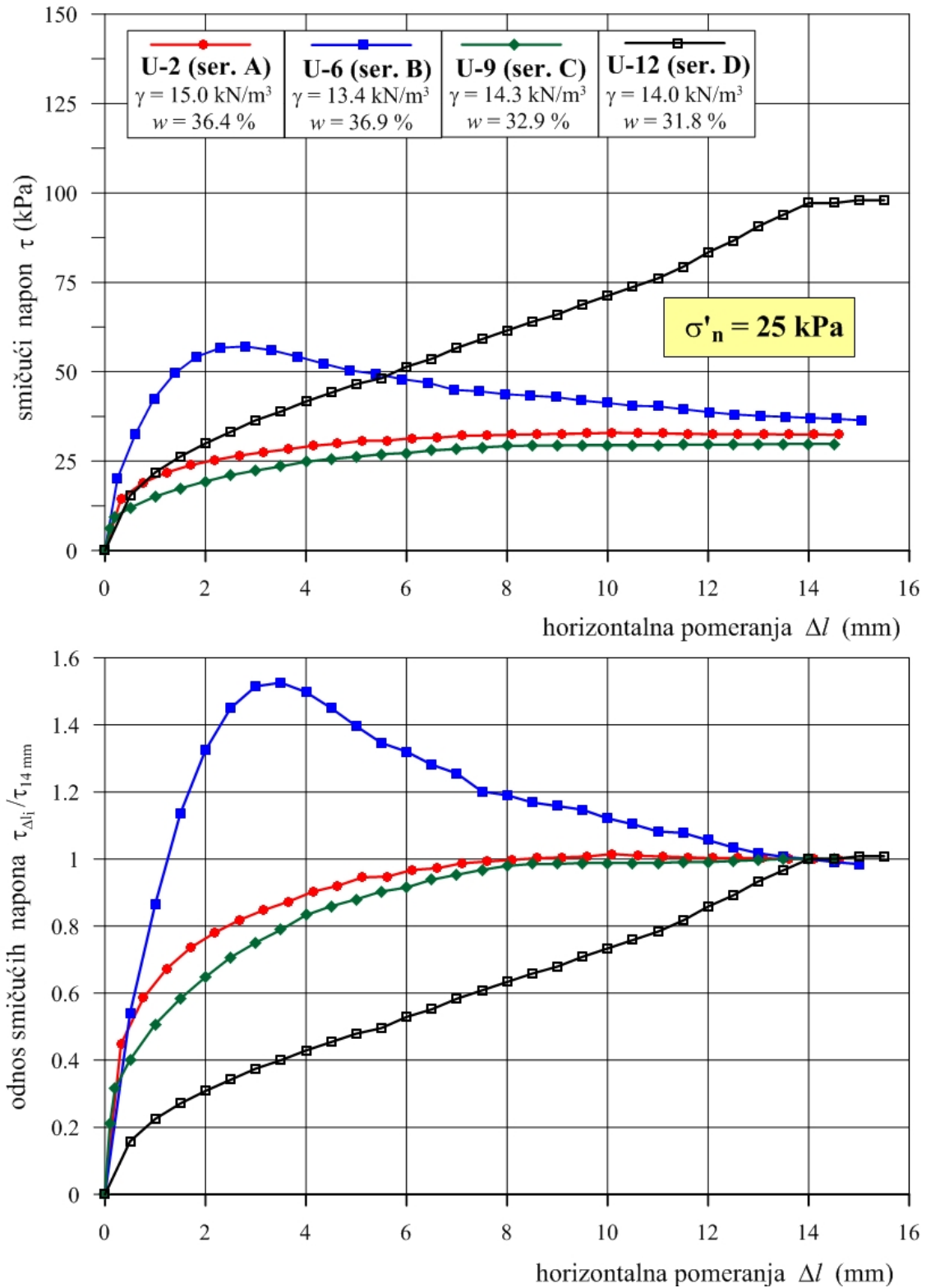
6.5.5. Opšti komentari rezultata ispitivanja

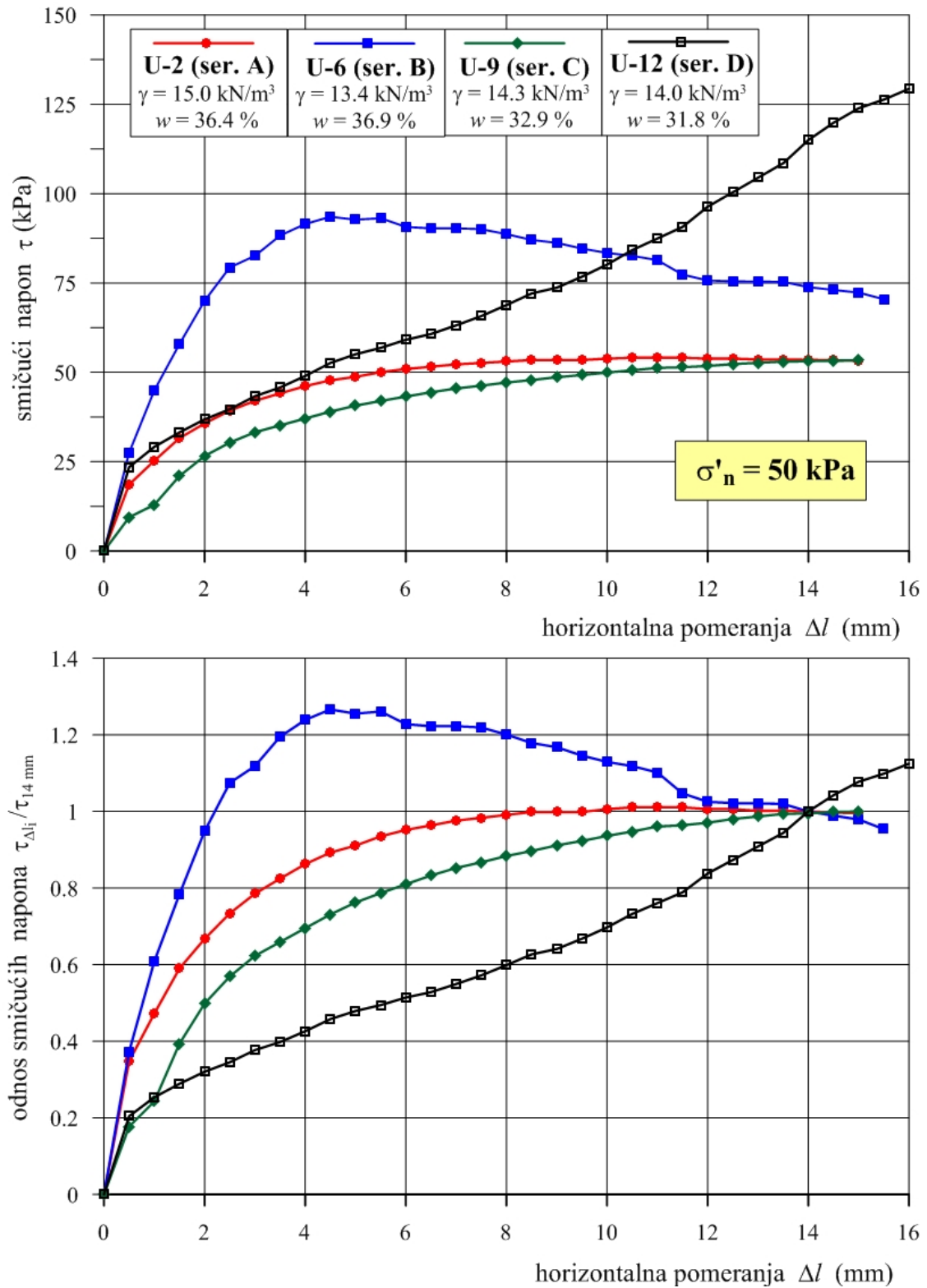
Očigledno je da se naponsko-deformacijsko ponašanje uzoraka serije D razlikuje od uzoraka iz prethodnih serija, kod kojih su ljuhpaste frakcije bile približno paralelno orijentisane ravni smicanja. Ova razlika je jasno prikazana na Slikama 6.74 – 6.79, na kojima je izvršeno upoređivanje smičućih napona u odnosu na horizontalna pomeranja, za dve grupe od po četiri uzoraka iz različitih serija. Prva grupa obuhvatila je uzorke: U-1, U-4, U-7 i U-10, a druga grupa uzorke: U-2, U-6, U-9 i U-12.

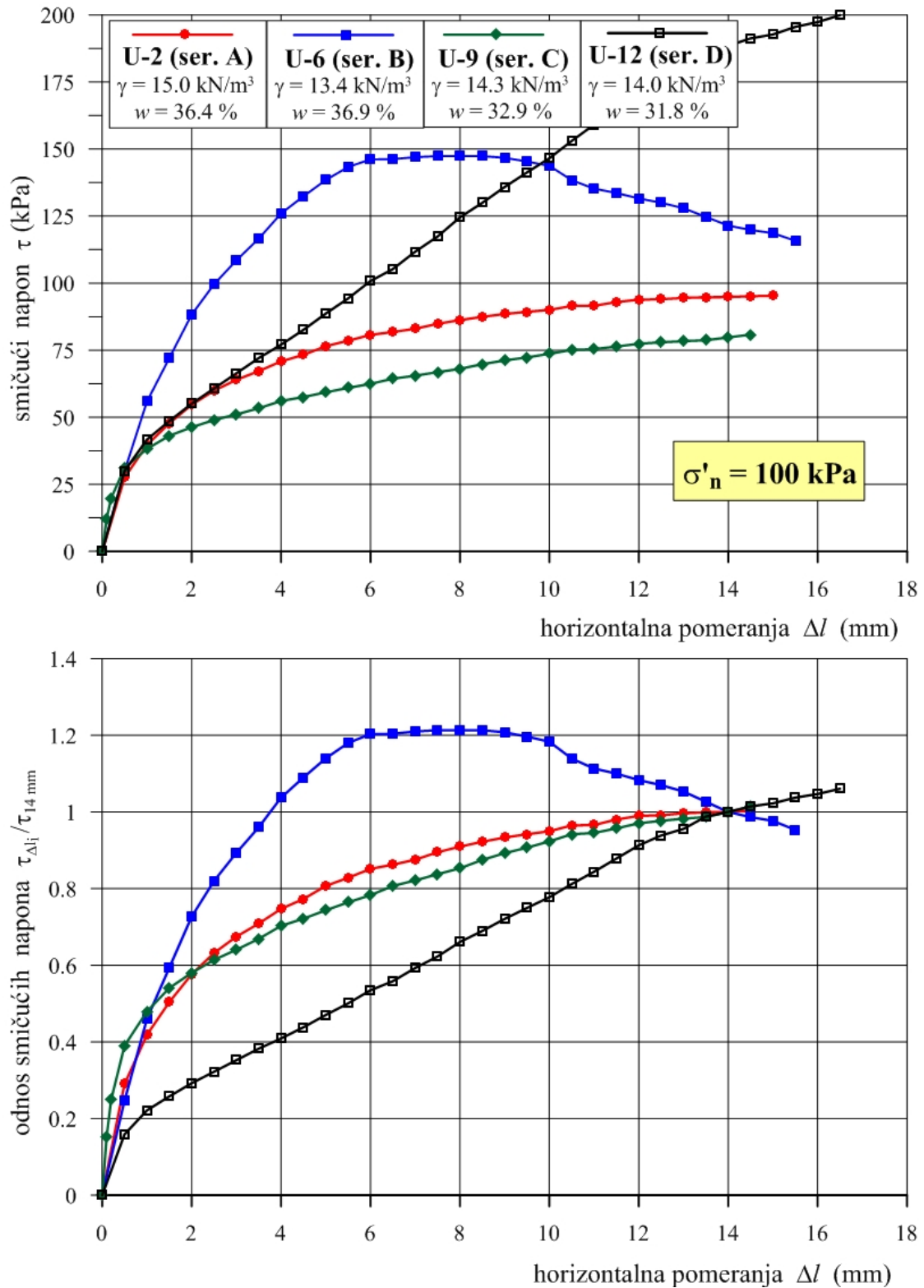
Slika 6.74 Uticaj orijentacije frakcija na smičući napon za prvu grupu uzoraka ($\sigma'_n = 25$ kPa)

Slika 6.75 Uticaj orijentacije frakcija na smičući napon za prvu grupu uzoraka ($\sigma'_n = 50 \text{ kPa}$)

Slika 6.76 Uticaj orijentacije frakcija na smičući napon za prvu grupu uzoraka ($\sigma'_n = 100 \text{ kPa}$)

Slika 6.77 Uticaj orijentacije frakcija na smičući napon za drugu grupu uzoraka ($\sigma'_n = 25 \text{ kPa}$)

Slika 6.78 Uticaj orijentacije frakcija na smičući napon za drugu grupu uzoraka ($\sigma'_n = 50 \text{ kPa}$)

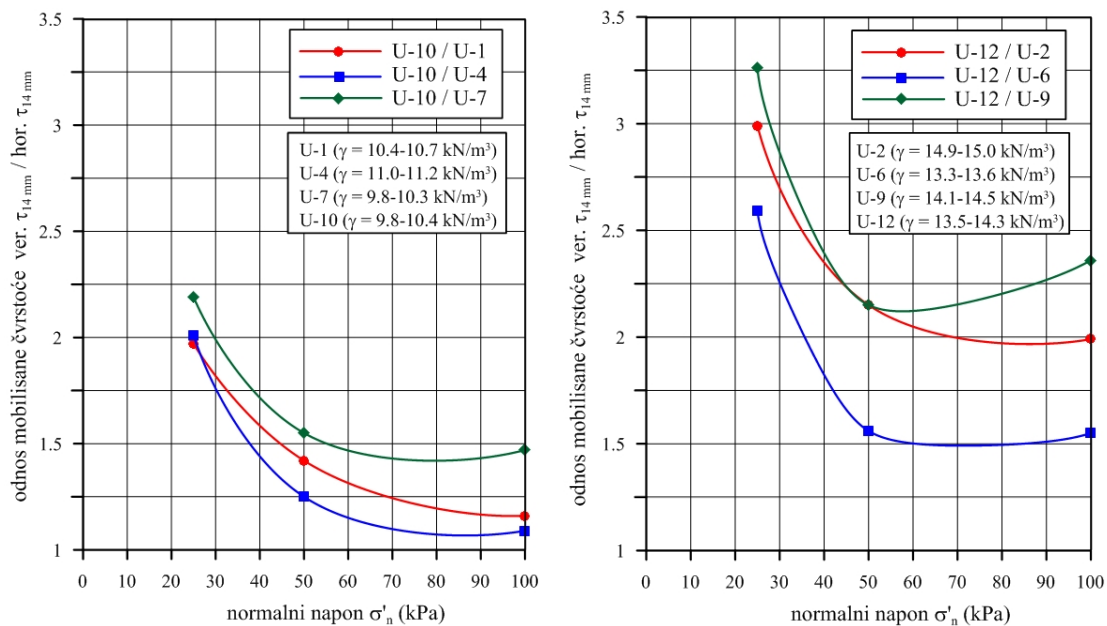
Slika 6.79 Uticaj orijentacije frakcija na smičući napon za drugu grupu uzoraka ($\sigma'_n = 100 \text{ kPa}$)

Za poređenje su odabrani uzorci približno istih zapreminskih težina, za prvu grupu $\gamma = 9.8 - 11.2 \text{ kN/m}^3$, odnosno za drugu grupu $\gamma = 13.3 - 15.0 \text{ kN/m}^3$. Veća odstupanja su se odnosila na vlažnost, jer se ona za prvu grupu uzoraka kretala u intervalu od $w = 23.3 - 42.0 \%$, odnosno za drugu grupu ova odstupanja su bila nešto manja jer su se vlažnosti kretale od $w = 31.6 - 38.6 \%$. Na dijagramima je prikazano ponašanje uzoraka pri istim vrednostima normalnih napona ($\sigma'_n = 25, 50 \text{ i } 100 \text{ kPa}$). Pored toga, za analizirane uzorke se može reći da su približno istog sastava, s tim da je veličina frakcija uzorka U-7 i U-9 nešto veća. Zapaženo je da kod većine uzoraka iz serija A, B i C, maksimalna izmerena pomeranja skoro da dostižu uslove vršnog loma. Tako da uzorci U-4 i U-6 iz serije B, kako pri nižim ($\sigma'_n = 25 \text{ kPa}$), tako i višim normalnim naponima ($\sigma'_n = 100 \text{ kPa}$), pri relativno malim pomeranjima, jasno ukazuju na uslove koji odgovaraju vršnom lomu. Međutim, uzorci U-10 i U-12 iz serije D, kod kojih je orijentacija ljustastih frakcija bila približno upravna na ravan smicanja, sa porastom deformacija ukazuju na ponašanje koje je približno ponašanju materijala sa deformacijskim očvršćavanjem.

Sa prikazanih dijagrama se može videti da su mobilisani naponi smicanja pri pomeranju od $\Delta l = 14 \text{ mm}$, za prvu grupu uzoraka (U-1, U-4 i U-7), iznosili od min. $\tau_{14\text{mm}} = 26.9 \text{ kPa}$ (za $\sigma'_n = 25 \text{ kPa}$) pa do max. $\tau_{14\text{mm}} = 96.8 \text{ kPa}$ (za $\sigma'_n = 100 \text{ kPa}$), dok je za uzorak U-10, mobilisani napon smicanja iznosio $\tau_{14\text{mm}} = 59.1 - 105.3 \text{ kPa}$ (za $\sigma'_n = 25$ odnosno 100 kPa). Za drugu grupu uzoraka (U-2, U-6 i U-9), razlika u vrednostima mobilisanih napona smicanja je bila još veća i iznosila je od min. $\tau_{14\text{mm}} = 29.8 \text{ kPa}$ (za $\sigma'_n = 25 \text{ kPa}$) pa do max. $\tau_{14\text{mm}} = 121.5 \text{ kPa}$ (za $\sigma'_n = 100 \text{ kPa}$), dok je za uzorak U-12, mobilisani napon smicanja iznosio $\tau_{14\text{mm}} = 79.2 - 188.5 \text{ kPa}$ (za $\sigma'_n = 25$ odnosno 100 kPa). Ove vrednosti su poslužile za analizu odnosa mobilisane čvrstoće smicanja na uzorcima koji su pripremljeni na standardan način (sa približno horizontalnom orijentacijom ljustastih frakcija - hor. $\tau_{14\text{mm}}$) i uzorka iz serije D, koji su pripremljeni sa približno normalnom orijentacijom ljustastih frakcija - ver. $\tau_{14\text{mm}}$ (Slika 6.80). Sa dijagrama se može videti da je pri najnižim vrednostima normalnih napona od $\sigma'_n = 25 \text{ kPa}$, ovaj odnos bio najveći i iznosio je od 1.97 do 2.19, za prvu grupu uzoraka, odnosno od 2.59 do 3.26 za drugu grupu uzoraka. Pri najvećim normalnim naponima od $\sigma'_n = 100 \text{ kPa}$, taj odnos se

uglavnom smanjuje (izuzetak je uzorak U-9 iz druge grupe) i za prvu grupu iznosi 1.09 – 1.47, a za drugu se kreće od 1.55 do 2.36. Međutim, treba naglasiti da je ovaj odnos verovatno i veći, s obzirom da su uzorci iz serija A, B i C skoro dostigli vršne napone, dok je napon smicanja uzoraka U-10 i U-12 rastao i nakon izmerenih maksimalnih horizontalnih pomeranja (oko max. $\tau_{16\text{mm}}$).

Ova analiza potvrđuje činjenicu da je čvrstoća smicanja komunalnog otpada u znatnoj meri anizotropna i da zavisi od ugla između dominantne orijentacije ljustastih frakcija i površine smicanja. Pored toga, može se zaključiti da opiti direktnog smicanja izvedeni na uzorcima sa približno horizontalnom orijentacijom ljustastih frakcija, daju najniže vrednosti čvrstoće smicanja komunalnog otpada. Ovime je potvrđena konstatacija koju su izneli Athanasopoulos i dr. 2008.



Slika 6.80 Uticaj orijentacije ljustastih frakcija na odnos mobilisanih napona smicanja pri smičućim pomeranjima od 14 mm

6.6. INTERPRETACIJA REZULTATA ISPITIVANJA

Komunalni otpad je izuzetno deformabilan materijal kod koga do loma dolazi pri velikim deformacijama. S obzirom na to, zavisnost napon-pomeranje kod uzoraka

komunalnog otpada, najčešće ima tendenciju rasta, bez jasno izražene vršne čvrstoće smicanja. Ovakve zavisnosti napon-pomeranje, navele su neke autore na pogrešne zaključke, da se ispitivanjem čvrstoće smicanja komunalnog otpada, ne mogu dostići uslovi vršnog napona smicanja. Međutim, komunalni otpad dostiže uslove vršnog napona smicanja ali pri velikim pomeranjima, koja se konvencionalnim aparatima za sada još uvek ne mogu postići. Iz tog razloga je definisanje parametara čvrstoće smicanja veoma otežano, pa se kao najprihvatljiviji usvaja kriterijum loma koji se odnosi na vrednosti napona smicanja pri određenoj deformaciji – mobilisana čvrstoća smicanja.

Na osnovu prikazanih rezultata ispitivanja u prethodnom poglavlju, u ovoj disertaciji je izvršena interpretacija rezultata korišćenjem pravolinijskog oblika jednačine čvrstoće smicanja. Ova jednačina se dobija za mobilisane vrednosti smičuće čvrstoće pri horizontalnom pomeranju od $\Delta l = 14$ mm, s tim da je na uzorcima kod kojih je jasno izražena vršna čvrstoća smicanja, kao kriterijum loma usvajana ova vrednost. Ranije je već napomenuto da matematički oblik jednačine čvrstoće smicanja komunalnog otpada, osim pravolinijske može da bude i izlomljeno pravolinijska (Kavazanjian i dr. 1995; Manassero i dr. 1996) ili krivolinijska zavisnost. Zato je izvršena i analiza parametara čvrstoće smicanja na osnovu krivolinijske anvelope loma, primenom relacija koje odgovaraju tzv. logaritamskom i hiperboličkom obliku.

6.6.1. Kriterijumi loma

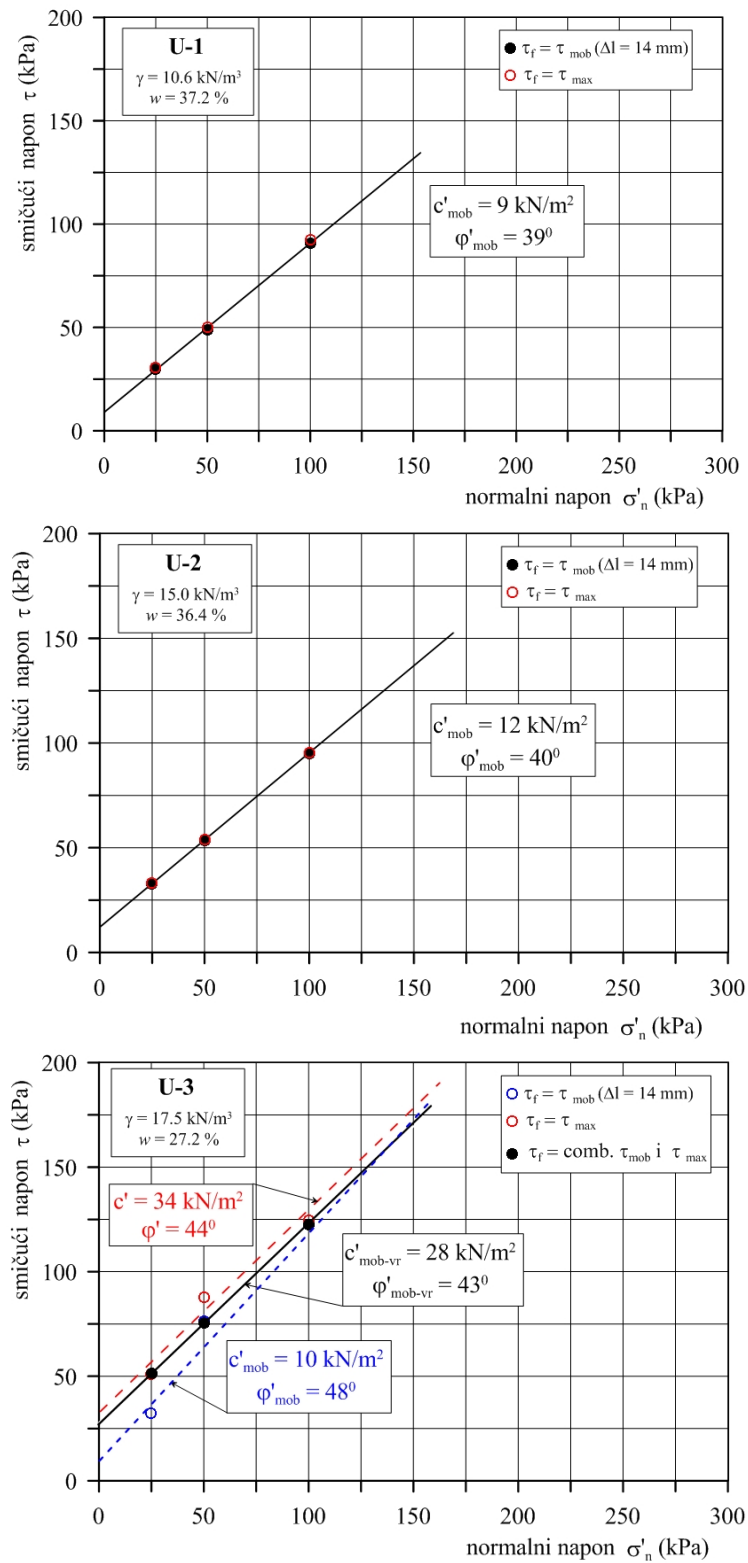
6.6.1.1. Kulon-Mor-Tercagijevi parametri čvrstoće smicanja

Geometrijski elementi pravolinijske zavisnosti čvrstoće smicanja ili dela krivolinijske zavisnosti, nazivaju se parametri čvrstoće smicanja. Prikazane jednačine 6.1 - 6.4, na različite načine opisuju linearnu, Kulon-Mor-Tercagijevu jednačinu čvrstoće. Ovaj oblik funkcionalne zavisnosti se zbog jednostavnosti, najčešće upotrebljava u praksi i predstavlja zadovoljavajući opis naponsko-deformacijskog stanja pri lomu, u određenom naponskom intervalu. Koliko je ovaj kriterijum često u upotrebi, može se videti u poglavlju 6.3, iz koga se može zaključiti da se čvrstoća smicanja komunalnog otpada najčešće, definiše kao koheziono - frikciona sa parametrima: kohezijom c' (c'_{mob}) i uglom unutrašnjeg trenja φ' (φ'_{mob}).

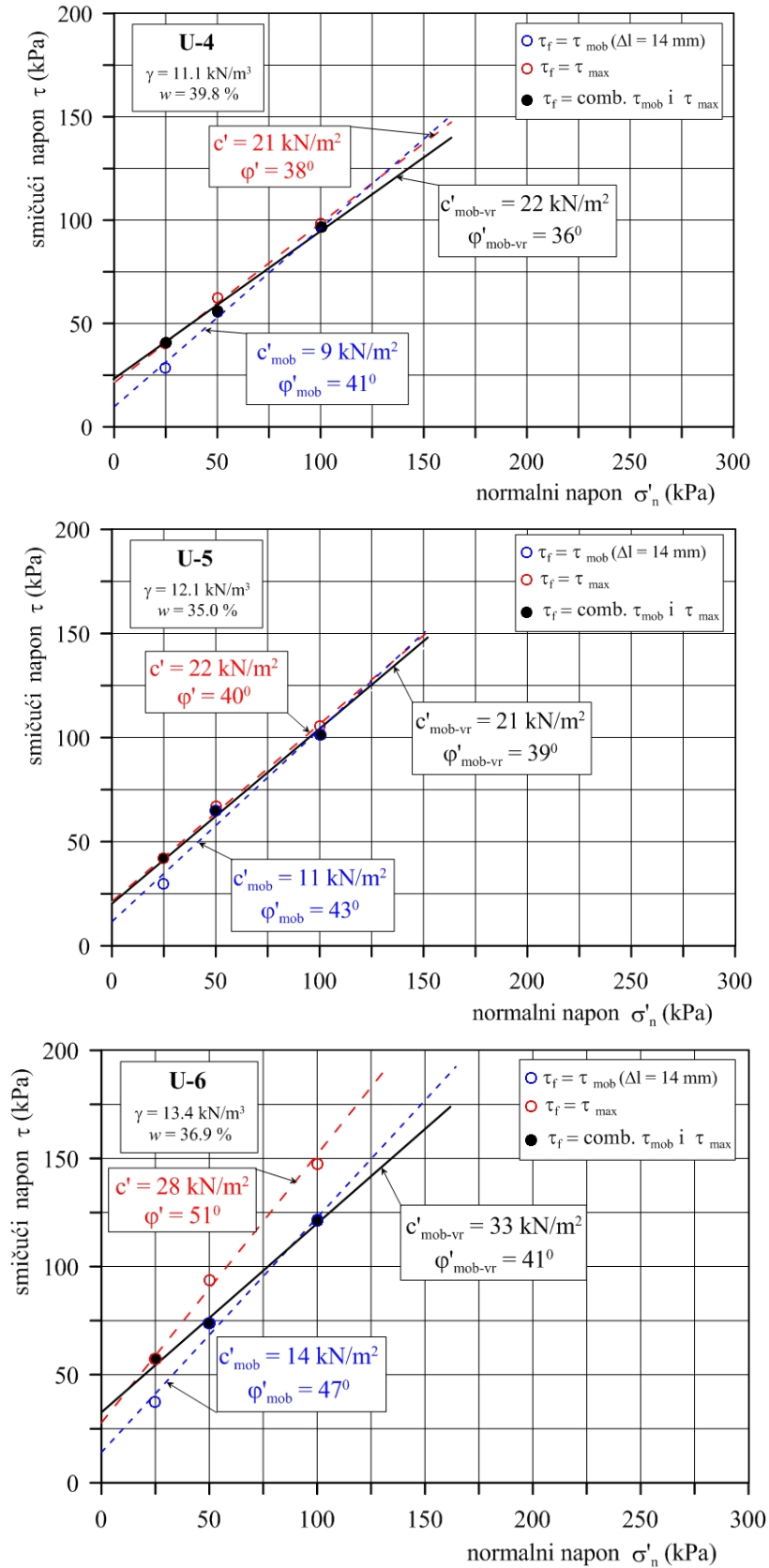
Međutim, navode se i neke druge pretpostavke, koje ponašanje komunalnog otpada poistovećuju sa čisto kohezivnim materijalom ($\varphi_u = 0^0$) ili sa čisto frikcionim materijalom ($c' = 0$). Ipak, treba reći, da ovakve pretpostavke odgovaraju ponašanju realnog tla, dok za ponašanje komunalnog otpada, ne postoji jasno objašnjenje za ovakvo tumačenje. Tako npr., prilikom definisanja parametara čvrstoće smicanja komunalnog otpada na osnovu terenskih ispitivanja, isto se opravdano usvaja da je $c' = 0$, dok tumačenja koja se odnose na nedrenirano ponašanje komunalnog otpada ($\varphi_u = 0^0$), po pravilu, daje neprihvatljivo velike vrednosti čvrstoće smicanja otpada. Većina autora, po pravilu usvaja određenu veličinu horizontalnih deformacija-pomeranja za definisanje parametara čvrstoće smicanja komunalnog otpada (c' i φ'). Kod triaksijalnog opita usvajaju se deformacije u rasponu od 10 - 30 %, dok se kod opita direktnog smicanja, u zavisnosti od veličine aparata, usvaja određena veličina pomeranja (Δl u mm). Koristeći Kulon-Mor-Tercagijev kriterijum loma, Jessberger, 2001; Zekkos, 2005; Stark i dr. 2009. i dr., predlažu da se parametri čvrstoće smicanja definišu na osnovu opita direktnog smicanja. U slučaju kada lom nije izražen (što je najčešći slučaj), usvaja se vrednost horizontalnih pomeranja, koja zavisi od dimenzija ispitivanih uzoraka i kreće se od $\Delta l = 7$ do 150 mm. Iz tog razloga se najčešće čvrstoća smicanja komunalnog otpada definiše mobilisanim uglom unutrašnjeg trenja (φ'_{mob}), i mobilisanom kohezijom (c'_{mob}).

Za definisanje parametara čvrstoće smicanja komunalnog otpada, usvojio sam već navedeni kriterijum, s obzirom da za većinu ispitanih uzoraka nisu dostignuti uslovi vršnog napona smicanja. U odnosu na dimenzije korišćenih aparata, za interpretaciju je usvojena mobilisana vrednost čvrstoće smicanja za pomeranje od $\Delta l = 14$ mm. Ipak treba naglasiti da ovako usvojen kriterijum loma, nije u potpunosti adekvatan za sve nivoe normalnih napona. Naime, za uzorak U-3 iz serije A, odnosno za sve uzorke iz serije B (U-4, U-5 i U-6), pri nižim normalnim naponima $\sigma'_n = 25$ kPa, (a kod uzorka U-6 za sve primenjene nivoe normalnih napona), može se reći da je dijagram napon-pomeranje ukazivao na ponašanje materijala sa deformacijskim omekšavanjem, jer je bila jasno izražena vršna čvrstoća smicanja. Sa povećanjem nivoa normalnih napona, dijagram napon-pomeranje ukazivao je na stalno rastuću zavisnost sa tendencijom pojave plastičnog loma. Zato je za ispitane uzorke, kod kojih su pri određenim nivoima normalnih napona dostignuti uslovi vršnog napona smicanja, interpretacija izvršena za oba kriterijuma, a predložena je vrednost parametara čvrstoće smicanja koja je dobijena njihovom kombinacijom.

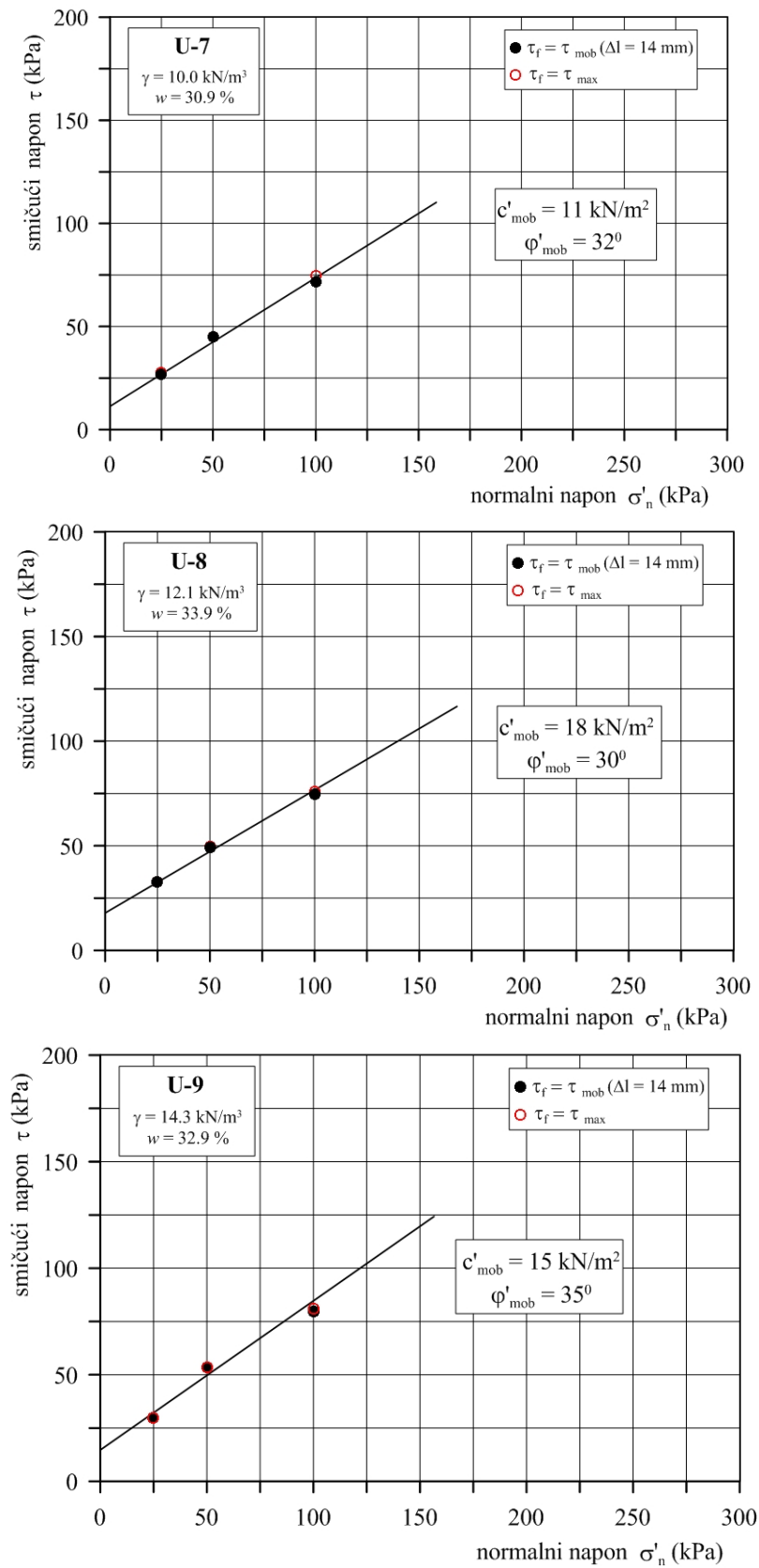
Interpretacija rezultata izvršenih ispitivanja, primenom opisanog kriterijuma loma, u zavisnosti od serije uzoraka, prikazana je na Slikama 6.81 do 6.84.



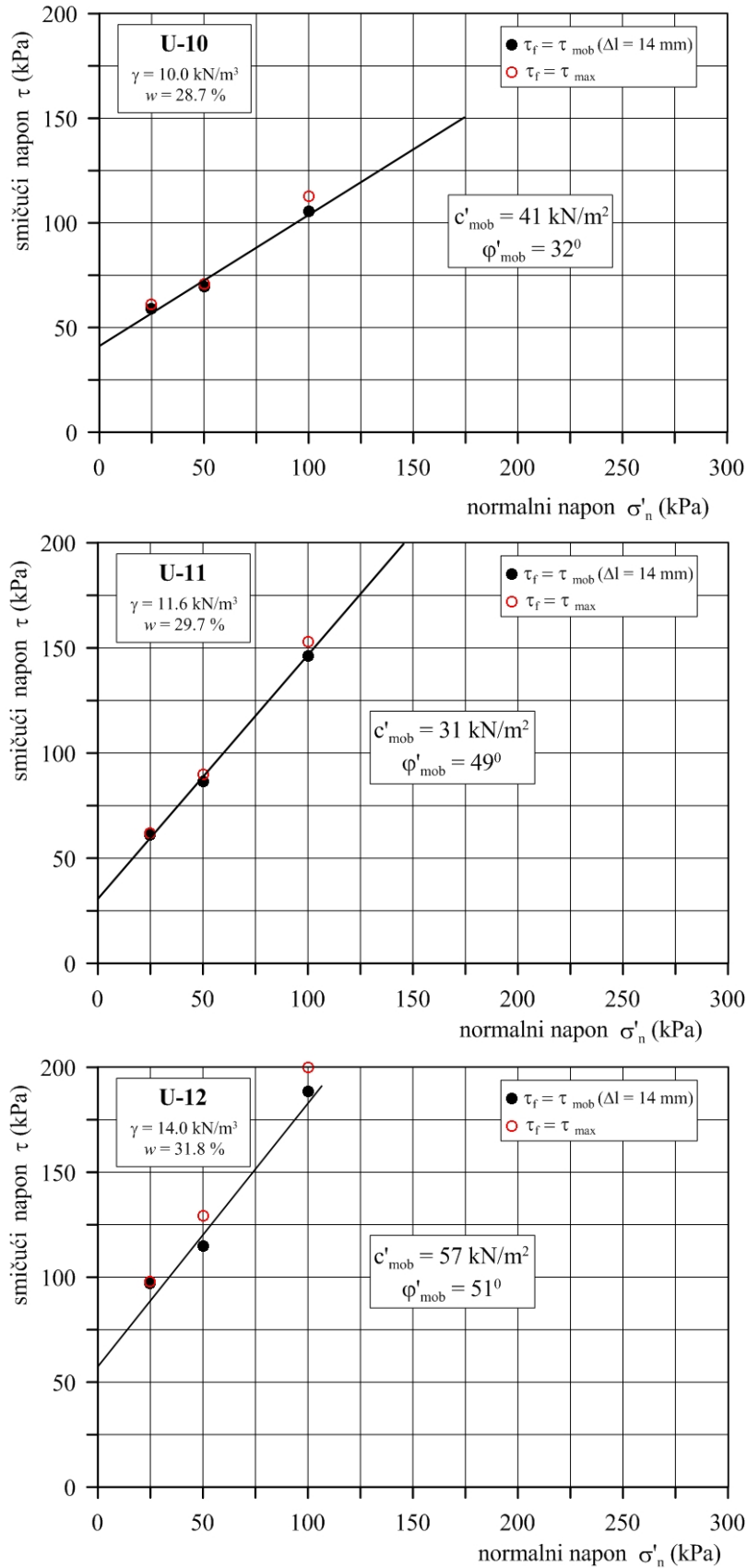
Slika 6.81 Parametri čvrstoće smicanja za uzorke iz serije A



Slika 6.82 Parametri čvrstoće smicanja za uzorke iz serije B

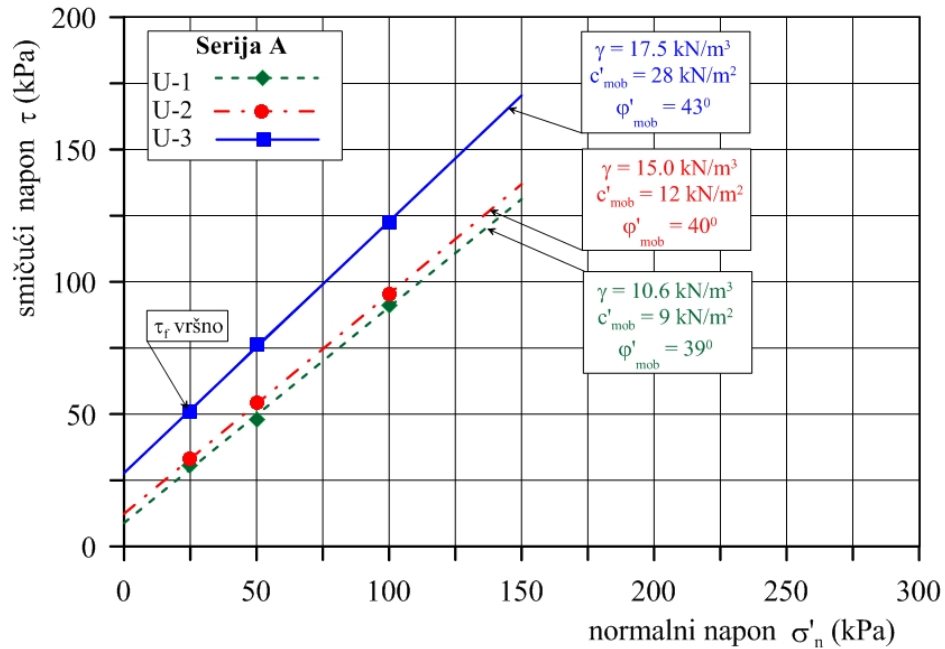


Slika 6.83 Parametri čvrstoće smicanja za uzorke iz serije C

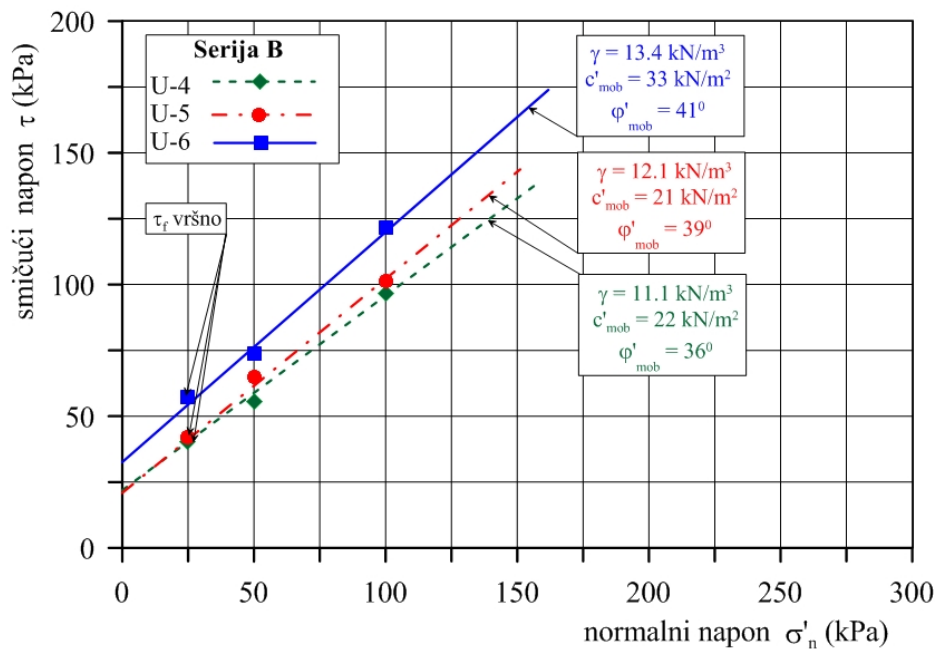


Slika 6.84 Parametri čvrstoće smicanja za uzorke iz serije D

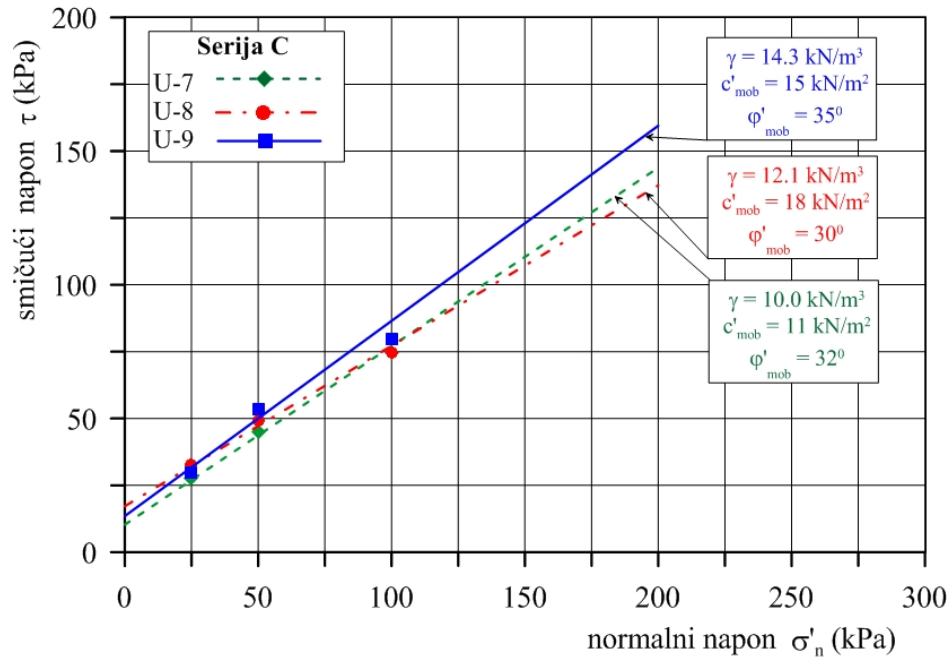
Dobijeni rezultati pokazuju da izbor kriterijuma loma može značajno da utiče na vrednosti parametara čvrstoće smicanja (c' , c'_{mob} i φ' , φ'_{mob}). Anvelope loma, u zavisnosti od serije ispitanih uzoraka, skupno su prikazane na Slikama 6.85 - 6.88.



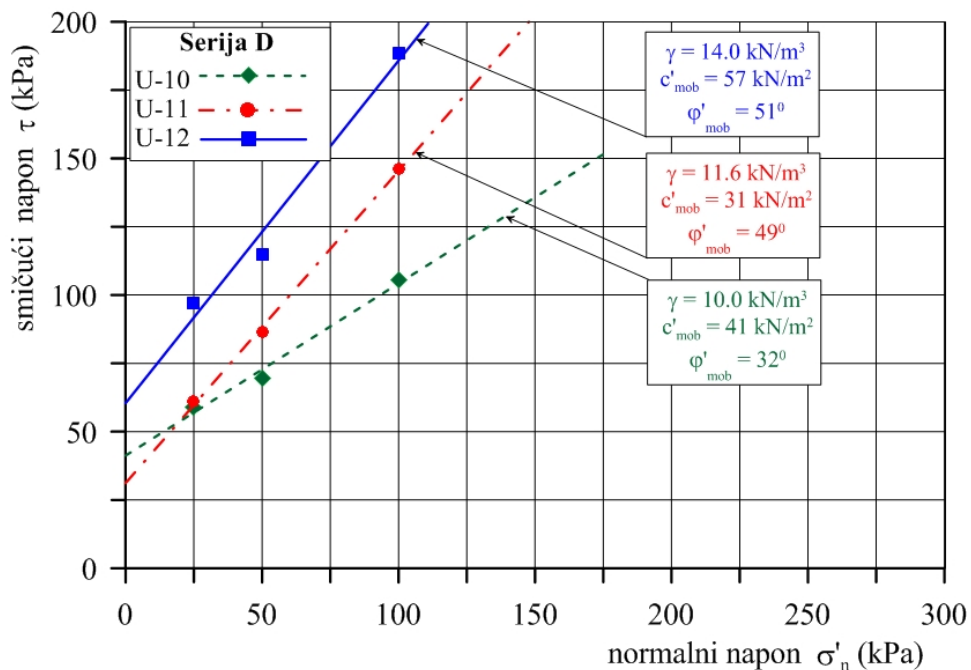
Slika 6.85 Zbirne obvojnice loma za uzorke iz serije A



Slika 6.86 Zbirne obvojnice loma za uzorke iz serije B



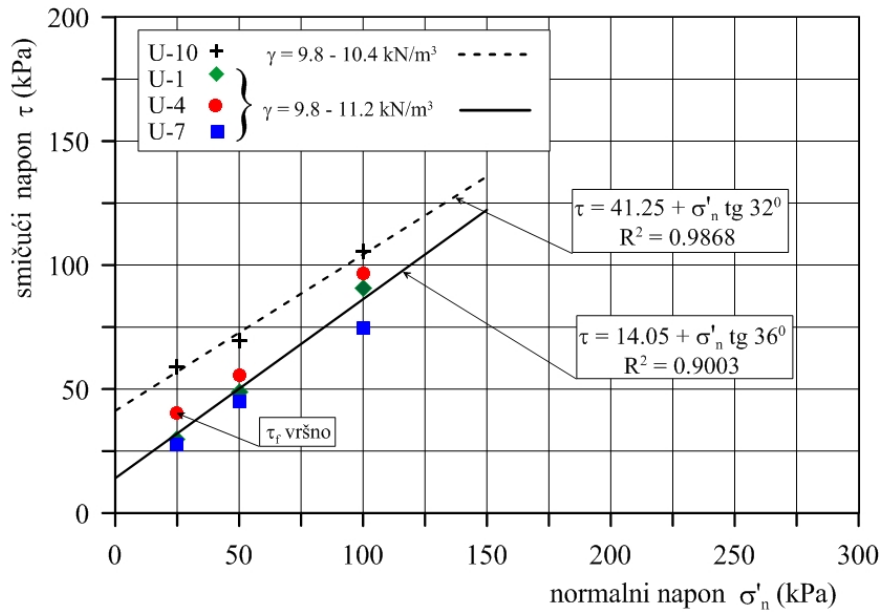
Slika 6.87 Zbirne obvojnice loma za uzorke iz serije C



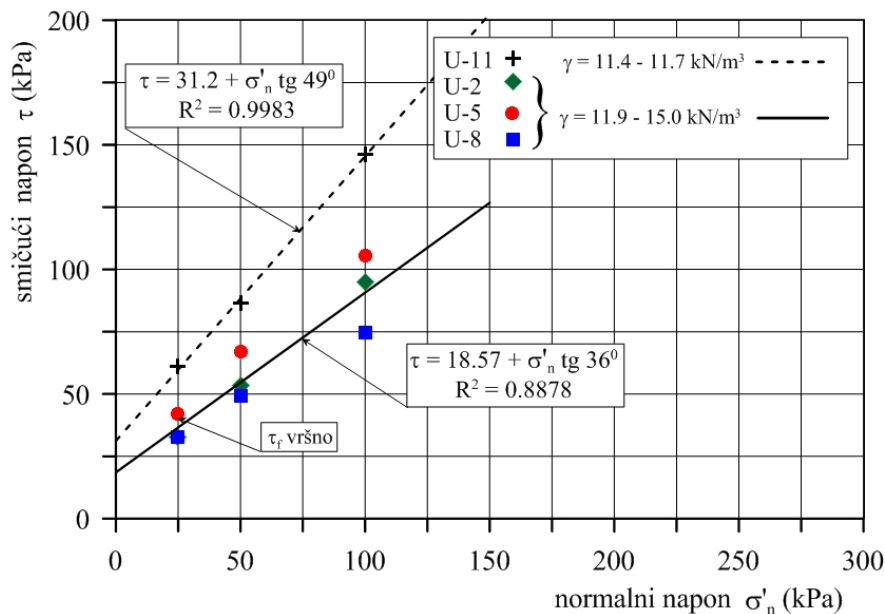
Slika 6.88 Zbirne obvojnice loma za uzorke iz serije D

Već je naglašeno da se dijagram napon-pomeranje, za uzorke serije D, razlikuje od uzoraka iz prethodnih serija, kod kojih su čestice bile približno paralelno orijentisane ravni smicanja. Iz tih razloga je kao i u poglavlju 6.5., izvršeno upoređivanje dobijenih

vrednosti parametara čvrstoće smicanja, za dve grupe od po četiri uzorka iz različitih serija. I u ovom slučaju, poređenje je izvršeno na uzorcima sa približno istim zapreminskim težinama (prva grupu $\gamma = 9.8 - 11.2 \text{ kN/m}^3$, odnosno druga grupa $\gamma = 13.3 - 15.0 \text{ kN/m}^3$). Kao što je već napomenuto, analizirani uzorci imaju približno isti sastav otpada, s tim da je veličina čestica uzorka U-7 i U-9 nešto veća (Tabele 6.7 – 6.10). Rezultati su prikazani na Slikama 6.89 i 6.90.

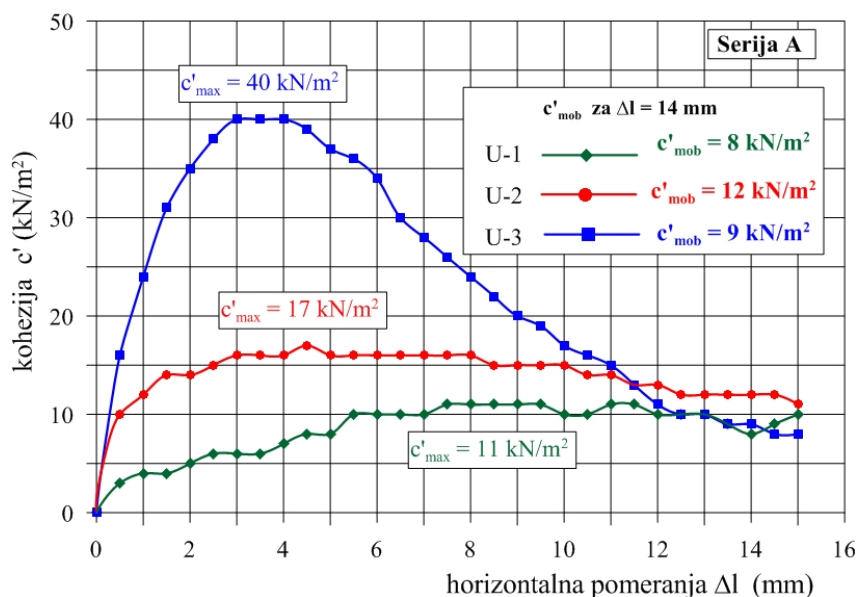


Slika 6.89 Uticaj orijentacije čestica otpada na čvrstoću smicanja ($\gamma = 9.8 - 11.2 \text{ kN/m}^3$)

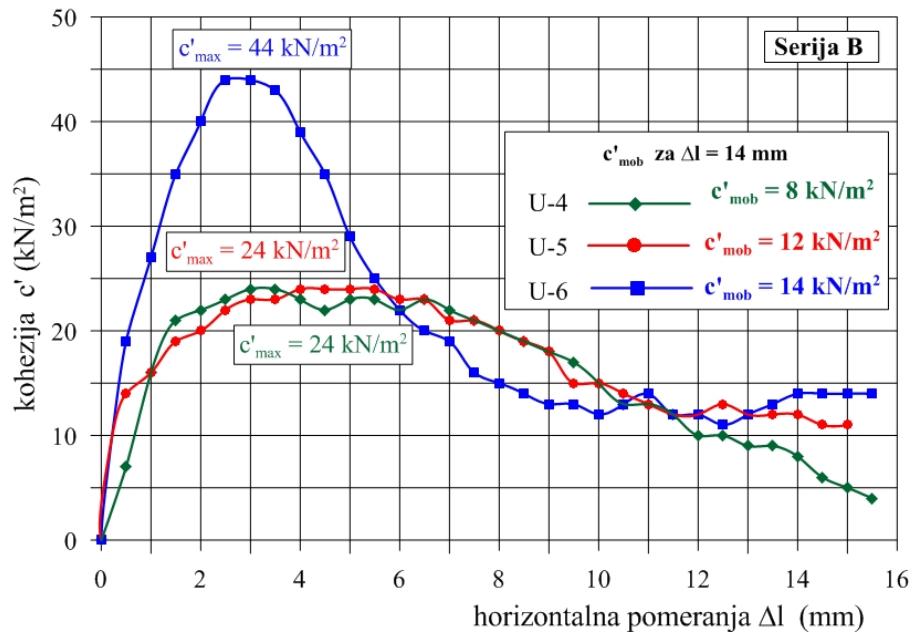


Slika 6.90 Uticaj orijentacije čestica otpada na čvrstoću smicanja ($\gamma = 11.9 - 15.0 \text{ kN/m}^3$)

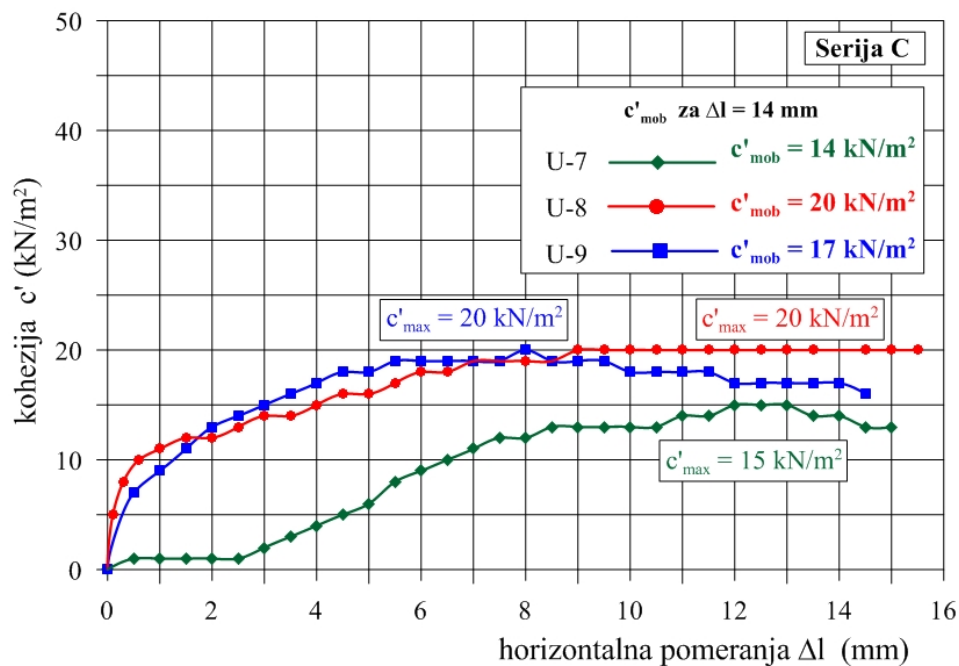
Na Slikama 6.91 do 6.93, prikazane su vrednosti mobilisane kohezije za izmerene vrednosti horizontalnih pomeranja. Rezultati su pokazali da kod većine ispitanih uzoraka iz serija A, B i C (izuzetak je uzorak U-7 iz serije C), kohezija dostiže maksimalnu vrednost u zoni relativno malih horizontalnih pomeranja ($\Delta l = 2-5$ mm). Kod najviše zbijenijih uzoraka iz ovih serija, maksimalne vrednosti kohezije mobilisu se pri manjim horizontalnim pomeranjima (za uzorke U-3 i U-6, $\Delta l = 2-3$ mm). Međutim, za velike vrednosti pomeranja, za uzorke iz ovih serija, može se konstatovati da je uticaj zbijenosti (zapreminske težine) na vrednosti kohezije, relativno mali. Tako se npr. za horizontalna pomeranja od $\Delta l = 12$ mm, razlike mobilisanih vrednosti kohezija za sve uzorke, kreću u intervalu od $\Delta c'_{\text{mob}} = 2-5$ kN/m². Značajnije razlike vrednosti mobilisane kohezije, karakteristične su za zbijenije uzorke otpada (U-3 i U-6). Ovo nije saglasno sa rezultatima do kojih su došli Gotteland i dr. (2000), prema kojima je mobilisana kohezija komunalnog otpada, nezavisna od vrednosti horizontalnih pomeranja, i da se za sitnije čestice otpada kohezija povećava sa povećanjem horizontalnih pomeranja. Treba napomenuti, da se ova konstatacija odnosi na komunalni otpad sa većim sadržajem plastike. Do slične konstatacije da "kohezija nije u funkciji horizontalnih pomeranja već je ona približno konstantna", došli su i Gabr i Valero (1995).



Slika 6.91. Mobilisana kohezija u funkciji smičućih pomeranja - uzorci serije A



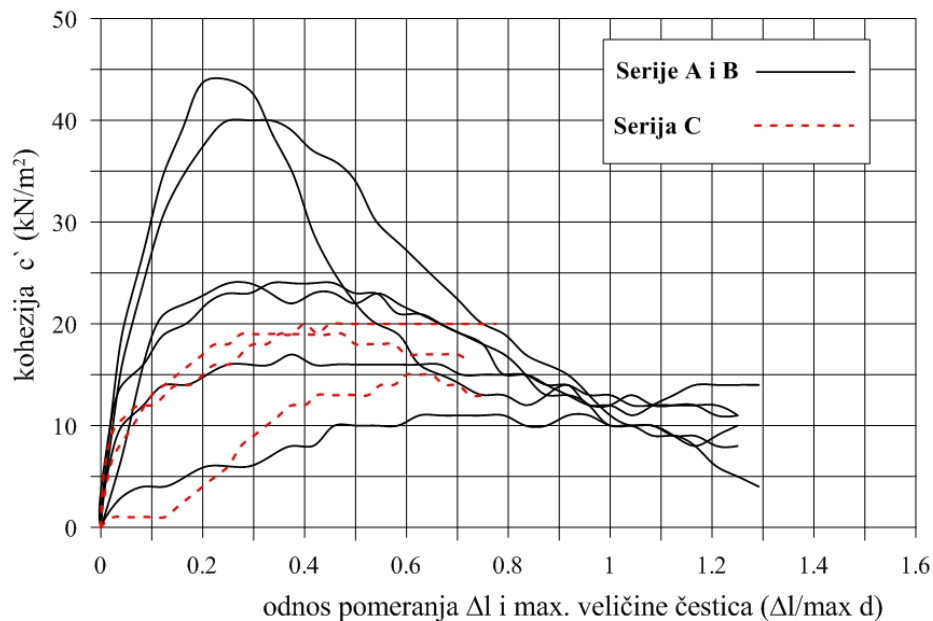
Slika 6.92. Mobilisana kohezija u funkciji smičućih pomeranjać - uzorci serije B



Slika 6.93. Mobilisana kohezija u funkciji smičućih pomeranja - uzorci serije C

Za konkretno ispitivane uzorke iz serija A i B, pomenuta konstatacija o nezavisnosti mobilisane kohezije od veličine pomeranja, mogla bi se dovesti u funkciju sa odnosom veličine najkrupnijih čestica ispitanih uzoraka i pomeranja tokom smicanja. S obzirom na maksimalnu veličinu čestica od $d < 12$ mm, mobilisana kohezija postaje približno konstantna za istu veličinu pomeranja. To bi značilo, da za odnos veličine pomeranja i

maksimalne krupnoće čestica ($\Delta l / \max d$) < 1 , vrednosti mobilisane kohezije nisu konstantne već imaju tendenciju porasta sa povećanjem pomeranja, a ukoliko je ovaj odnos veći od 1, veća je mogućnost da kohezija ne bude u funkciji povećanja horizontalnih pomeranja (Slika 6.94).

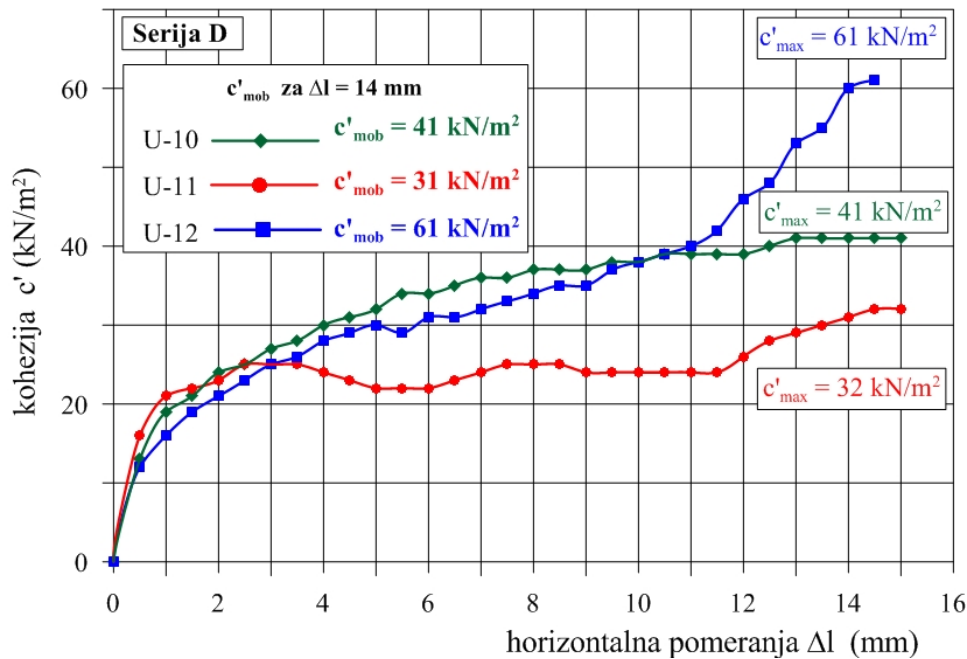


Slika 6.94. Mobilisana kohezija u funkciji horizontalnih pomeranja i veličine čestica

Međutim, kod uzoraka iz serije C čija je maksimalna veličina čestica iznosila 20 mm, ovaj odnos je bio manji i iznosio je od 0.4-0.5. To bi značilo da se za sitnije ispitani materijal, maksimalne vrednosti mobilisane kohezije dobijaju pri znatno manjim pomeranjima ($<$ od 5 mm). Za krupniji materijal otpada, maksimalna vrednost mobilisane kohezije nije jasno izražena, ali za slične vrednosti pomeranja, od oko 5 mm, ona postaje skoro konstantna.

Ovo u neku ruku potvrđuje pretpostavku da za dostizanje vršnih vrednosti kohezije, koja se mobilise pri određenim horizontalnim pomeranjima, krupnoća čestica (komponenta) ima značajan uticaj (Rakić, 2011c).

Što se tiče uzoraka iz serije D, može se zaključiti da orijentacija armirajućih čestica ima značajan uticaj na vrednosti kohezije. Naime, sa dijagrama prikazanih na Slici 6.95, jasna je tendencija da kohezija dostigne maksimalnu vrednost u zoni horizontalnih pomeranja $\Delta l = 13-15$ mm, za sve uzorke iz ove serije.

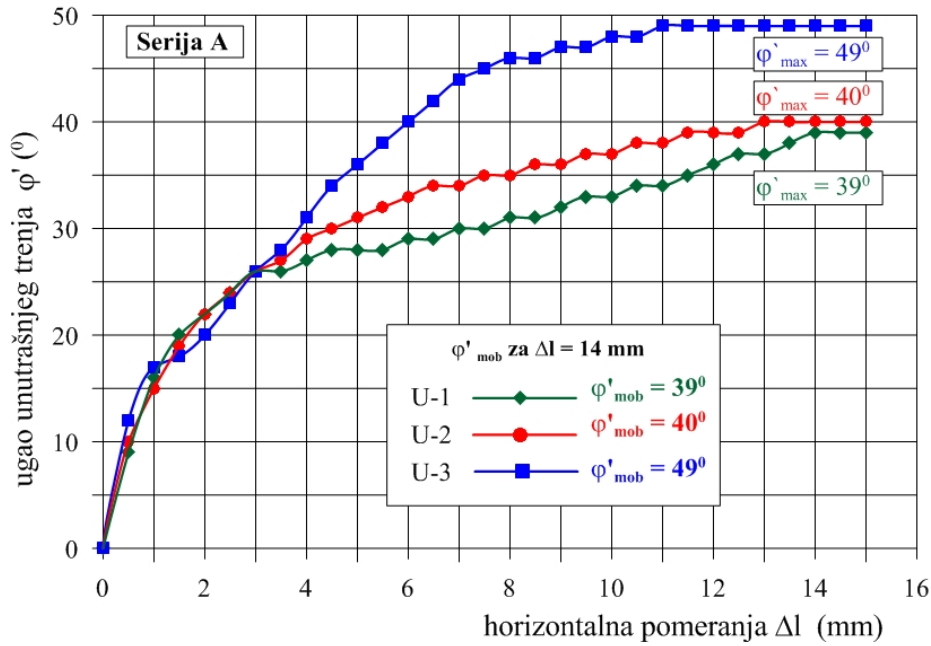


Slika 6.95. Mobilisana kohezija u funkciji horizontalnih pomeranja - uzorci serije D

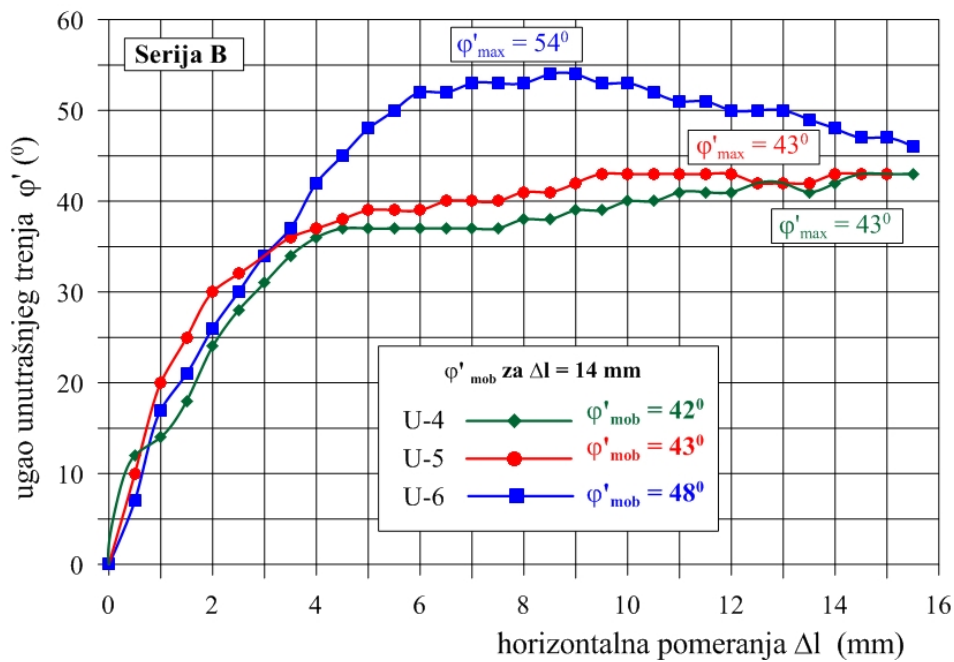
Na Slikama 6.96 do 6.99, prikazane su vrednosti mobilisanog ugla unutrašnjeg trenja u zavisnosti od horizontalnih pomeranja. Za razliku od kohezije, ugao unutrašnjeg trenja raste sa porastom horizontalnih pomeranja (izuzetak je uzorak U-6 iz serije B). Za uzorke iz serija A, B i C, kod kojih je dominantna orijentacija ljuspastih čestica paralelna ravni smicanja, usvojena je vrednost horizontalnih pomeranja $\Delta l = 14$ mm.

Do sličnog zaključka došli su Jessberger i Kockel (1993). Oni su konstatovali da se kod starijeg tj. delimično raspadnutog otpada, mobilisani ugao unutrašnjeg trenja φ'_{mob} povećava sa pomeranjem sve do nekog maksimuma, a zatim, sa daljim povećanjem pomeranja on ostaje konstantan. Osim toga i već napomenuti Gabr i Valero (1995) su pokazali da ugao unutrašnjeg trenja raste u funkciji povećanja horizontalnog pomeranja.

Iz ovoga proizilazi da su moguće i veće razlike u vrednostima mobilisanih uglova unutrašnjeg trenja, s obzirom da njihova vrednost zavisi od izbora veličine horizontalnog pomeranja za kriterijum loma. Zato su Gotteland et al. (2000), polazeći od teorije mobilisanja zateznih sila, predložili da se veličina horizontalnih pomeranja dovede u vezu sa dužinom vlaknastih (armirajućih) čestica.



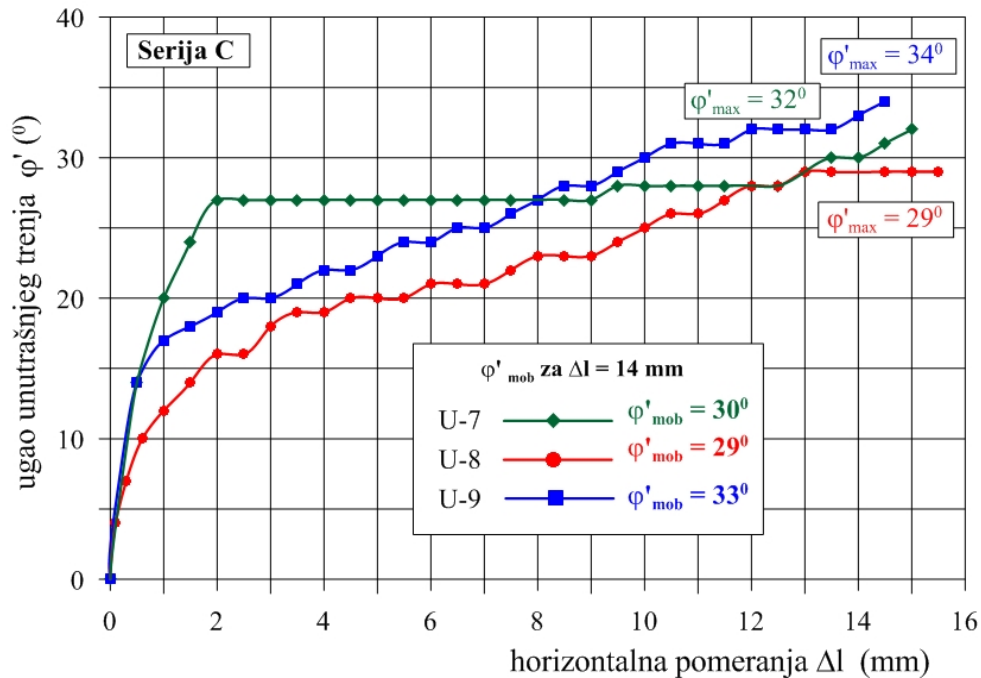
Slika 6.96 Mobilisani ugao unutrašnjeg trenja u funkciji pomeranja - uzorci serije A



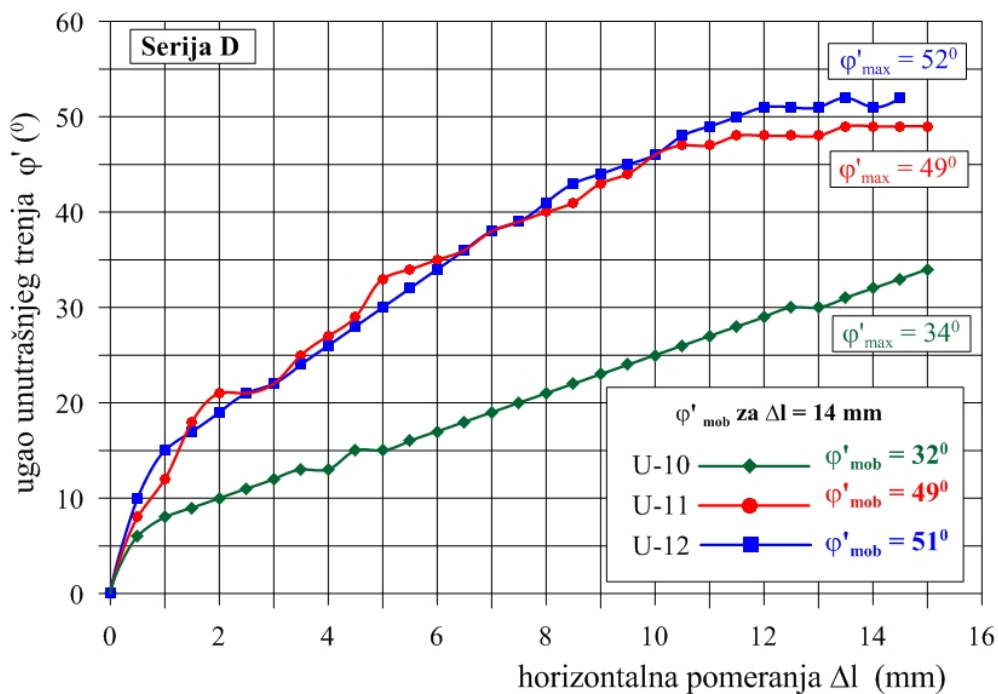
Slika 6.97 Mobilisani ugao unutrašnjeg trenja u funkciji pomeranja - uzorci serije B

Na promenu ugla unutrašnjeg trenja u zoni malih pomeranja ($\Delta l = 3-4$ mm), za razliku od kohezije, zapreminska težina nema veliki uticaj. Tako za uzorke iz serija A i B, pri horizontalnom pomeranju $\Delta l = 3$ mm, razlike mobilisanih vrednosti ugla unutrašnjeg trenja praktično i nema tj. $\Delta\varphi'_{mob} = 2^\circ$. Međutim, kod svih serija, vrednosti mobilisanog

ugla unutrašnjeg trenja bile su kod zbijenih uzoraka nešto veće za veća horizontalna pomeranja.

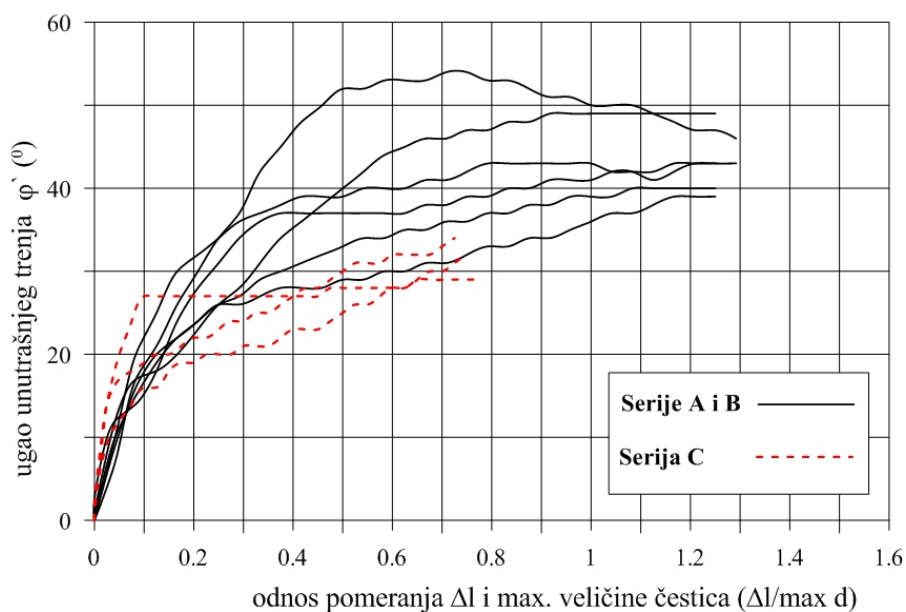


Slika 6.98 Mobilisani ugao unutrašnjeg trenja u funkciji pomeranja - uzorci serije C



Slika 6.99 Mobilisani ugao unutrašnjeg trenja u funkciji pomeranja - uzorci serije D

Za razliku od kohezije, promena mobilisanog ugla unutrašnjeg trenja u funkciji odnosa veličine maksimalnih čestica ispitanih uzoraka i izmerenih pomeranja, nije jednoznačna. Razlog za to je nemogućnost razmatranja aktiviranja sila zatezanja, pri datoj veličini horizontalnog pomeranja, koja odgovara krupnoći čestica. Na primer, ukoliko se prilikom usvajanja vrednosti horizontalnih pomeranja uzme u obzir veličina korišćenog aparata, to bi u konkretnom slučaju značilo da se za horizontalna pomeranja mogu usvojiti vrednosti od $\Delta l = 6$ mm pa do $\Delta l = 150$ mm. Međutim, na prikazanim dijagramima, može se zapaziti da se najveća povećanja mobilisanog ugla unutrašnjeg trenja javljaju pri različitim vrednostima horizontalnih pomeranja. Tako je za uzorke iz serija A i B, najveće povećanje pri horizontalnim pomeranjima u intervalu $\Delta l = 4 - 6$ mm, dok je za uzorke iz serije C najveće povećanje pri manjim pomeranjima do $\Delta l = 3$ mm. Za uzorke iz serije D, može se reći da ugao unutrašnjeg trenja konstantno raste, počev od vrednosti pomeranja od oko $\Delta l = 1$ mm.



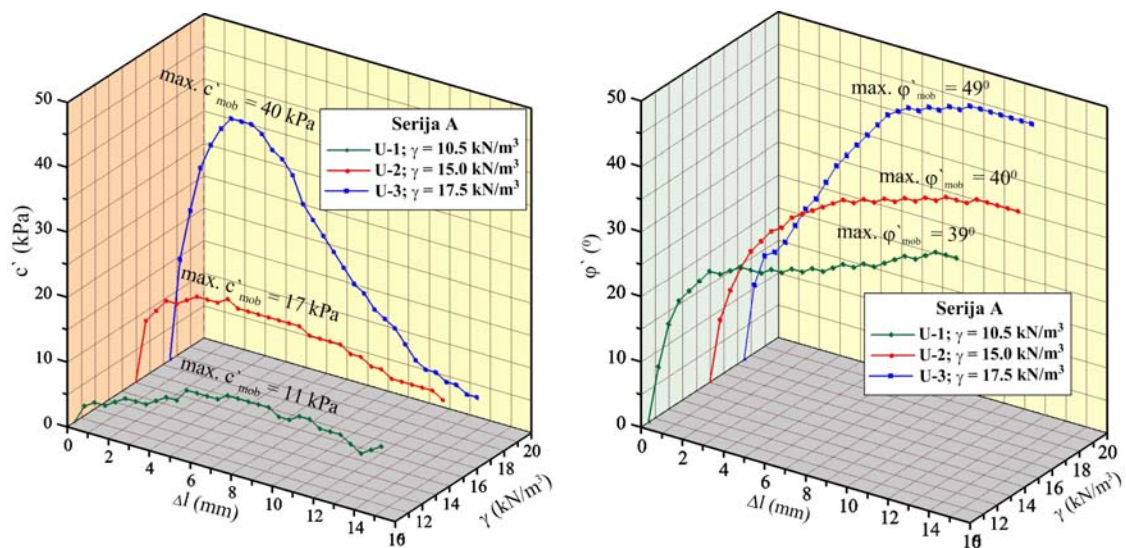
Slika 6.100 Mobilisani ugao unutrašnjeg trenja u funkciji horizontalnih pomeranja i veličine čestica

U ovom slučaju mobilisani ugao unutrašnjeg trenja ima tendenciju rasta, bez obzira na odnos veličine pomeranja i maksimalne krupnoće čestica (Slika 6.100). U vezi sa ovim treba napomenuti da su Dixon i dr. (2004) analizirali uticaj veličine čestica i horizontalnih pomeranja, na povećanje mobilisane vrednosti ugla unutrašnjeg trenja otpada. Oni su došli do zaključka da do najvećeg povećanja mobilisanog ugla

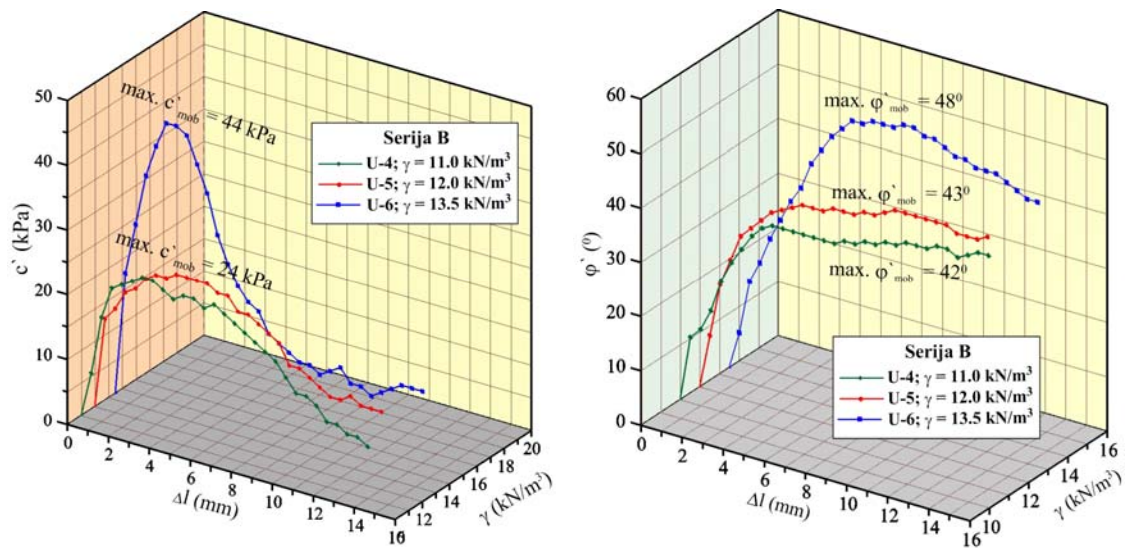
unutrašnjeg trenja dolazi pri pomeranju od oko $\Delta l = 50$ mm. S obzirom da su vrednosti mobilisanih uglova unutrašnjeg trenja dobijeni pri maksimalnim veličinama horizontalnih pomeranja $\Delta l = 100$ mm, moglo bi se zaključiti da do najvećeg povećanja ugla unutrašnjeg trenja dolazi pri srednjim vrednostima horizontalnih pomeranja.

Slično kao i kod kohezije, i na mobilisane vrednosti ugla unutrašnjeg trenja, značajan uticaj ima orijentacija armirajućih čestica, što se može videti sa dijagrama prikazanih na Slici 6.99 (Rakić i dr. 2011c). I u ovom slučaju jasno je izražen porast mobilisanog ugla unutrašnjeg trenja sa porastom horizontalnih pomeranja, za sve uzorke iz ove serije.

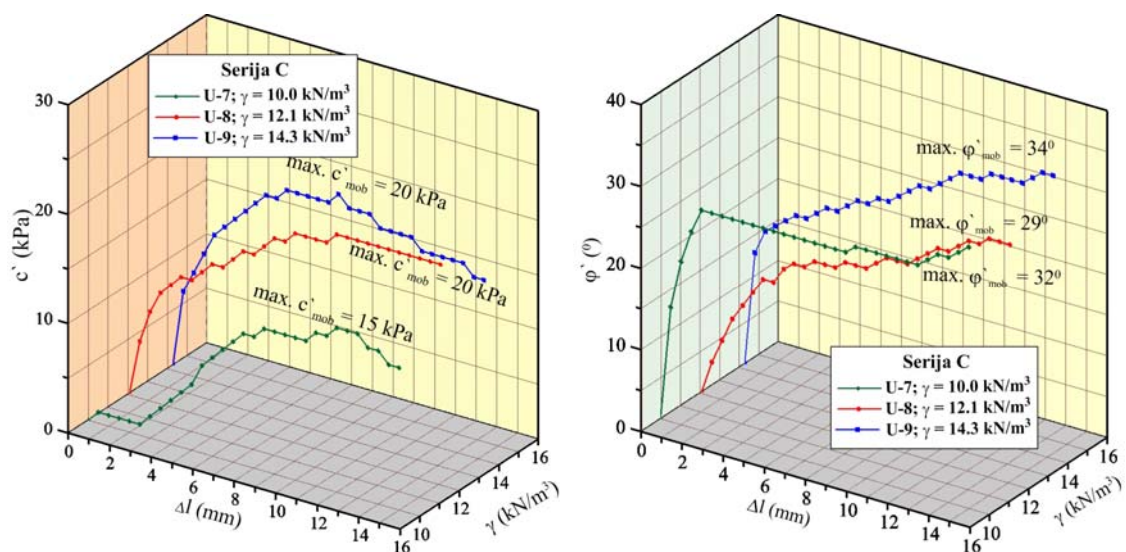
Radi lakšeg sagledavanja uticaja zapreminske težine na promenu kohezije i ugla unutrašnjeg trenja, u zavisnosti od smičućih pomeranja, dat je prikaz i na trodimenzionalnim dijagramima (Slike 6.101 – 6.104). Uprkos rasipanju rezultata, mogu se ustanoviti i određene tendencije. Za sve ispitane uzorke, pri malim horizontalnim pomeranjima, uspostavljena je opšta tendencija rasta i kohezije i ugla unutrašnjeg trenja. Pri većim smičućim pomeranjima, kohezija se značajno smanjuje, da bi u zoni velikih pomeranja uglavnom zadržala konstantnu vrednost.



Slika 6.101 Zavisnost kohezije i ugla unutrašnjeg trenja od smičućih pomeranja i zapreminske težine – serija A



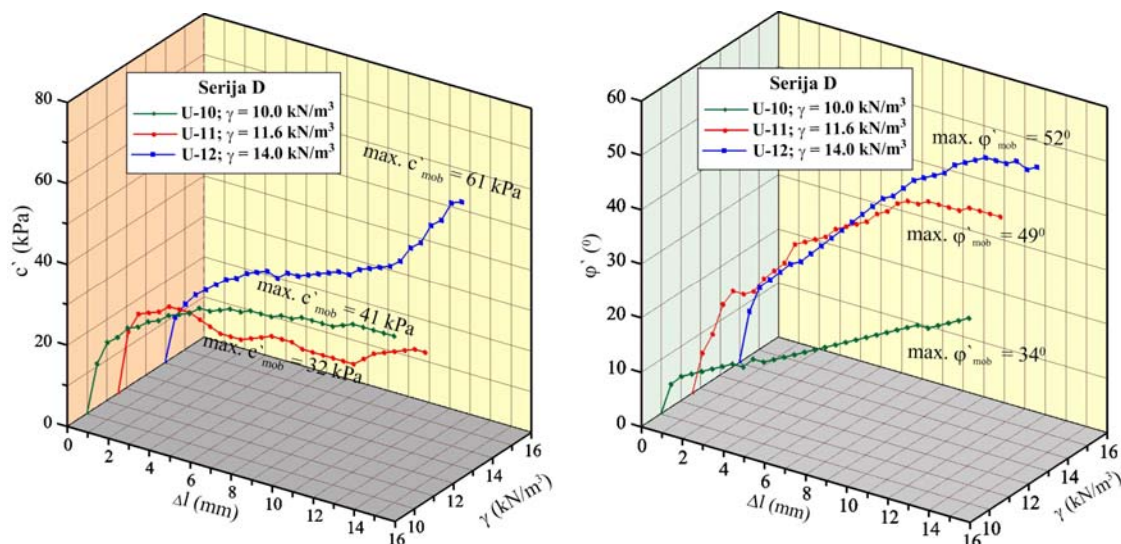
Slika 6.102 Zavisnost kohezije i ugla unutrašnjeg trenja od smičućih pomeranja i zapreminske težine – serija B



Slika 6.103 Zavisnost kohezije i ugla unutrašnjeg trenja od smičućih pomeranja i zapreminske težine – serija C

Ugao unutrašnjeg trenja se uglavnom povećava do postizanja određene vrednosti za koju bi se moglo reći da je približno konstantna (oblik funkcionalne zavisnosti najbliži je pravougljoj hiperboli). Ovo se odnosi na uzorak sa orijentacijom armirajućih čestica koje su paralelne ravni smicanja. Međutim, kod uzoraka sa orijentacijom armirajućih čestica koje su približno upravna na ravan smicanja, može se

zapaziti da je sa porastom horizontalnih smičućih pomeranja, izražen porast i kohezije i ugla unutrašnjeg trenja.



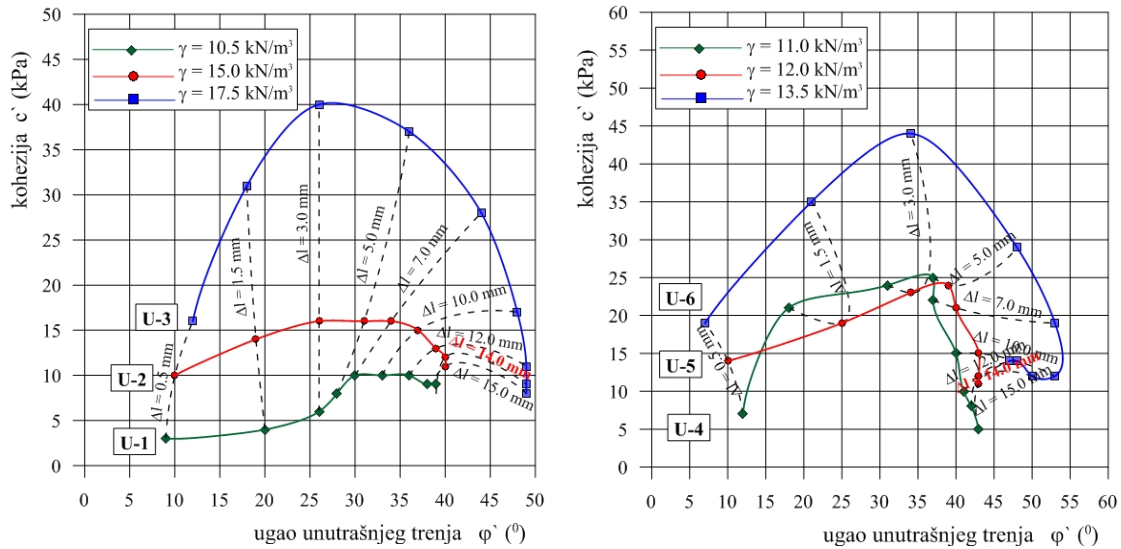
Slika 6.104 Zavisnost kohezije i ugla unutrašnjeg trenja od smičućih pomeranja i zapreminske težine – serija D

Odnosi između parametara čvrstoće smicanja (kohezije c' i ugla unutrašnjeg trenja ϕ'), koji su dobijeni za iste vrednosti pomeranja, prikazani su na Slikama 6.105 i 6.106. Rezultati laboratorijskih ispitivanja pokazuju da za usvojenu vrednost horizontalnih pomeranja $\Delta l = 14$ mm (usvojeno pomeranje za kriterijum loma), mobilisana vrednost ugla unutrašnjeg trenja je preko 30° (najčešće oko 40°). Iako je značajno izražena promena kohezije u zavisnosti od pomeranja, za usvojenu vrednost horizontalnog pomeranja $\Delta l = 14$ mm, ona iznosi od $10 - 15$ kN/m². Kod uzoraka iz serije D, kohezija i ugao unutrašnjeg trenja znatno su veći, u odnosu na uzorke iz ostalih ispitanih serija – A, B i C.

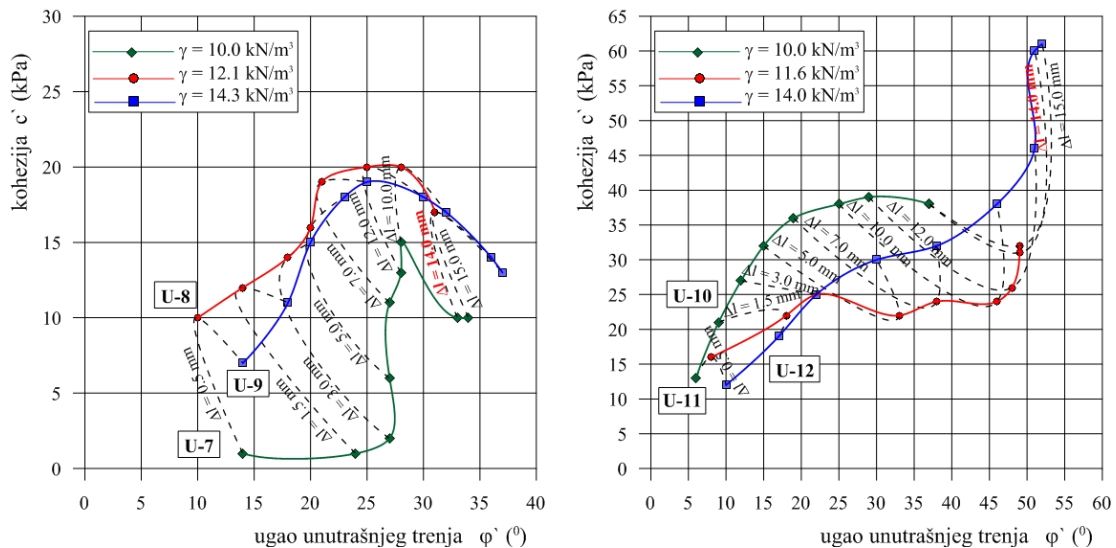
6.6.1.2. Krivolinijski oblik jednačine čvrstoće smicanja

Zavisnosti prikazane jednačinama 6.1 – 6.5 predstavljaju najjednostavniju aproksimaciju napona pri lomu, koji je u stvarnosti predstavljen složenim mehanizmom interakcije između zrna različitih veličina, oblika pa i sastava. Kod nevezanih materijala ove veze su nešto jednostavnije, s obzirom da oni nemaju koheziju, a uloga pornog

pritiska se uglavnom ne manifestuje, pa se može reći da je ukupno naponsko stanje jednako efektivnom. U tom slučaju, s obzirom da je kohezija $c' = 0$, čvrstoća smicanja se može definisati preko ugla unutrašnjeg trenja. Međutim, u literaturi se u poslednje vreme sve češće koristi krivolinijska-nelinearna anvelopa loma (Slika 6.107).



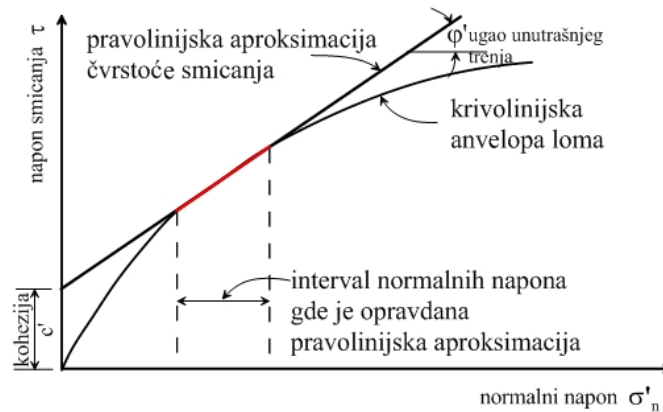
Slika 6.105 Zavisnost između kohezije i ugla unutrašnjeg trenja za karakteristična pomeranja – serije A i B



Slika 6.106 Zavisnost između kohezije i ugla unutrašnjeg trenja za karakteristična pomeranja – serije C i D

Da bi se smičuća čvrstoća predstavila u funkcionalnom obliku, odnosno krivolinijskom funkcionalnom obliku anvelope loma, zavisnost bi trebalo da zadovolji sledeće uslove (Maksimović, 1979, 1988):

- da bude primenljiva u širokom intervalu realnog naponskog stanja
- da bude primenljiva za sve vrste tla ili bar za većinu tipova tla
- da bude matematički što jednostavnija
- da sadrži što manji broj parametara i da oni imaju jasno fizičko značenje
- izraz treba da je u skladu sa prihvaćenim osnovnim konceptima postojećih teorija



Slika 6.107 Matematički oblici anvelope loma

U literaturi postoji niz predloga za analitički opis krivolinijske anvelope loma, koji se uopšteno mogu podeliti na izraze eksponencijalnog, paraboličnog, logaritamskog i hiperboličkog oblika. U nastavku teksta će se interpretacija rezultata ispitivanja izvršiti korišćenjem logaritamskog i hiperboličkog oblika anvelope loma.

6.6.1.2.1 Interpretacija rezultata ispitivanja primenom anvelope loma logaritamskog oblika

Smičuća čvrstoća granularnih materijala, izražena preko efektivnih napona, može se opisati Kulon-Mor-Tercagijevom jednačinom

$$\tau_f = \sigma'_n \cdot \tan \varphi' \quad (6.6)$$

Ugao unutrašnjeg trenja iz prethodne jednačine, može se izračunati na sledeći način

$$\tau_f = \sigma'_n \cdot \tan \varphi' \Rightarrow \varphi' = \arctan \left(\frac{\tau_f}{\sigma'_n} \right) \quad (6.7)$$

Ukoliko postoji kohezija, onda je ugao unutrašnjeg trenja jednak

$$\tau_f = c' + \sigma'_n \cdot \tan \varphi' \Rightarrow \varphi' = \arctan \left(\frac{\tau_f - c'}{\sigma'_n} \right) \quad (6.8)$$

Ove pravolinijske zavisnosti jednačine čvrstoće smicanja, prvi su u logaritamskom obliku, prikazali Nobari i Duncan (1972) za određivanje čvrstoće smicanja kamenog nabačaja. Tridesetak godina kasnije su Duncan i Wright (2005) predložili njegovo korišćenje i kod određivanja čvrstoće smicanja granularnih materijala, u sledećem obliku

$$\begin{aligned} \tau_f &= c' + \sigma'_n \cdot \tan \varphi' \\ \varphi' &= \varphi'_0 - \Delta\varphi' \log \frac{\sigma'_3}{p_a} \end{aligned} \quad (6.9)$$

Pri analizi rezultata opita direktnog smicanja, umesto manjeg glavnog napona σ'_3 , koristi se efektivni normalni napon, pa se zavisnost ugla unutrašnjeg trenja od normalnog napona σ'_n može napisati i u sledećem obliku

$$\varphi' = \varphi'_0 - \Delta\varphi' \log \frac{\sigma'_n}{p_a} \quad (6.10)$$

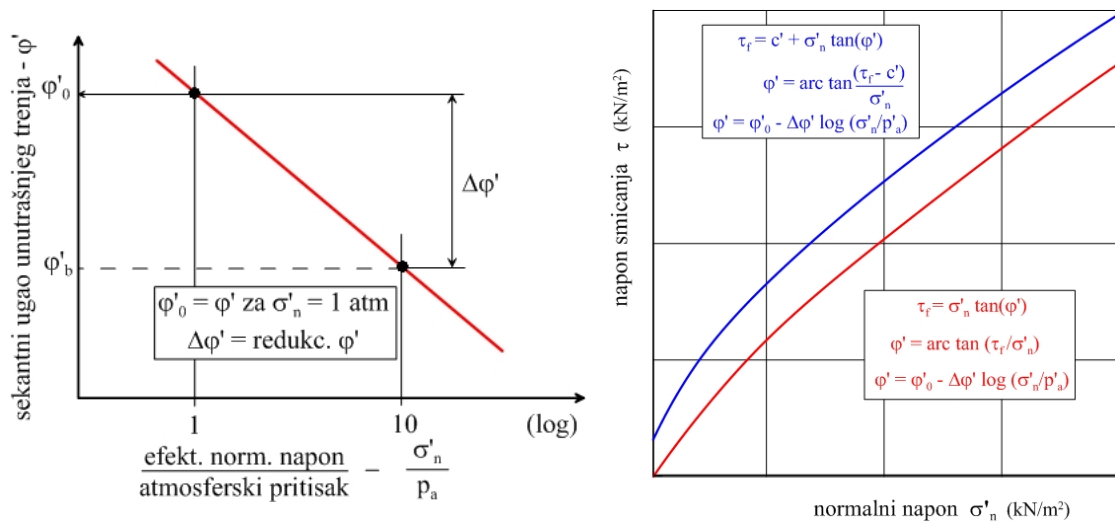
gde je:

φ' – ugao unutrašnjeg trenja za sekantni efektivni napon,

φ'_0 – vrednost ugla unutrašnjeg trenja za $\sigma'_n = p_a$, pri čemu je p_a atmosferski pritisak (101.3 kPa),

$\Delta\varphi'$ – promena ugla unutrašnjeg trenja za jedan logaritamski ciklus promene napona σ'_n .

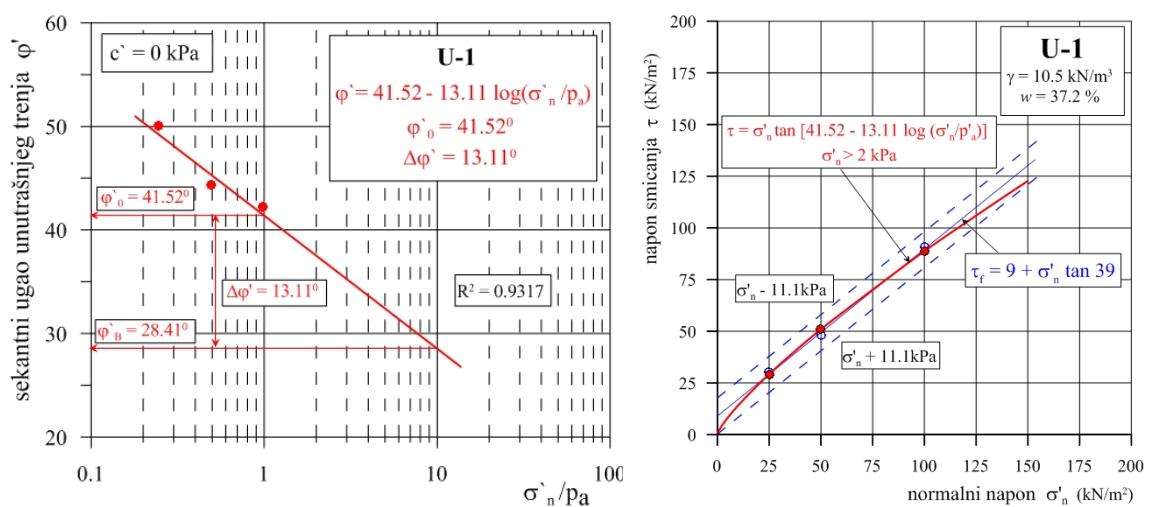
Primena ovog krivolinijskog kriterijuma loma logaritamskog oblika, kod koga je izražen efekat normalnog napona, ilustrovana je na Slici 6.108.

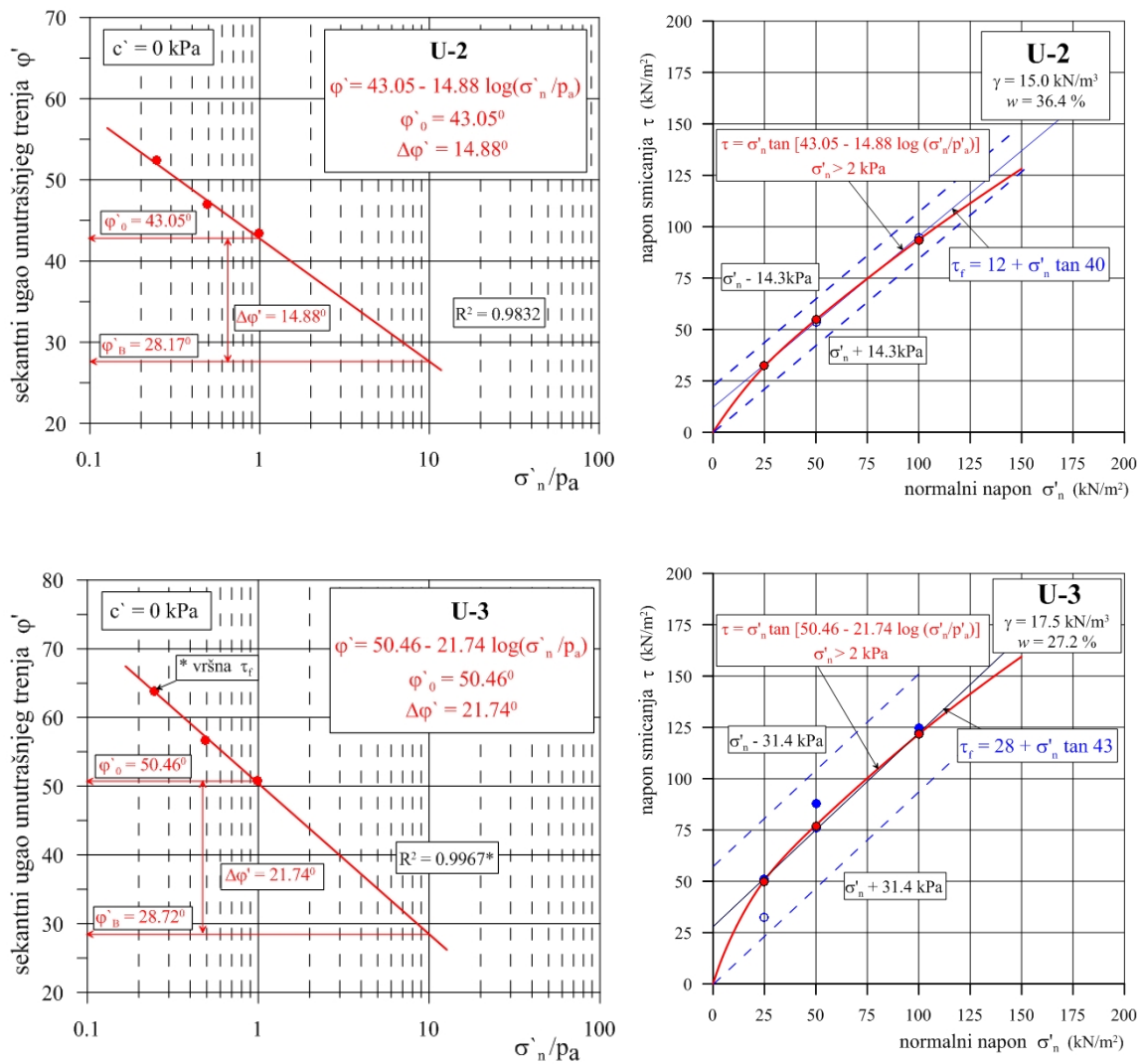


Slika 6.108 Ilustracija primene krivolinijske anvelope loma logaritamskog oblika (Duncan i Wright, 2005)

Polazeći od istog kriterijuma koji sam primenio i kod interpretacije parametara čvrstoće smicanja pomoću Kulon-Mor-Tercagijevog uslova loma, gde je za lom usvojen napon smicanja za smičuće pomeranje $\Delta l = 14 \text{ mm}$, za sve serije izvršenih ispitivanja i za odgovarajuće normalne napone, odredio sam vrednosti ugla unutrašnjeg trenja φ' . Nakon toga izvršio sam interpretaciju rezultata i odredio vrednosti φ'_0 , φ'_b i $\Delta\varphi'$. Analize su prvo urađene za slučaj da otpad nema koheziju ($c' = 0 \text{ kPa}$).

Rezultati izvršenih analiza na uzorcima iz serije A, prikazani su na Slici 6.109.



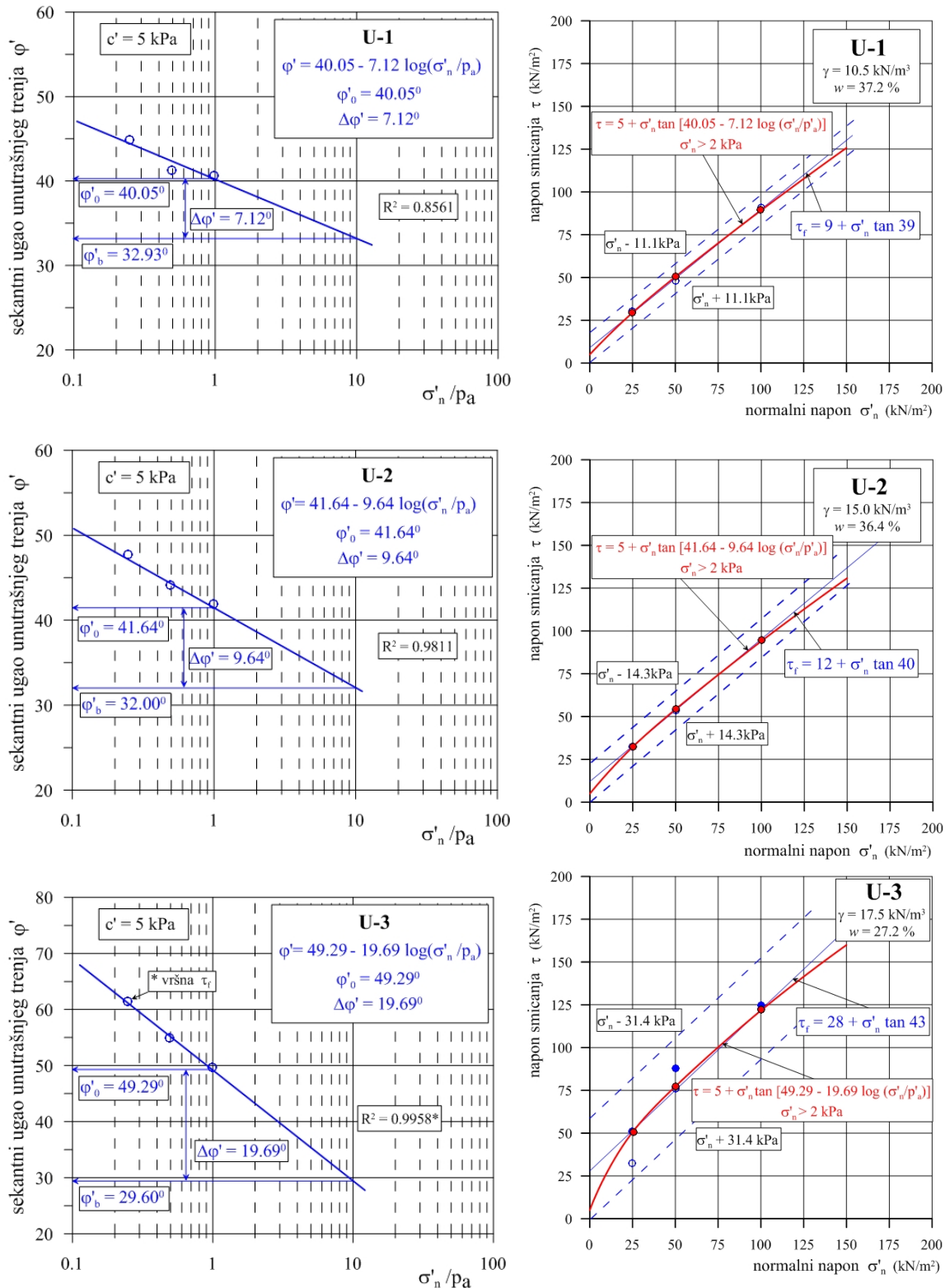


Slika 6.109 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma logaritamskog oblika (uzorci iz serije A, $c' = 0 \text{ kPa}$)

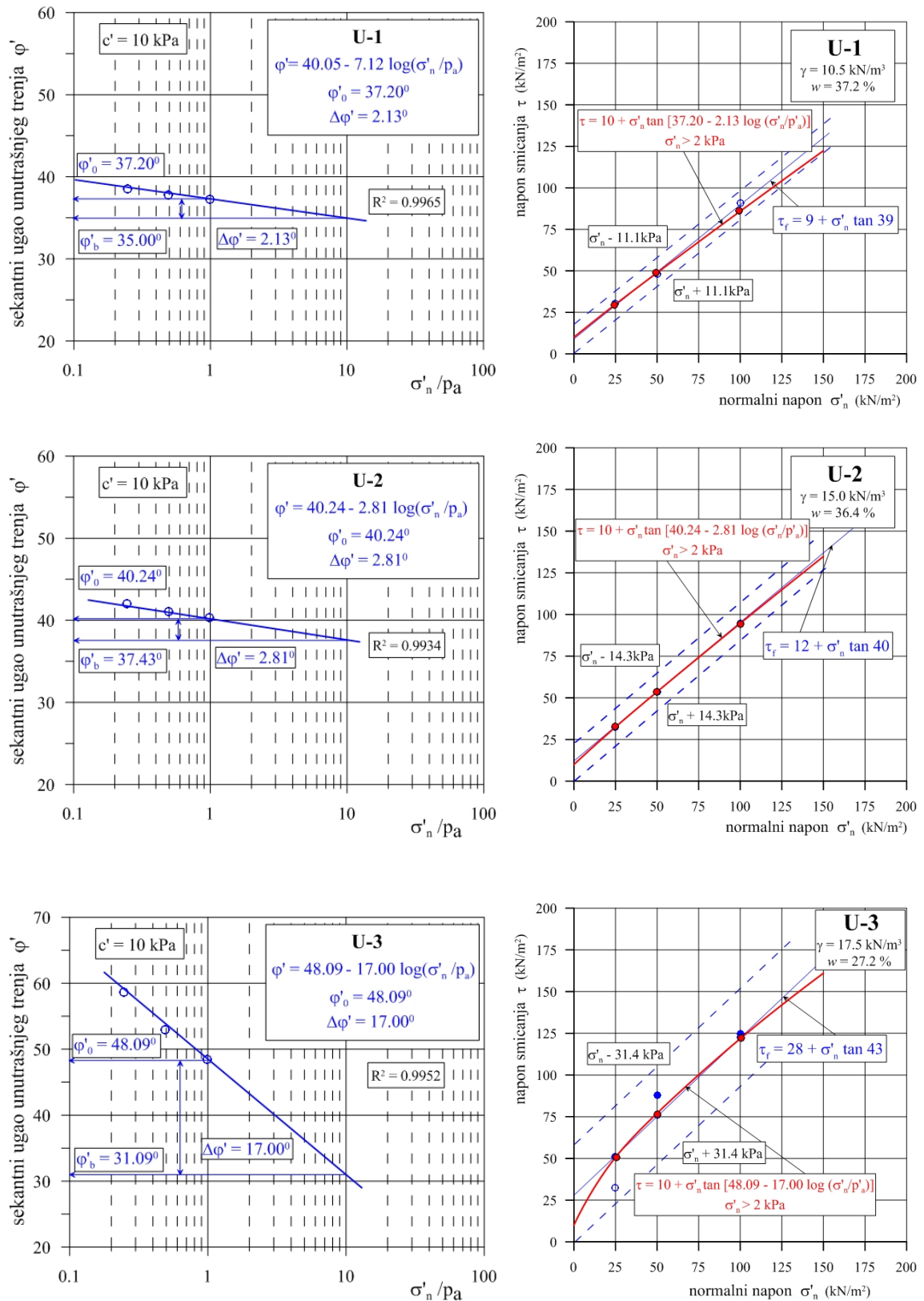
Očigledno da su veća odstupanja izražena kod uzoraka kod kojih je vršna čvrstoća bila znatno veća od mobilisane čvrstoće za pomeranje od 14 mm (uzorak U-3).

Za serije uzoraka A, B i C, analiza je sprovedena i sa vrednostima kohezije od $c' = 5 \text{ kPa}$ i $c' = 10 \text{ kPa}$.

Rezultati izvršenih analiza na uzorcima iz serije A, gde je u obzir uzeta i kohezija, prikazani su na Slikama 6.110 i 6.111.

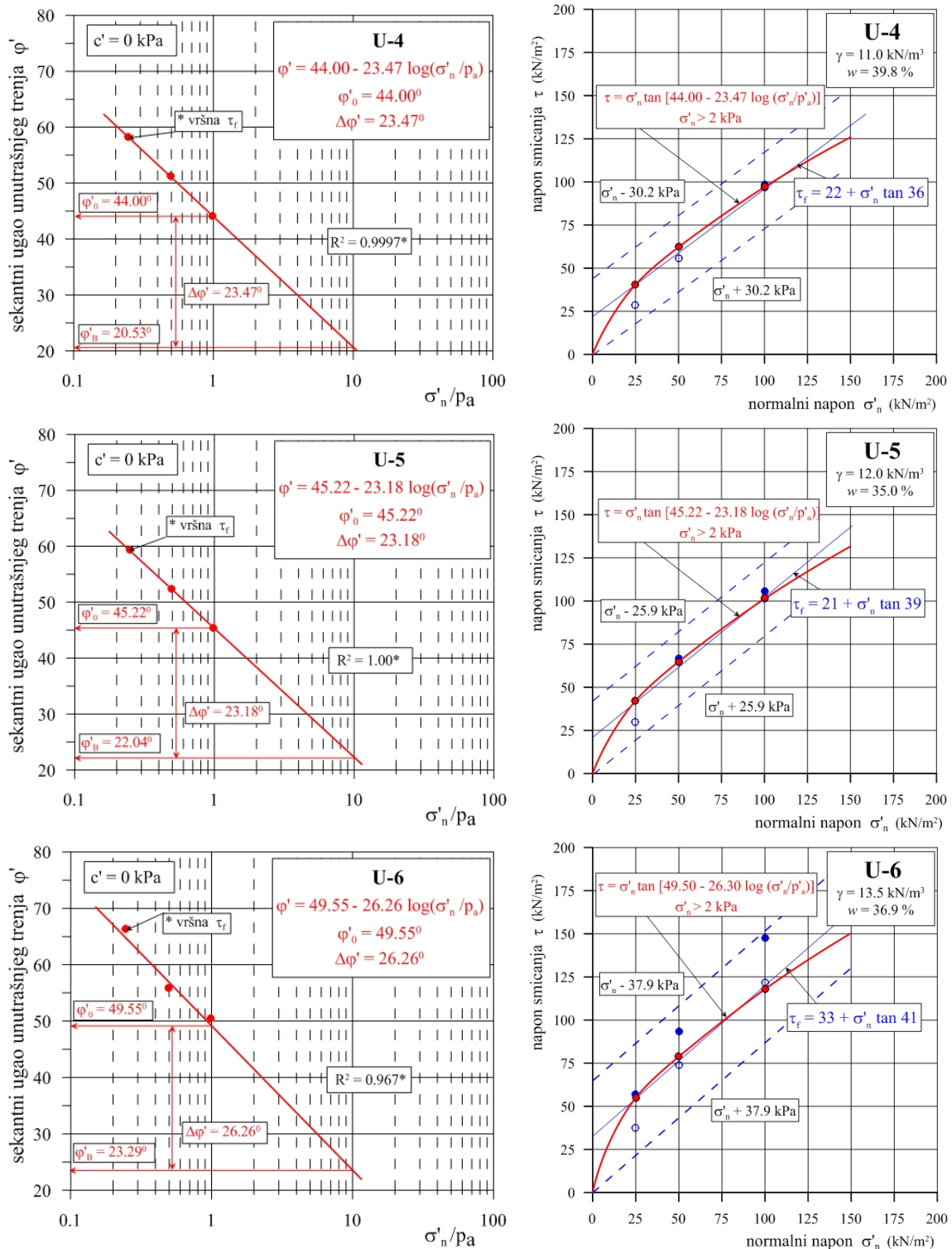


Slika 6.110 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma logaritamskog oblika (uzorci iz serije A, $c' = 5 \text{ kPa}$)

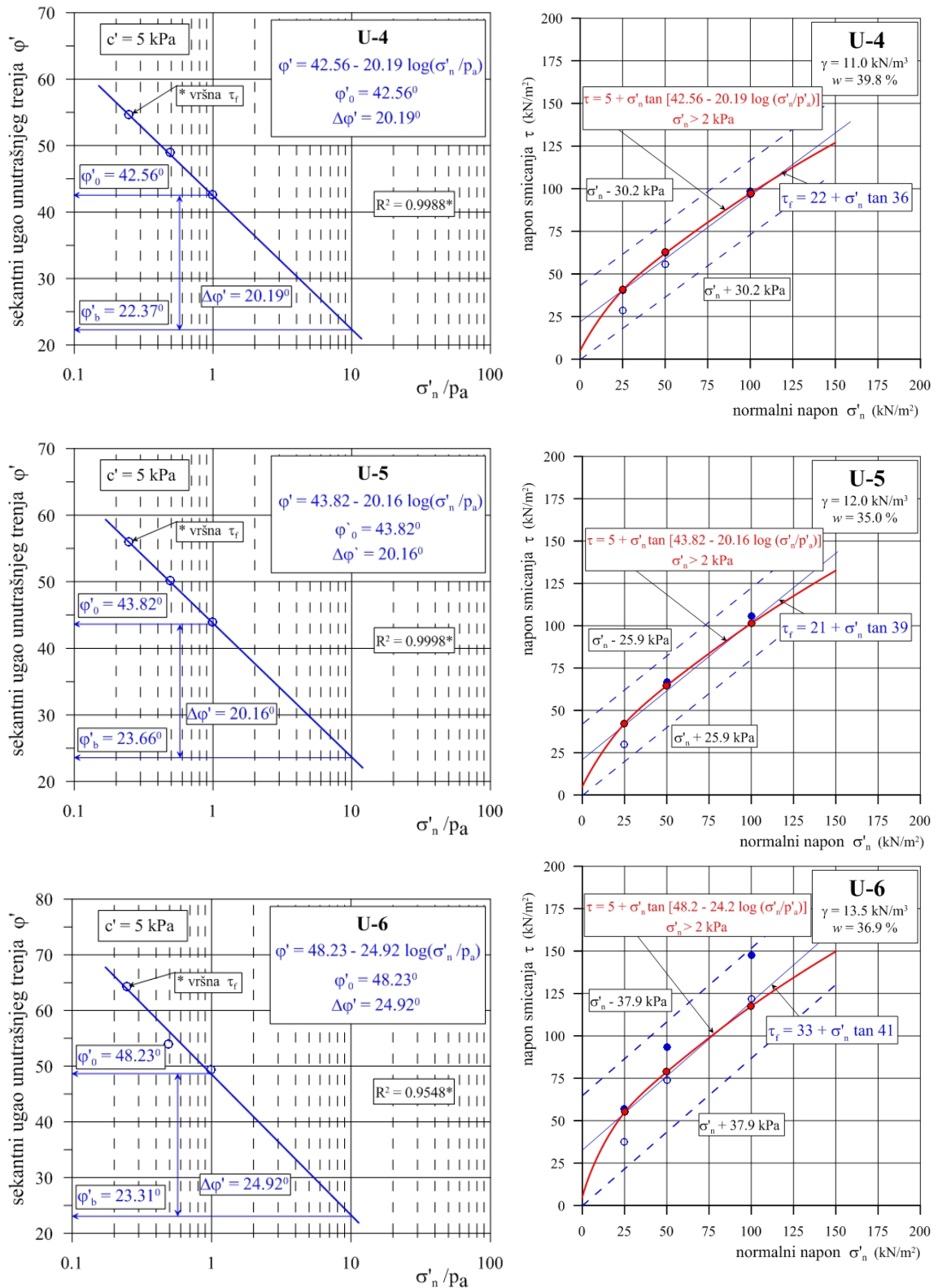


Slika 6.111 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma logaritamskog oblika (uzorci iz serije A, $c' = 10$ kPa)

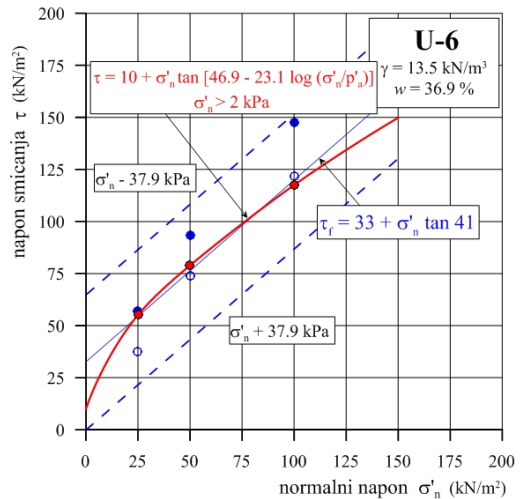
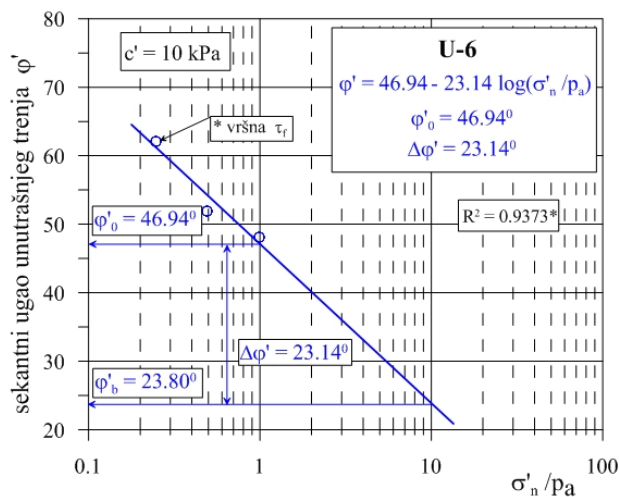
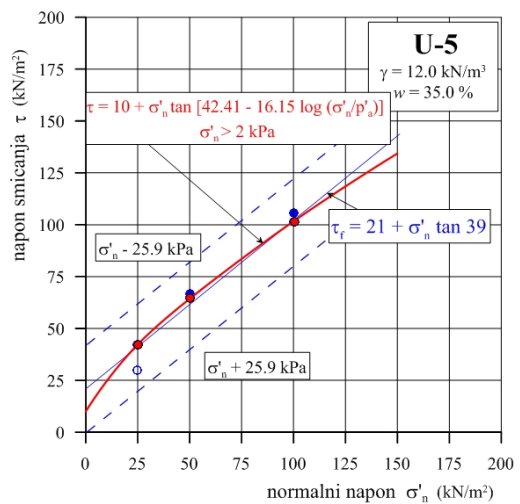
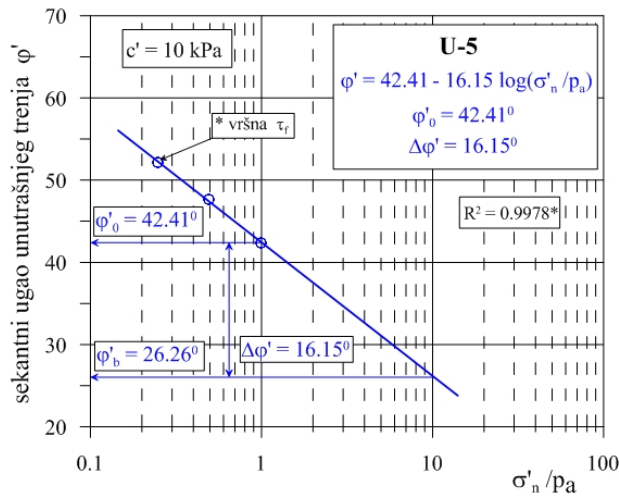
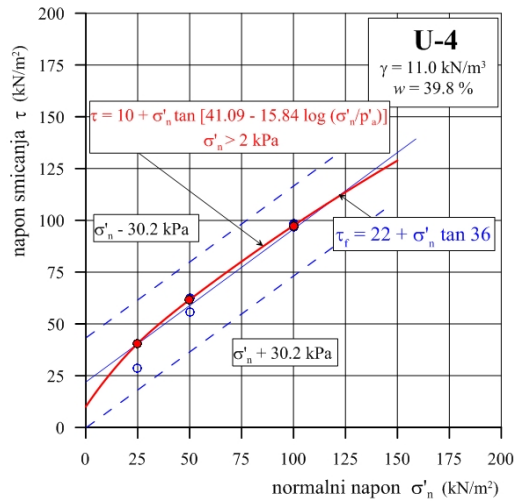
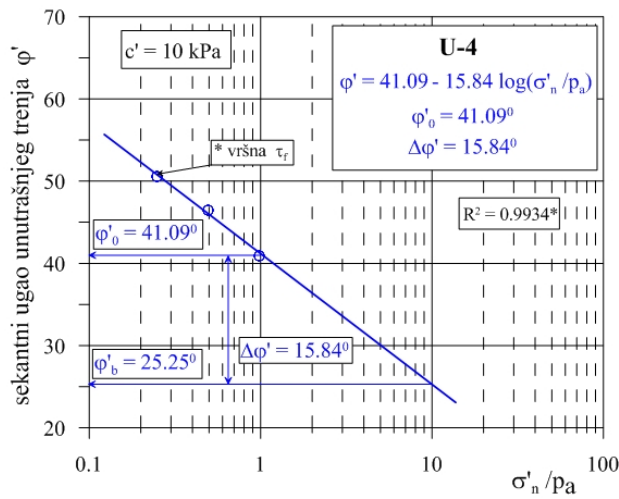
Rezultati izvršenih analiza na uzorcima iz serije B, prikazani su na Slikama 6.112 do 6.114.



Slika 6.112 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma logaritamskog oblika (uzorci iz serije B, $c' = 0$ kPa)

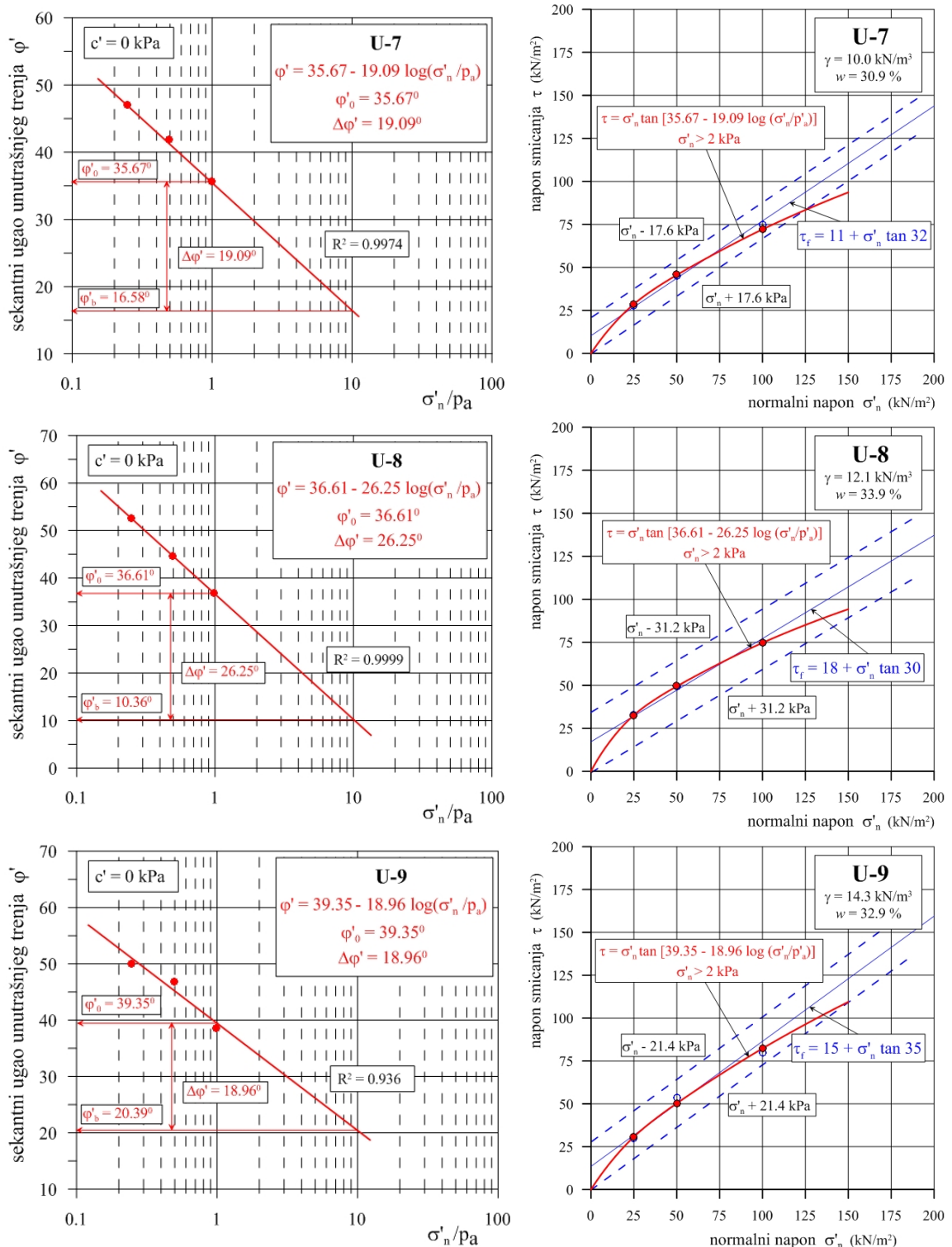


Slika 6.113 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma logaritamskog oblika (uzorci iz serije B, $c' = 5 \text{ kPa}$)

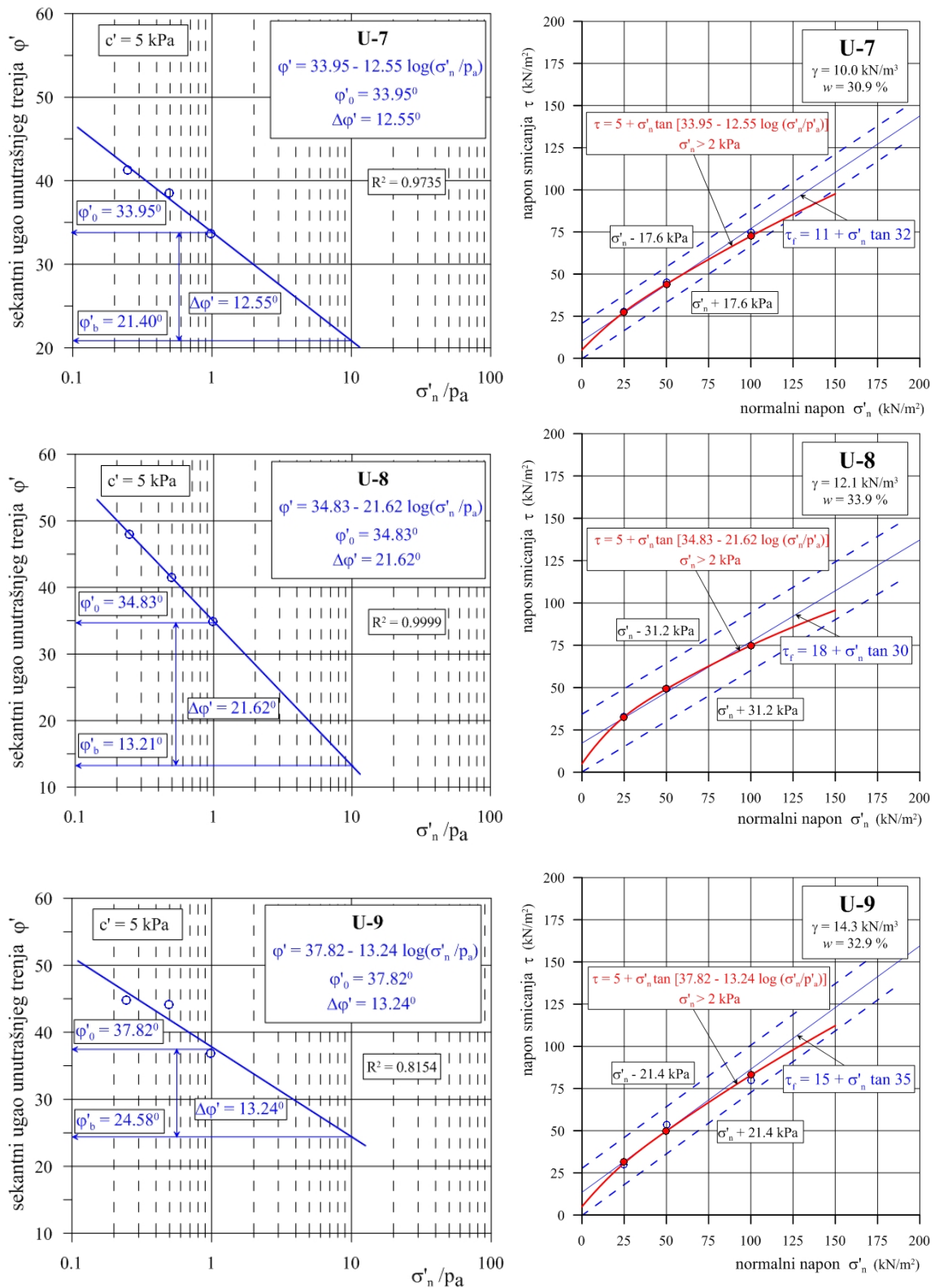


Slika 6.114 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma logaritamskog oblika (uzorci iz serije B, $c' = 10 \text{ kPa}$)

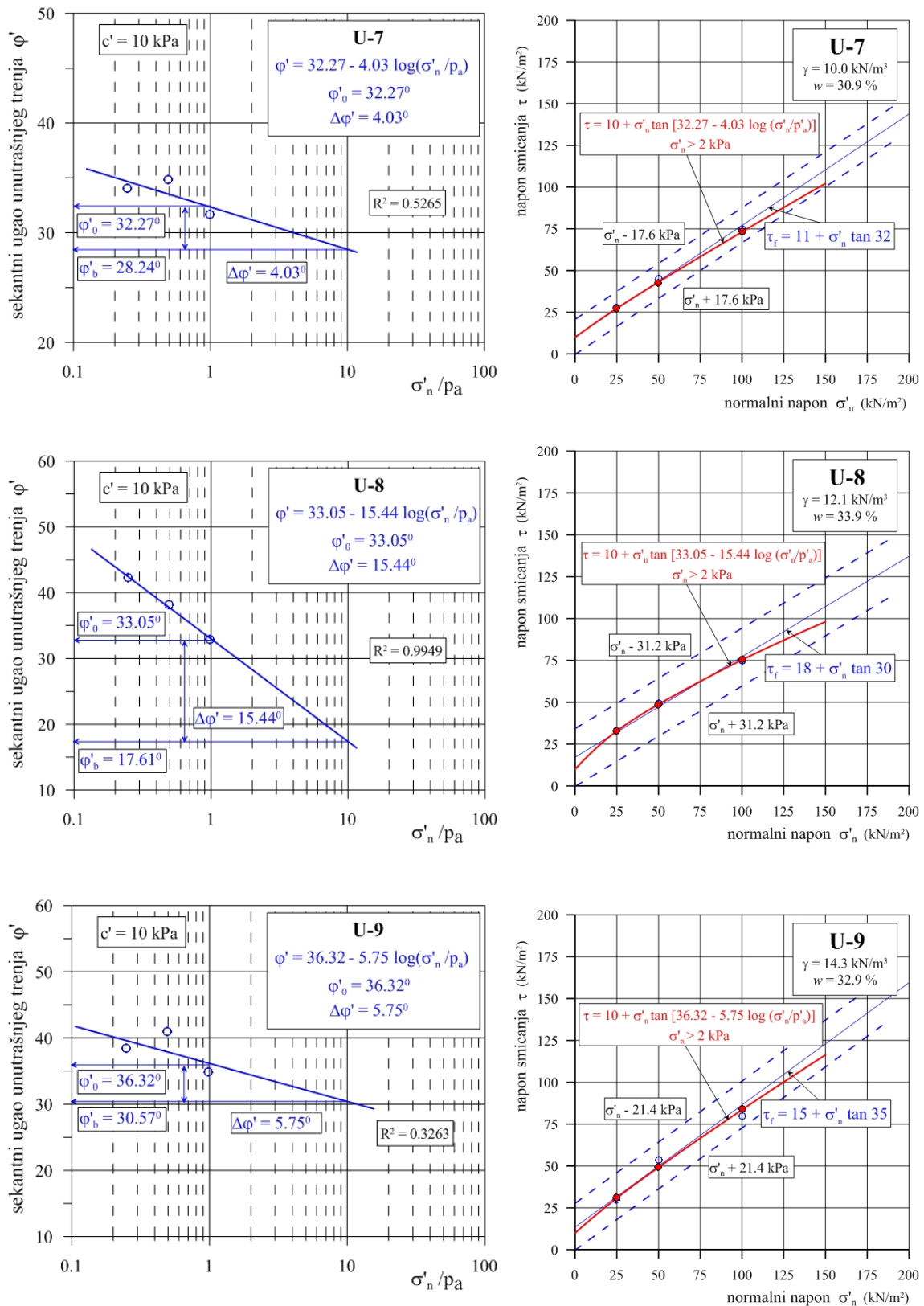
Rezultati izvršenih analiza na uzorcima iz serije C, prikazani su na Slikama 6.115 do 6.117.



Slika 6.115 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma logaritamskog oblika (uzorci iz serije C, $c' = 0$ kPa)

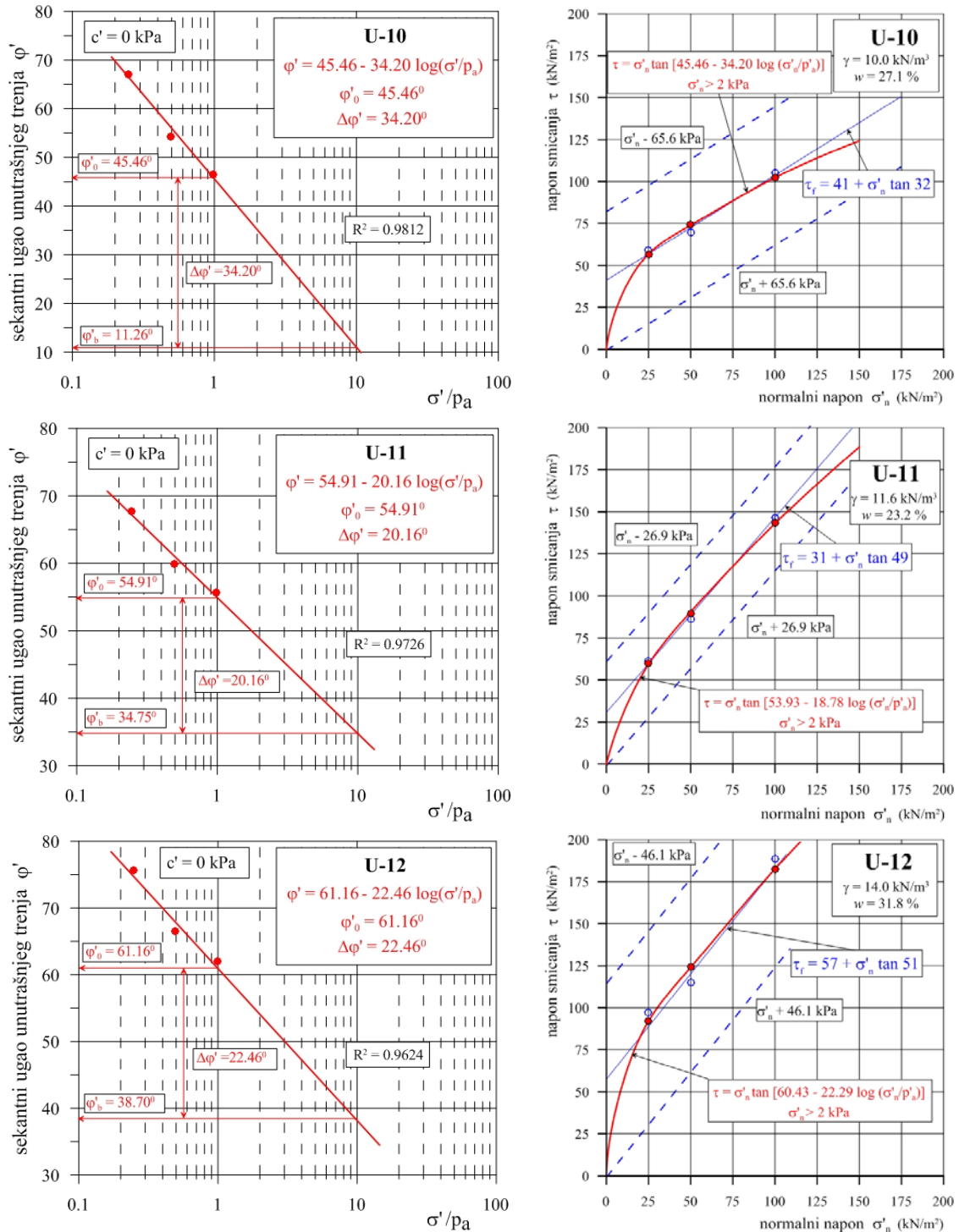


Slika 6.116 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma logaritamskog oblika (uzorci iz serije C, $c' = 5 \text{ kPa}$)

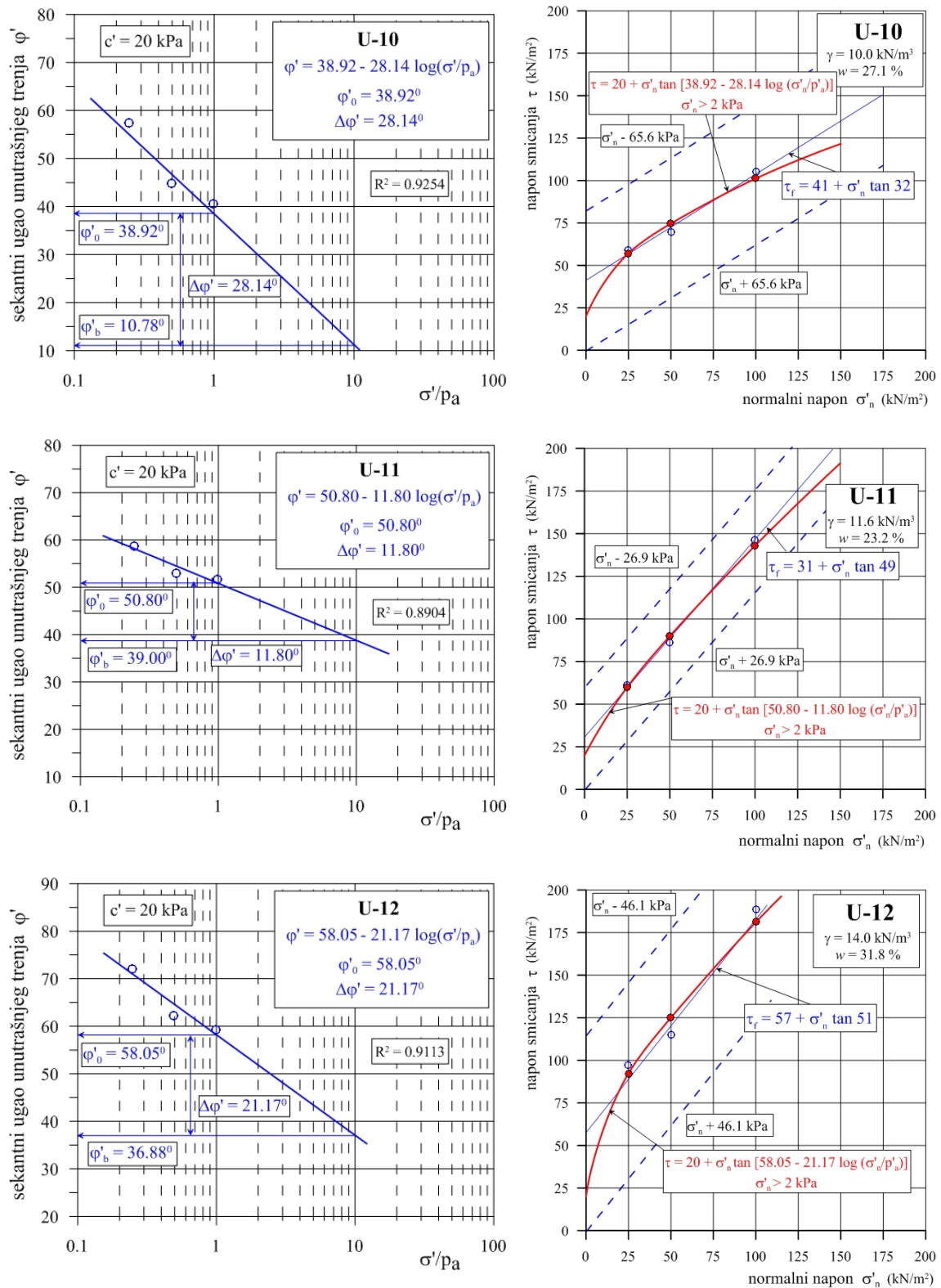


Slika 6.117 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma logaritamskog oblika (uzorci iz serije C, $c' = 10$ kPa)

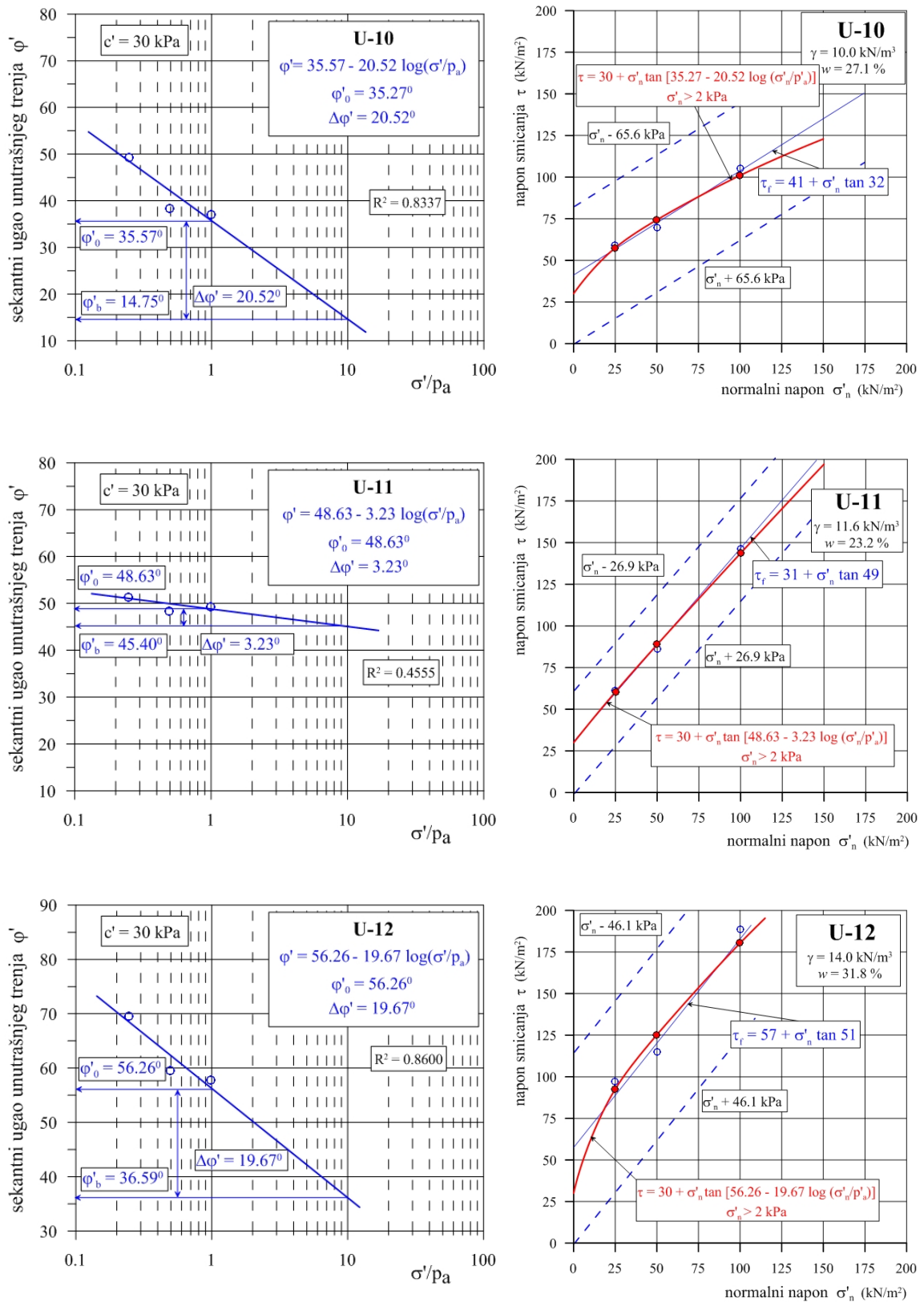
Na osnovu Kulon-Mor-Tercagijeveg uslova loma, kohezija za uzorke iz serije D iznosila je preko 30 kPa, pa je zato analiza sprovedena za slučaj da otpad nema koheziju, ali i sa vrednostima kohezije $c' = 20$ kPa i $c' = 30$ kPa. Rezultati izvršenih analiza, na uzorcima iz serije D, prikazani su na Slikama 6.118 do 6.120.



Slika 6.118 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma logaritamskog oblika (uzorci iz serije D, $c' = 0$ kPa)

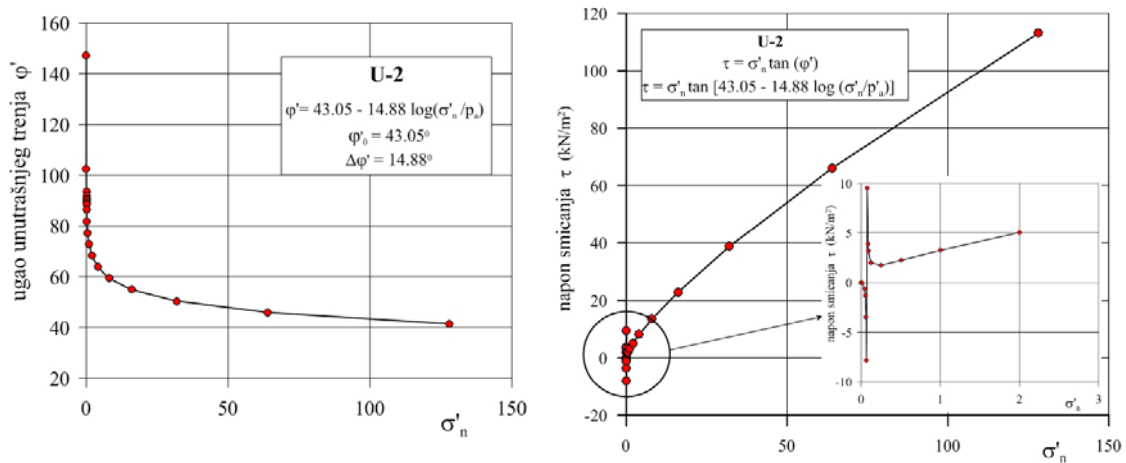


Slika 6.119 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma logaritamskog oblika (uzorci iz serije D, $c' = 20$ kPa)

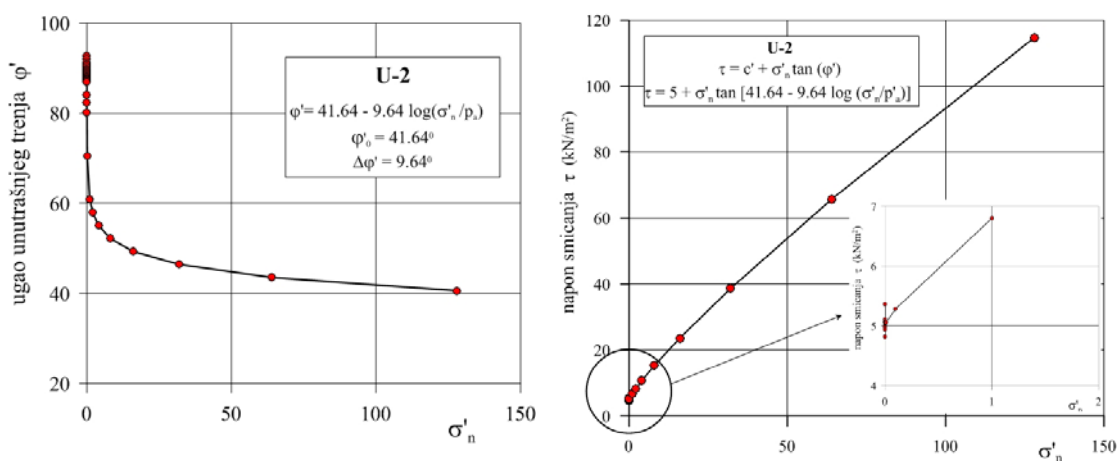


Slika 6.120 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma logaritamskog oblika (uzorci iz serije D, $c' = 30$ kPa)

Kao što se može videti na svim Slikama od 6.109 do 6.120, naznačeno je da normalni napon σ'_n treba da je veći od 2 kPa. Razlog za to je logaritamska funkcija normalnog napona koja je neprekidno rastuća, a nije definisana u nuli. Zato krivolinijska anvelopa loma, dobijena na ovaj način, ne može da važi za čitav interval normalnih napona od nule do beskonačnosti. Naime, logaritamska funkcija ima vertikalnu asimptotu u 0, pa se za veoma male vrednosti normalnih napona, dobijaju nerealno visoke vrednosti ugla unutrašnjeg trenja, koji za materijale bez kohezije, daju negativne napone smicanja. Ovo je prikazano na Slikama 6.121 i 6.122 samo za jedan uzorak (U-2) i to za slučaj sa kohezijom i bez nje.



Slika 6.121 Prikaz logaritamske funkcije za interval malih normalnih napona ($c' = 0$ kPa)



Slika 6.122 Prikaz logaritamske funkcije za interval malih normalnih napona ($c' = 5$ kPa)

6.6.1.2.2. Interpretacija rezultata ispitivanja primenom anvelope loma hiperboličkog oblika

Krivolinijska anvelopa loma se može definisati i preko funkcije hiperboličkog oblika (Maksimović, 1989, 1992, 1996). Ona je proizašla iz takozvanog “testerastog modela”, u koji je ugrađen mikro-mehanički model sa nelinearno deformabilnim zupcima. Autor je pošao od stava da nevezani materijali nemaju koheziju, pa se smičuća čvrstoća izražena preko efektivnih napona, može opisati poznatim kriterijumom

$$\tau_f = \sigma'_n \cdot \tan \varphi'_{(\sigma'_n)} \quad (6.11)$$

s tim da sekantni ugao unutrašnjeg trenja $\varphi'_{(\sigma'_n)}$ uključuje i doprinos dilatancije i jednak je zbiru

$$\varphi'_{(\sigma'_n)} = \varphi'_b + \delta\varphi'_{(\sigma'_n)} \quad (6.12)$$

Kao što se iz izraza 6.11 vidi, sekantni ugao unutrašnjeg trenja $\varphi'_{(\sigma'_n)}$ je funkcija normalnog efektivnog napona (σ'_n) koji u izrazu 6.12 sadrži drugi sabirak i to kao:

$$\delta\varphi'_{(\sigma'_n)} = \frac{\Delta\varphi'}{1 + \sigma'_n/p_N} \quad (6.13)$$

tako da se promena efektivnog sekantnog ugla smičuće čvrstoće može izraziti u funkciji od normalnog napona u sledećem obliku

$$\varphi' = \varphi'_b + \frac{\Delta\varphi'}{1 + \sigma'_n/p_N} \quad (6.14)$$

a kako je opšti izraz za smičuću čvrstoću $\tau_f = \sigma'_n \tan \varphi'$, to se τ_f može izraziti i kao

$$\tau_f = \sigma'_n \cdot \tan \left(\varphi'_b + \frac{\Delta\varphi'}{1 + \sigma'_n/p_N} \right) \quad (6.15)$$

gde je

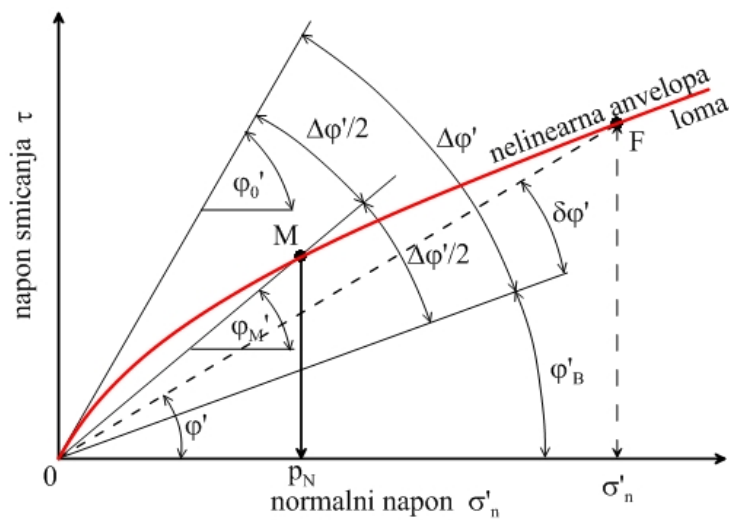
φ'_b – bazni ugao trenja

$\Delta\varphi'$ – maksimalna ugaona razlika $\varphi'_0 - \varphi'_b$ (doprinos maksimalne dilatancije)

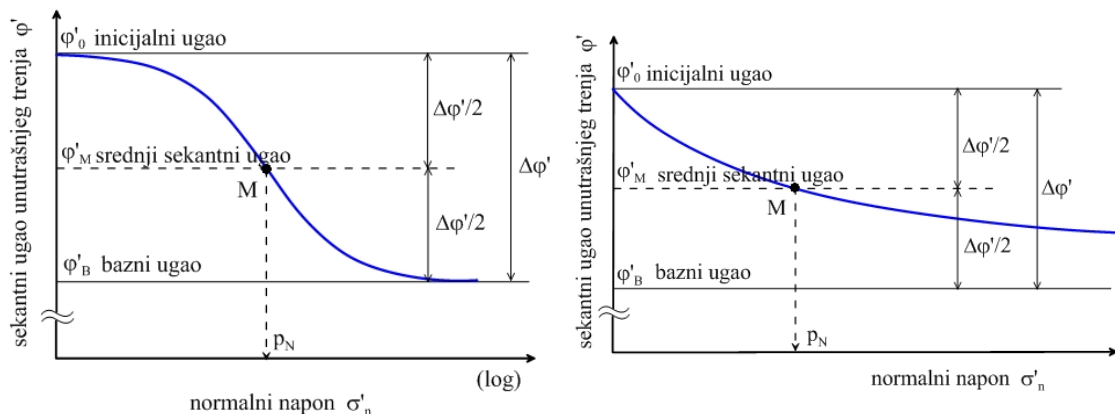
φ'_0 – inicijalni sekantni ugao trenja

p_N – normalni napon srednjeg sekantnog ugla ($\varphi'_0 - \Delta\varphi'/2$ ili $\varphi'_b + \Delta\varphi'/2$)

Geometrijsko značenje parametara, koji figurišu u prethodnim izrazima, relativno je jednostavno i ilustrovano je na Slikama 6.123 i 6.124 linearnim i polulogaritamskim dijagramima.



Slika 6.123 Geometrijski prikaz elemenata krivolinijske anvelope hiperboličkog oblika (Maksimović, 1989, 1992)



Slika 6.124 Načini predstavljanja funkcionalne zavisnosti elemenata krivolinijske anvelope loma hiperboličkog oblika a) $\varphi' = f(\log \sigma'_n)$ b) $\varphi' = f(\sigma'_n)$

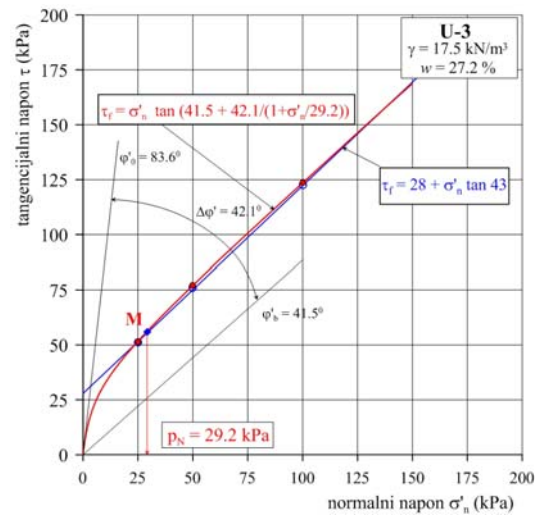
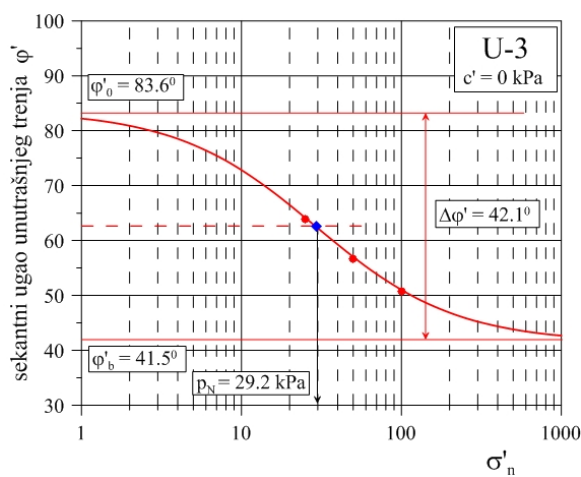
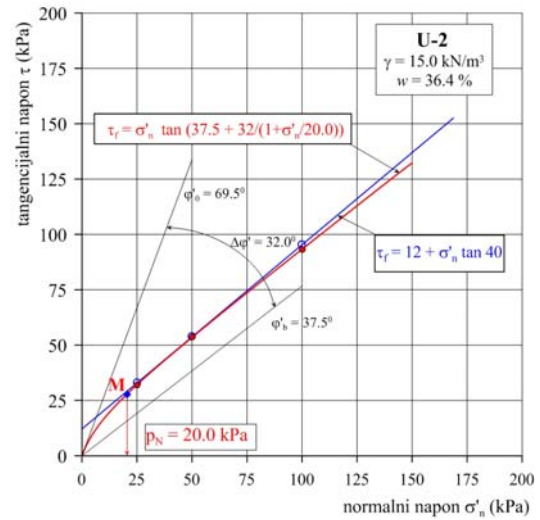
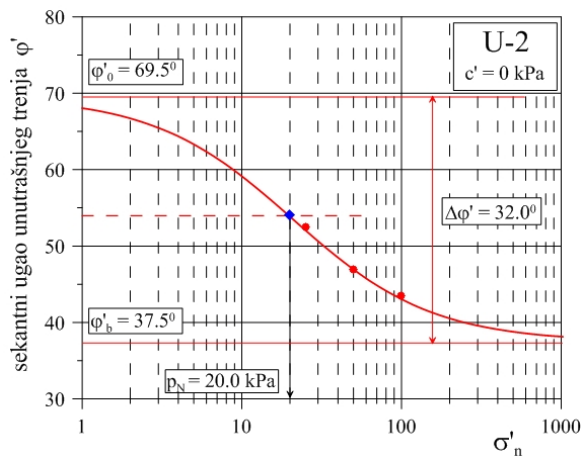
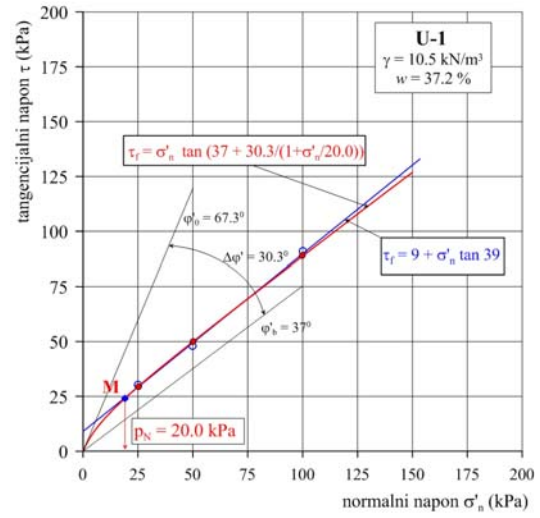
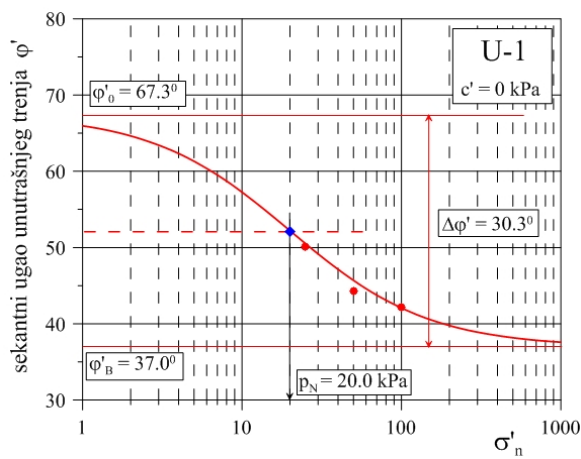
Na osnovu prikazanih dijagrama može se zaključiti da kada $\sigma'_n \rightarrow 0$, tada je sekantni ugao unutrašnjeg trenja definisan nagibom tangente na anvelopu u koordinatnom početku, tj. predstavlja inicijalni sekantni ugao φ'_0 . To znači da inicijalni sekantni ugao unutrašnjeg trenja ima maksimalnu vrednost jednaku zbiru baznog ugla unutrašnjeg trenja (φ'_b) i maksimalnog doprinosa dilatancije ($\Delta\varphi'$). U slučaju da efektivni normalni napon $\sigma'_n \rightarrow \infty$, ugao teži vrednosti baznog ugla unutrašnjeg trenja φ'_b , pa je doprinos dilatancije zanemarljiv.

Bazni ugao unutrašnjeg trenja (φ'_b) se mobilise pri visokim vrednostima normalnih napona kada nema promene zapremine, ali se odvija drobljenje zrna pri smicanju u granularnim sredinama. Ukoliko nema značajnijeg drobljenja zrna, ovaj ugao odražava trenje pri konstantnoj zapremini. On zavisi od oblika zrna koja čine skelet, kao i od hrapavosti površina zrna.

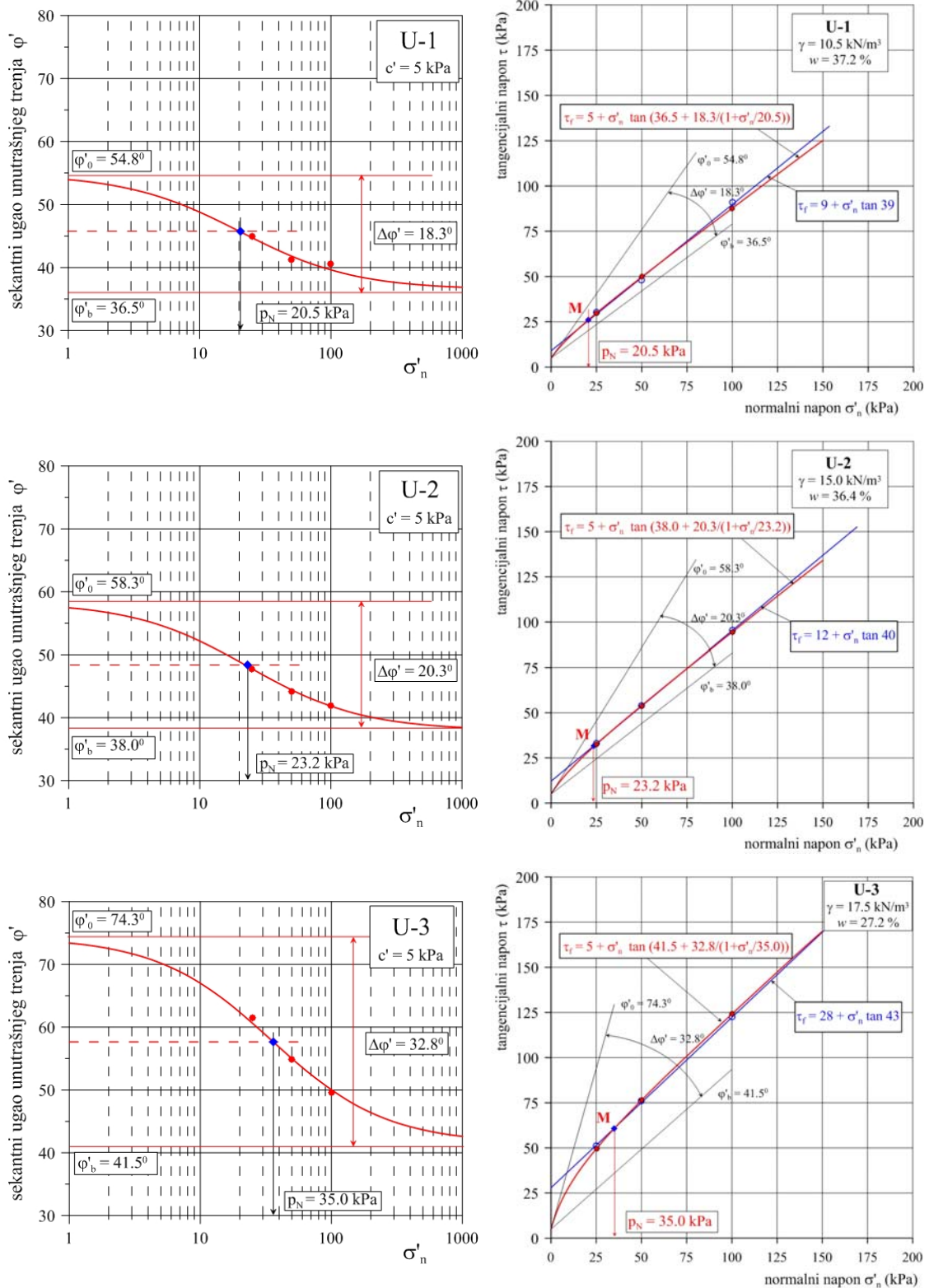
Maksimalna ugaona razlika ($\Delta\varphi'$) se u slučaju tla sa kompaktnim frakcijama može nazvati i maksimalnim doprinosom dilatancije i tada odražava zbijenost, zaobljenost i prateće efekte dilatancije. Kod materijala sa velikim sadržajem ljustastih frakcija, pri velikim deformacijama, izražava nesavršenu orijentaciju zrna u odnosu na ravan smicanja kada normalni napon teži nuli.

Parametar p_N je napon pri kojem je ugao smičuće otpornosti srednja vrednost ugla između φ'_b i φ'_0 , odnosno $\varphi'_M = \varphi'_b + \Delta\varphi'/2$. Simetrala ugla $\Delta\varphi'$ seče anvelopu u tački M u kojoj je normalni napon $\sigma'_n = p_N$. Normalni napon srednjeg sekantnog ugla (p_N) odražava stišljivost skeleta, čvrstoću zrna ili otpor zrna i skeleta protiv drobljenja, što zavisi od vrste i oblika čestica, zbijenosti i granulometrijske kompozicije. Na Slici 6.124 a, može se videti da se u relativno širokoj okolini tačke M, kriva ne razlukje mnogo od prave linije, tako da podseća na krivolinijsku anvelopu loma logaritamskog oblika.

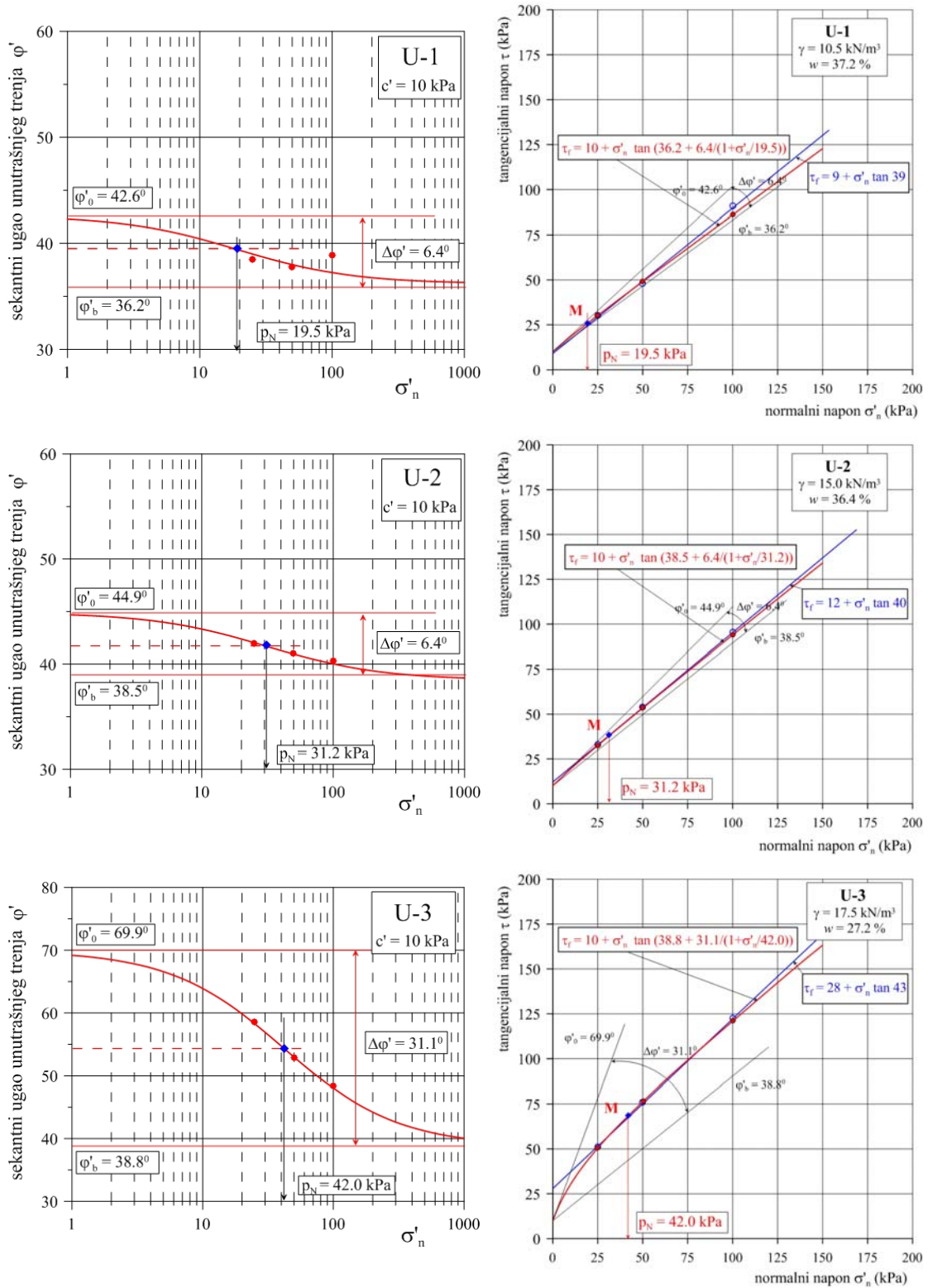
Za ovako prikazivanje krivolinijske anvelope loma mogu se iskoristiti i rezultati opita direktnog smicanja. Rezultati izvršenih analiza na uzorcima iz serije A, prikazani su na Slikama 6.125 do 6.127.



Slika 6.125 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma hiperboličkog oblika (uzorci iz serije A, $c' = 0 \text{ kPa}$)

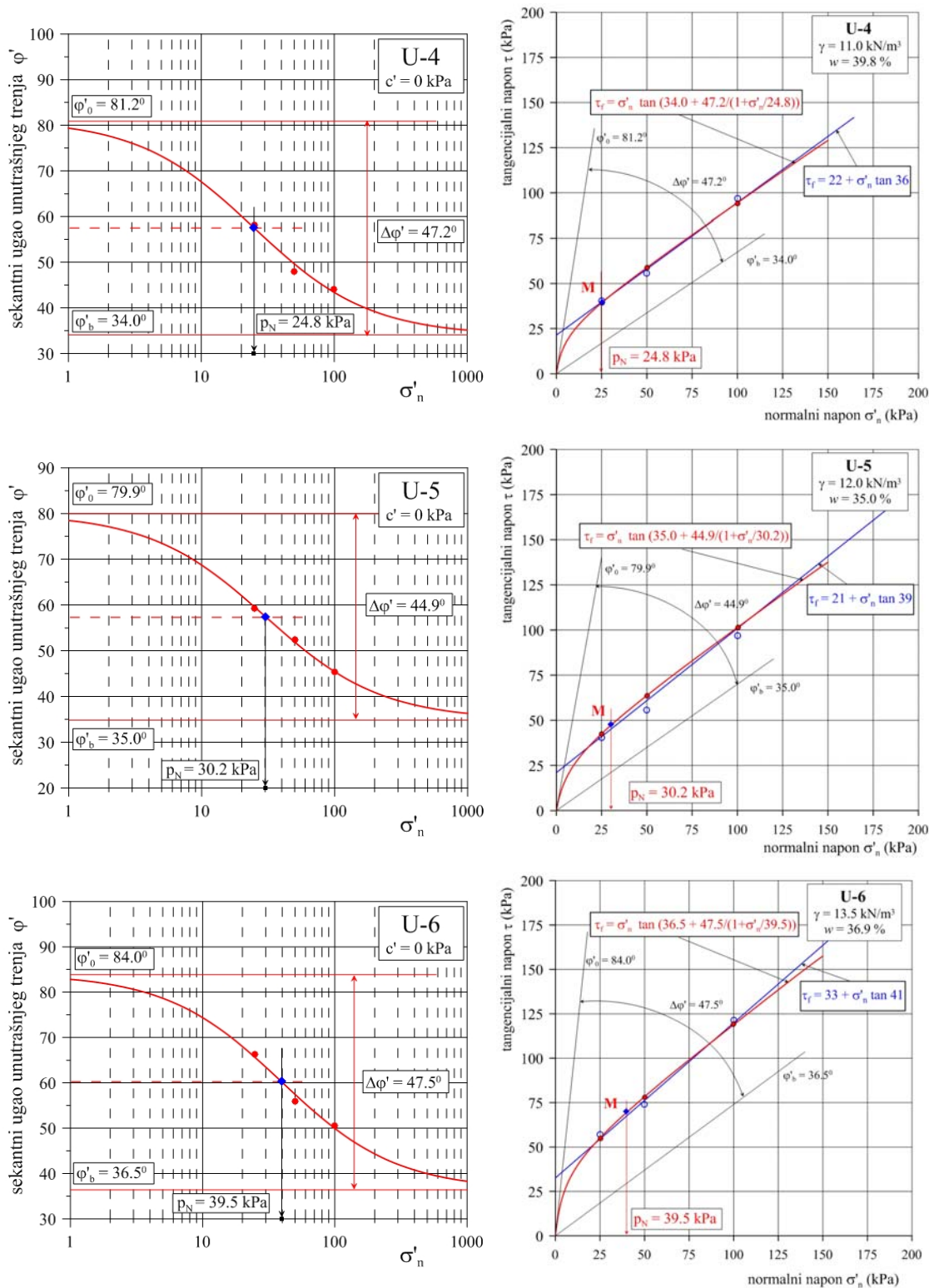


Slika 6.126 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma hiperboličkog oblika (uzorci iz serije A, $c' = 5$ kPa)

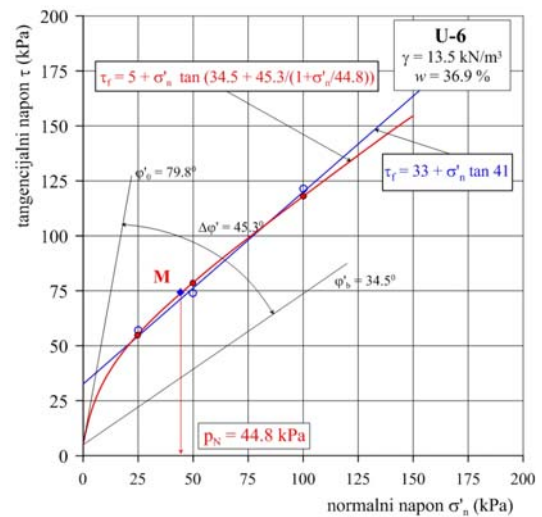
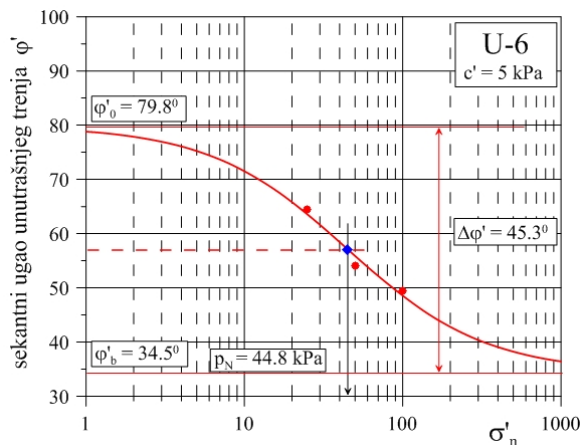
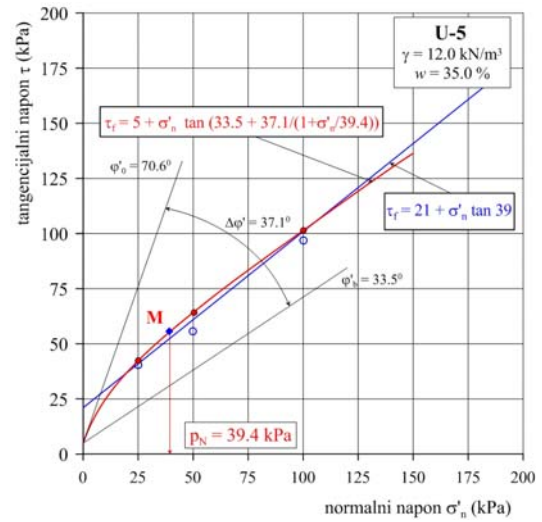
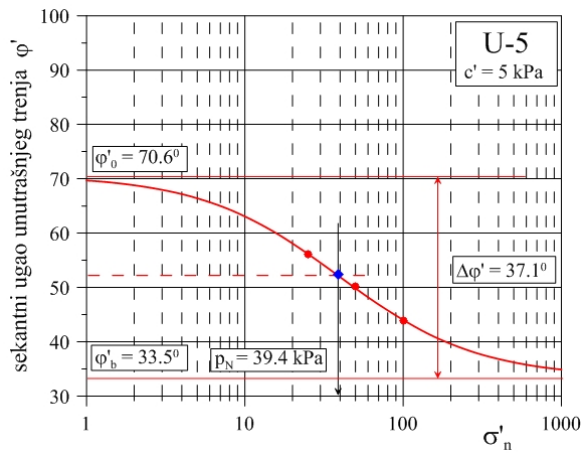
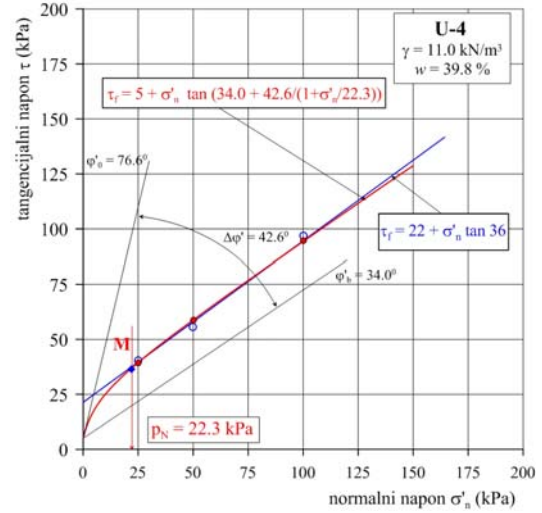
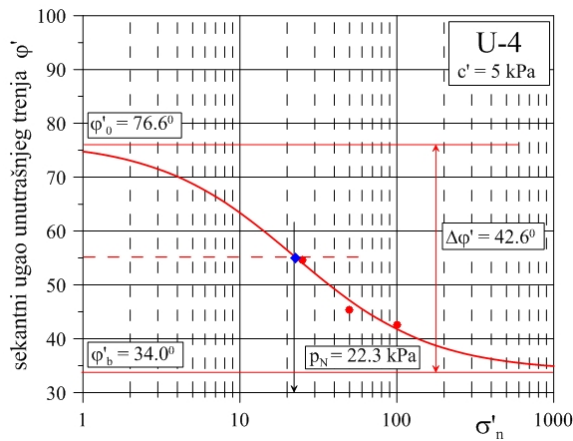


Slika 6.127 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma hiperboličkog oblika (uzorci iz serije A, $c' = 10$ kPa)

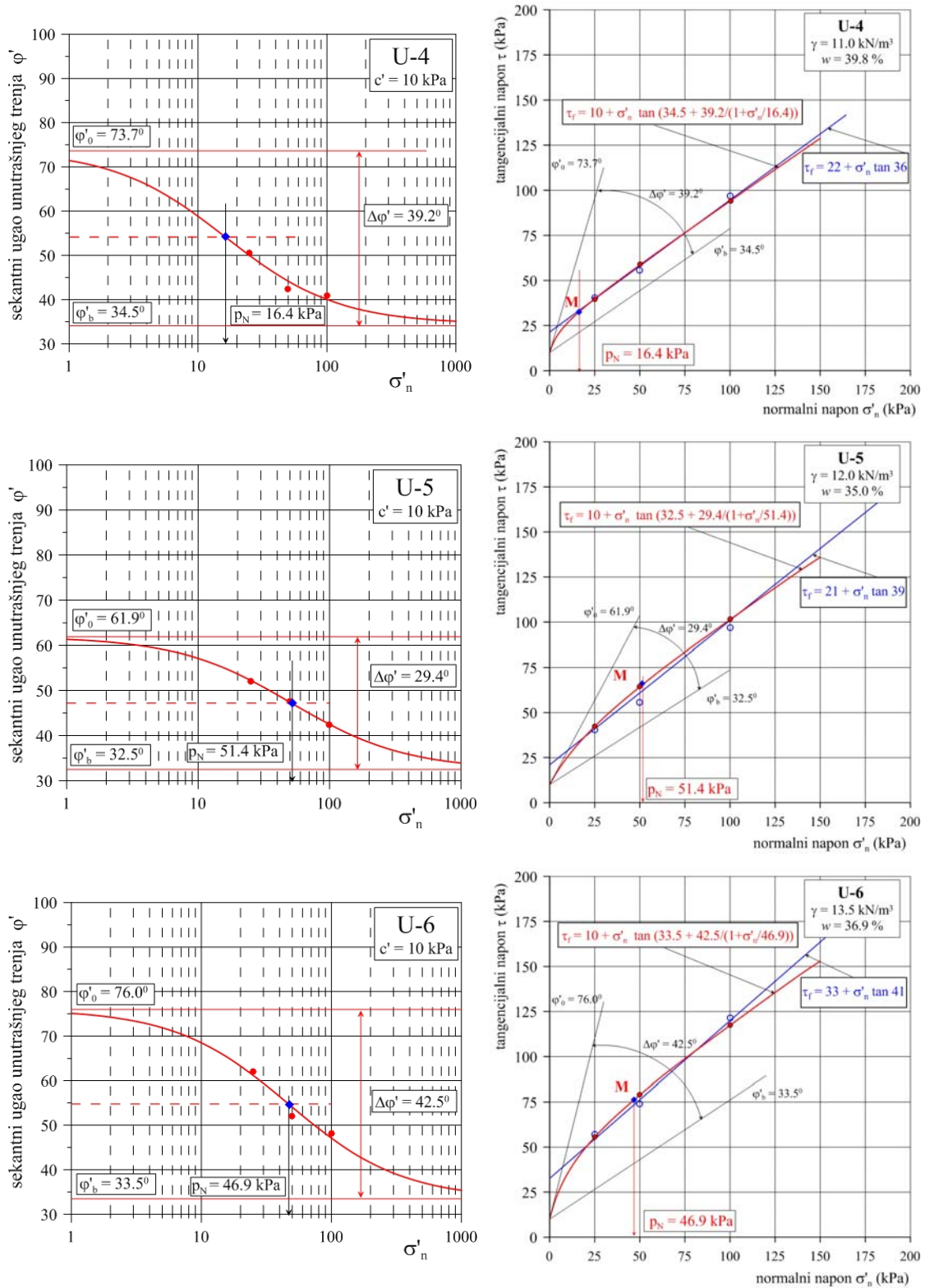
Rezultati izvršenih analiza na uzorcima iz serije B, prikazani su na Slikama 6.128 do 6.130.



Slika 6.128 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma hiperboličkog oblika (uzorci iz serije B, $c' = 0$ kPa)

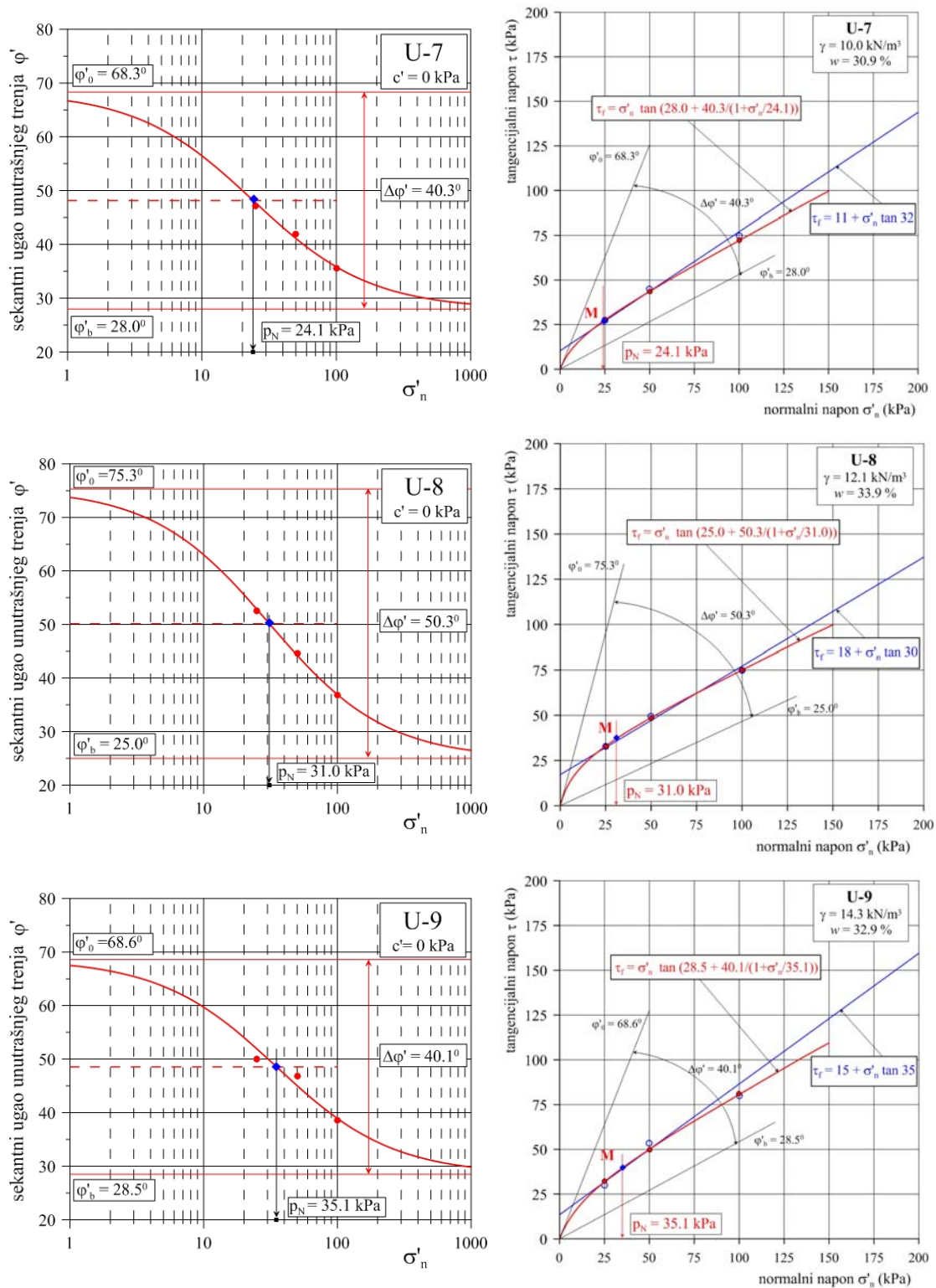


Slika 6.129 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma hiperboličkog oblika (uzorci iz serije B, $c' = 5$ kPa)

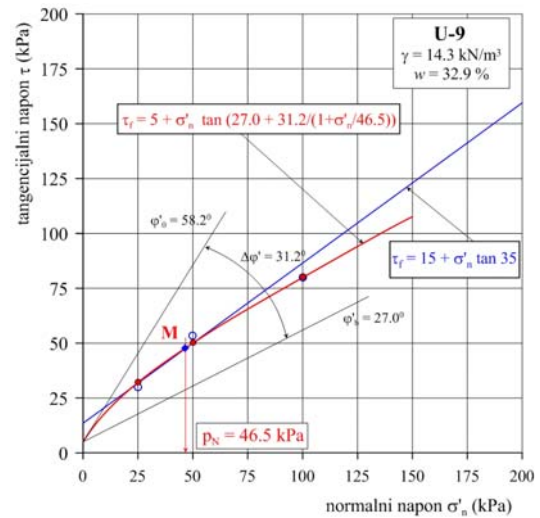
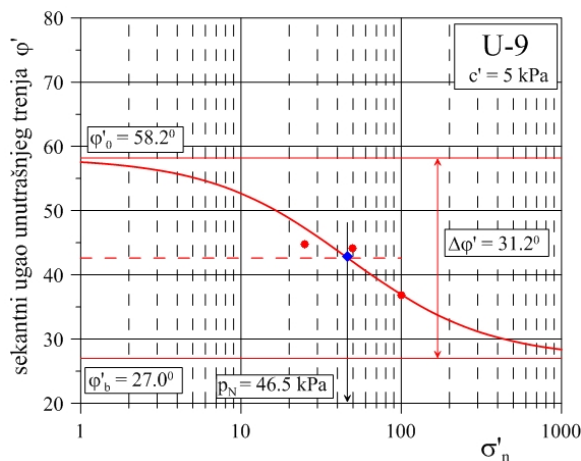
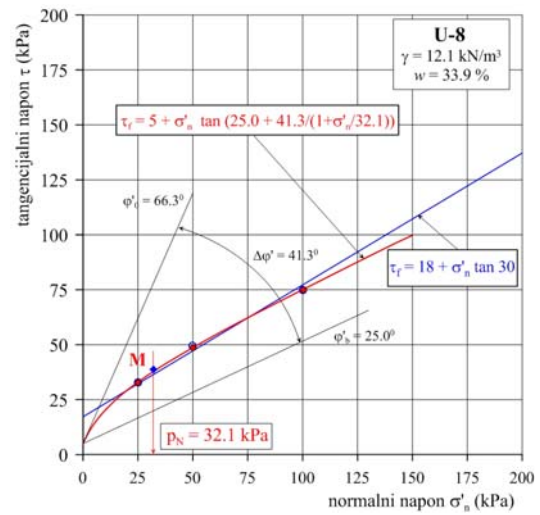
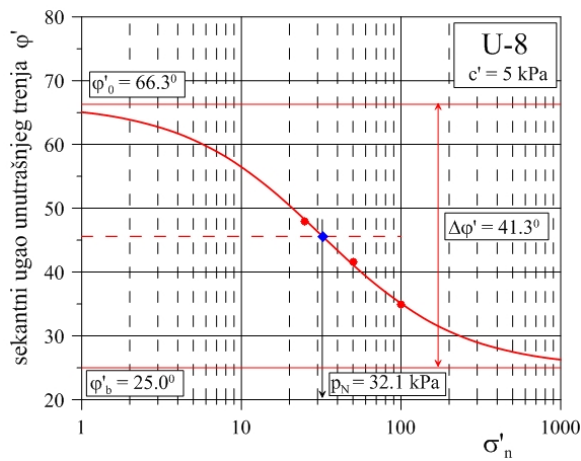
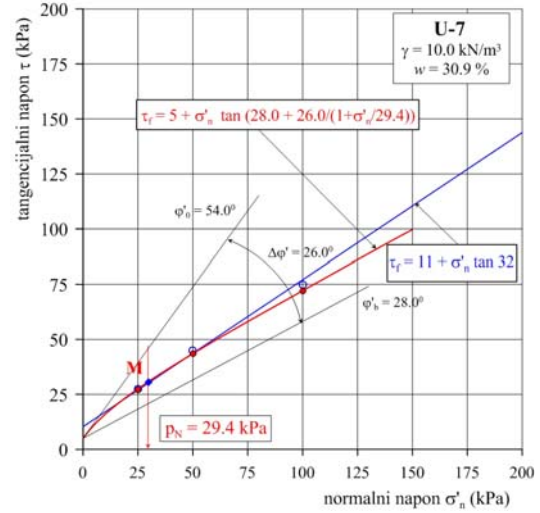
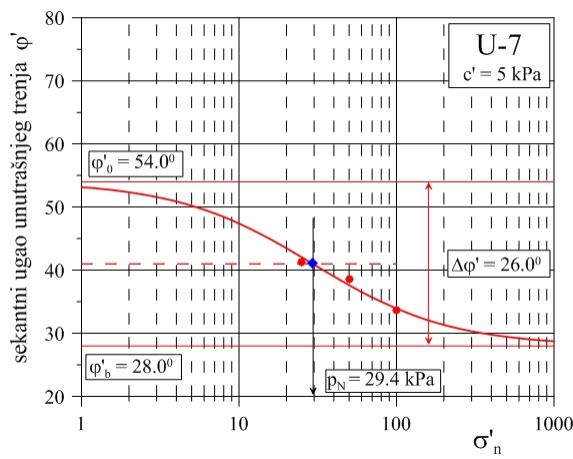


Slika 6.130 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma hiperboličkog oblika (uzorci iz serije B, $c' = 10$ kPa)

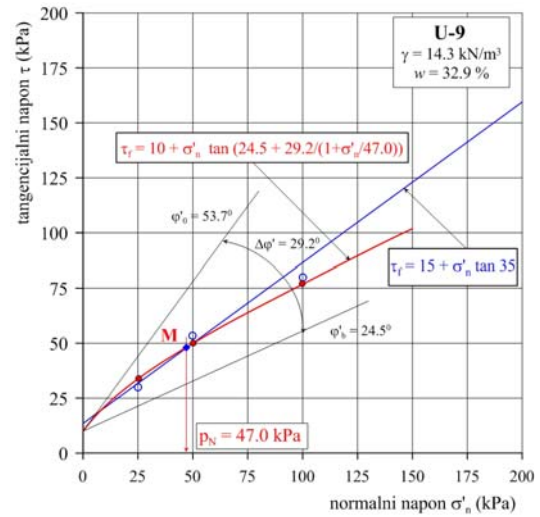
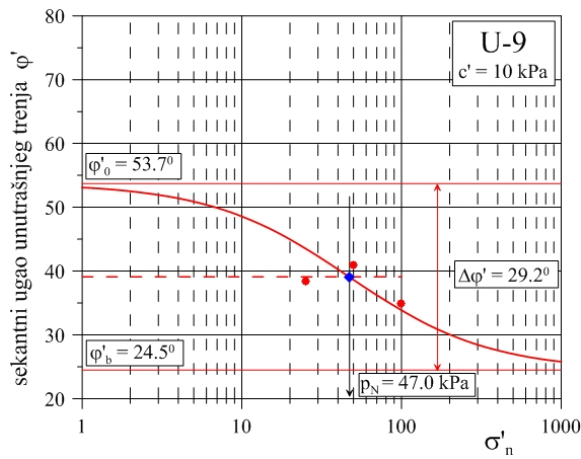
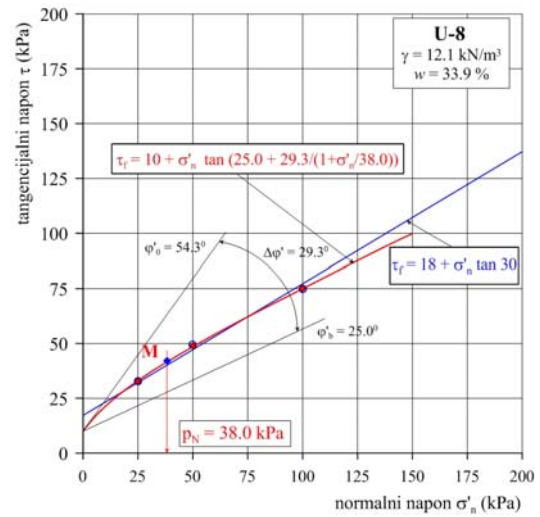
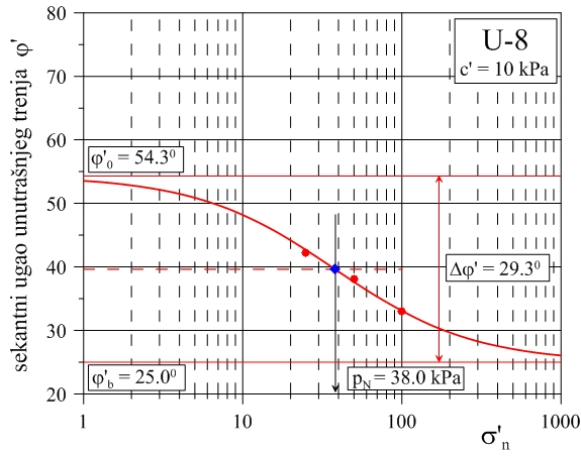
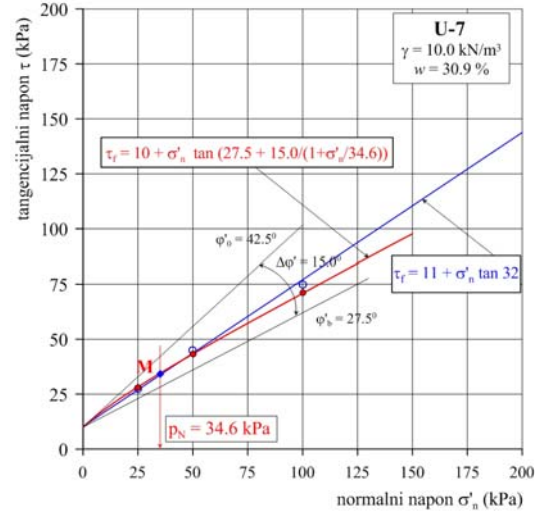
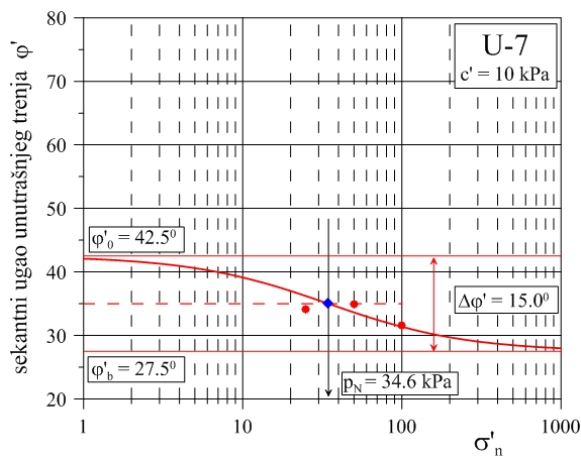
Rezultati izvršenih analiza na uzorcima iz serije C, prikazani su na Slikama 6.131 do 6.133.



Slika 6.131 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma hiperboličkog oblika (uzorci iz serije C, $c' = 0 \text{ kPa}$)

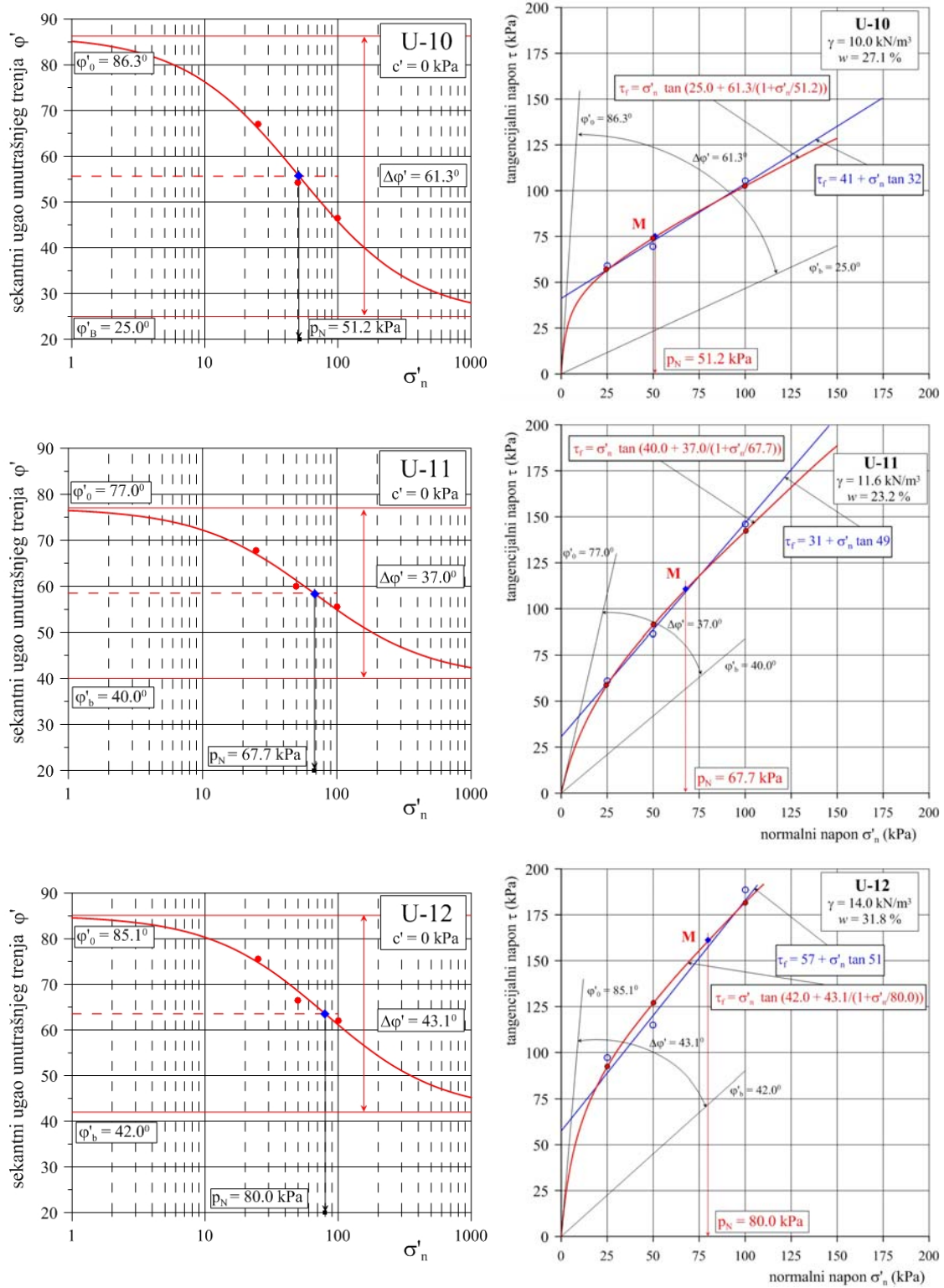


Slika 6.132 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma hiperboličkog oblika (uzorci iz serije C, $c' = 5$ kPa)

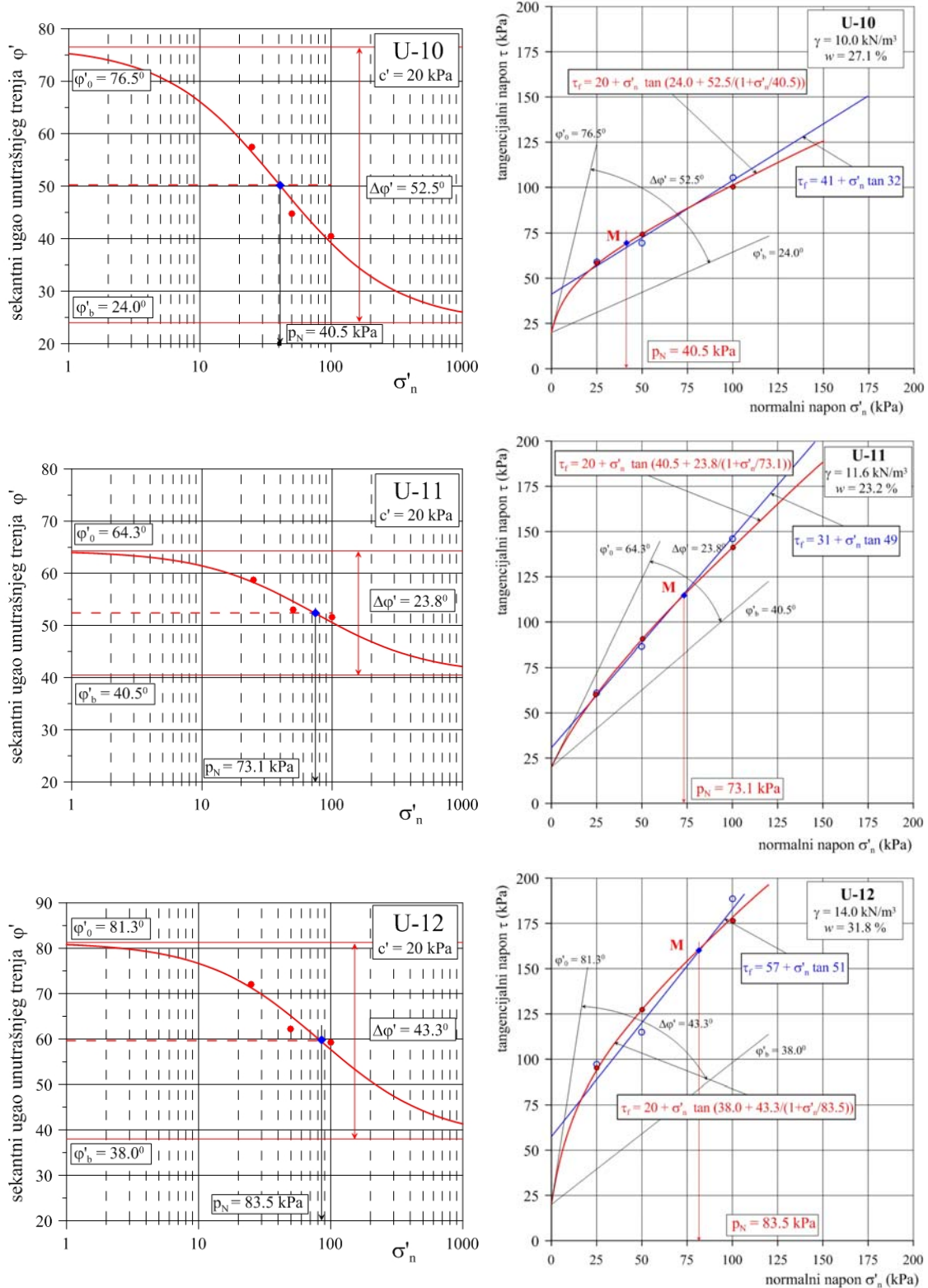


Slika 6.133 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma hiperboličkog oblika (uzorci iz serije C, c' = 10 kPa)

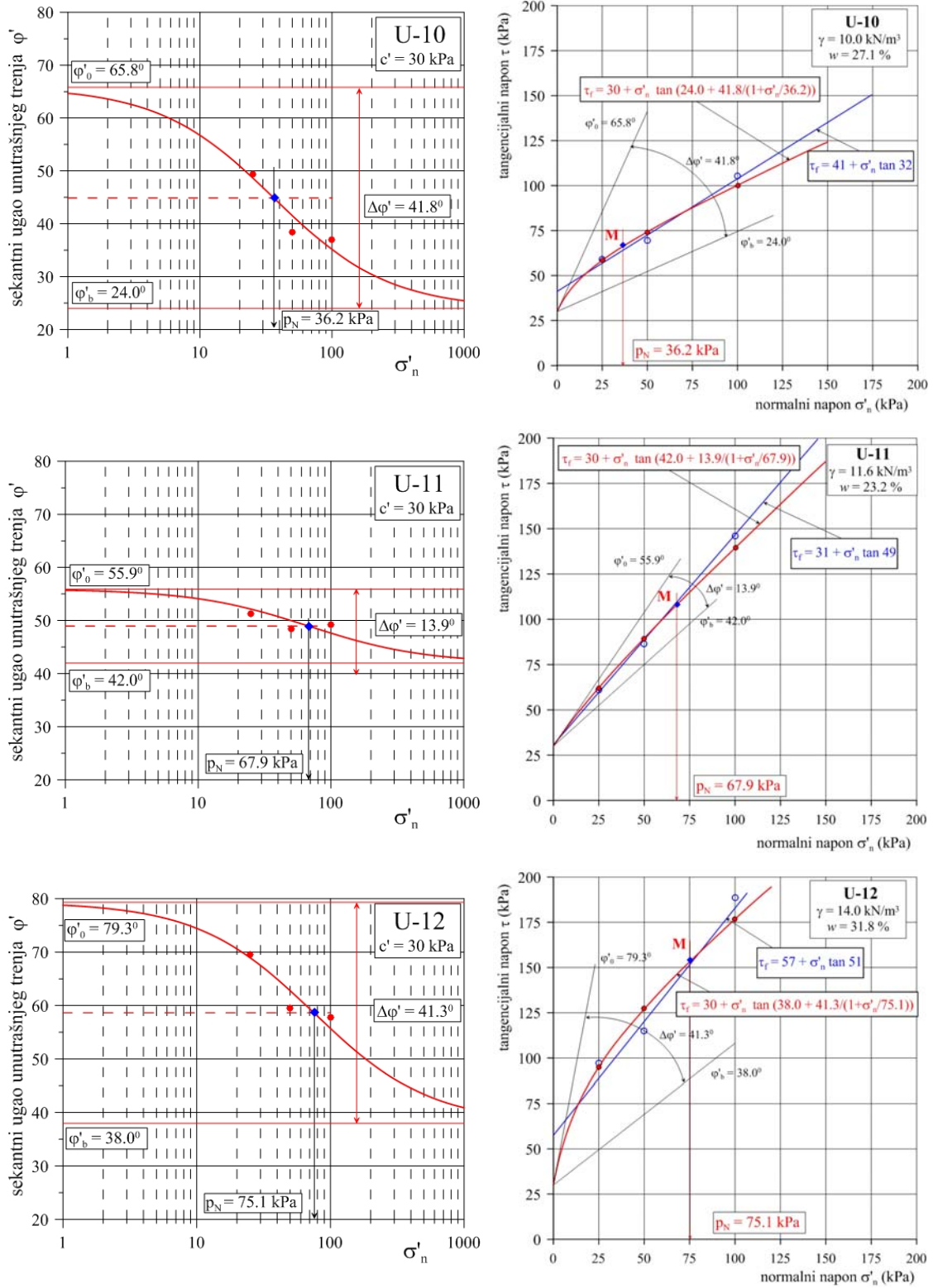
Rezultati izvršenih analiza na uzorcima iz serije D, prikazani su na Slikama 6.134 do 6.136.



Slika 6.134 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma hiperboličkog oblika (uzorci iz serije D, $c' = 0$ kPa)



Slika 6.135 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma hiperboličkog oblika (uzorci iz serije D, $c' = 20$ kPa)



Slika 6.136 Čvrstoća smicanja za krivolinijsku jednačinu loma hiperboličkog oblika (uzorci iz serije D, $c' = 30 \text{ kPa}$)

6.7. ZAKLJUČAK

Čvrstoća smicanja komunalnog otpada predstavlja jednu od njegovih najvažnijih inženjerskih osobina. Brojni faktori, koji su prikazani u ovom poglavlju, kao i pregled literaturnih podataka za poslednjih tridesetak godina, ukazuju na problematiku njenog određivanja. S obzirom da autori koriste različite metode i postupke, posebno su prikazani parametri čvrstoće smicanja koji su dobijeni laboratorijskim ispitivanjima (na osnovu opita direktnog smicanja i triaksijalnih opita), a posebno na osnovu opita koji su izvedeni na terenu ili su dobijeni na osnovu povratnih analiza. Navedeno je oko šezdesetak literaturnih podataka u kojima su, u zavisnosti od korišćenog pristupa, parametri čvrstoće smicanja određivani kako preko ukupnih tako i preko efektivnih napona. Autori su, za interpretaciju rezultata ispitivanja, najčešće koristili pravolinijsku Kulon-Morovu odnosno, Kulon-Mor-Tercagijevu teoriju loma.

Rezultati koji su dobijeni ispitivanjem 12 uzoraka (36 probnih tela) komunalnog otpada sa različitim vrednostima zapreminske težine u prirodno vlažnom stanju, analizirani su i vrednovani. Sva ispitivanja su obavljena su na prethodno pripremljenom komunalnom otpadu različite starosti, koji je uzet sa dve deponije u Srbiji (Ade Huje u Beogradu i aktivne deponije za grad Novi Sad). Uzorci su veštački formirani i podeljeni u četiri serije sa po tri uzorka (A, B, C i D). Formiranje uzoraka serija A, B i C, obavljeno je zbijanjem materijala u horizontalnim slojevima, što je slično i načinu deponovanja otpada na deponijama. Uzorci iz serije D, formirani su tako što su armirajuće čestice orijentisane pod uglom od $\alpha = 90^0$ u odnosu na horizontalnu ravan smicanja u aparatu. Kod većine ispitanih uzoraka, kod kojih je smicanje vršeno paralelno sa orijentacijom armirajućih-ljuspastih čestica (serije A, B i C), zavisnost smičići napon – pomeranje, pokazala je različito ponašanje otpada u odnosu na zbijenost, tj. zapreminske težine. Manje zbijeni uzorci ($\gamma = 9.8 - 12.4 \text{ kN/m}^3$) najpribližniji su ponašanju tla sa deformacijskim očvršćavanjem, tako da uobičajena pomeranja za izvođenje opita direktnog smicanja, nisu bila dovoljna za mobilizaciju vršne čvrstoće smicanja. Kod zbijenijih uzoraka ($\gamma > 13 \text{ kN/m}^3$), zavisnost napon – pomeranje uglavnom je ukazivala na ponašanje otpada koje je slično ponašanju materijala sa izraženim plastičnim lomom, dok je samo za najzbijeniji uzorak ($\gamma = 17.5 \text{ kN/m}^3$) ova zavisnost pokazala da se u opsegu uobičajenih pomeranja kod opita direktnog smicanja, može ostvariti i ponašanje

koje se opisuje kao deformacijsko omekšavanje, sa dostizanjem vršnog smičućeg napona. Zavisnost napon – pomeranje, na uzorcima sa armirajućim česticama orijentisanim upravno na ravan smicanja (serija D), imala je drugačiji karakter, jer je kod svih uzoraka bilo izraženo ponašanje koje je slično ponašanju tla sa deformacijskim očvršćavanjem. Međutim, kod ovih uzoraka je potpuna slična zavisnost, ukazala na to da razlika u zbijenosti otpada ne utiče znatno na oblik njegovog naponsko-deformacijskog ponašanja. Na ovaj način, pokazano je da je čvrstoća smicanja komunalnog otpada u znatnoj meri anizotropna i zavisna od ugla između dominantne orijentacije ljustastih-armirajućih čestica i površine smicanja.

Rezultati izvršenih ispitivanja su pokazali da izbor kriterijuma loma značajno utiče na vrednost parametara čvrstoće smicanja (c' , c'_{mob} i φ' , φ'_{mob}) komunalnog otpada. Kako za većinu ispitanih uzoraka nisu dostignuti uslovi vršnog napona smicanja, za interpretaciju rezultata usvojena je mobilisana vrednost čvrstoće smicanja za pomeranje od $\Delta l = 14$ mm. Ova interpretacija je izvršena korišćenjem pravolinijskog Kulon-Mor-Tercagijevog oblika jednačine čvrstoće smicanja, kao i na osnovu krivolinijske anvelope loma, primenom relacija koje odgovaraju tzv. logaritamskom i hiperboličkom obliku. Rezultati su pokazali da korišćenjem pravolinijskog Kulon-Mor-Tercagijevog oblika jednačine čvrstoće smicanja, manje zbijeni uzorci imaju nešto niže vrednosti mobilisane kohezije i ugla unutrašnjeg trenja, koje se kreću u intervalu $\varphi'_{mob} = 30 - 39^{\circ}$ i $c'_{mob} = 9 - 22$ kN/m². Ova vrednost se kod zbijenijih uzoraka, kreću u intervalu $\varphi'_{mob} = 35 - 43^{\circ}$ i $c'_{mob} = 15 - 33$ kN/m². Kod uzoraka iz serije D, kohezija i ugao unutrašnjeg trenja su značajno veći u odnosu na uzorke iz ostalih ispitanih serija i u zavisnosti od zapreminske težine, kreću se u intervalu $\varphi'_{mob} = 32 - 51^{\circ}$ i $c'_{mob} = 31 - 57$ kN/m².

Može se reći da se ovako dobijene vrednosti parametara čvrstoće smicanja, nalaze u granicama koje se mogu pronaći u svetskoj literaturi. Međutim, to ne znači da se one mogu uvek preuzimati iz literaturnih podataka, bez prethodnog poznavanja sastava otpada, njegove prethodne pripreme, načina formiranja uzoraka i sprovedene procedure njihovog određivanja. Na to ukazuje i poređenje rezultata dobijenih na uzorcima koji su formirani od starijeg otpada sa deponije Ada Huja (serija A) sa uzorcima formiranim od mlađeg otpada sa gradske deponije u Novom Sadu (serija B). Tendencija koja je zapažena pokazuje da mlađi otpad ima veću čvrstoću smicanja u odnosu na stariji otpad,

što je uglavnom ispoljeno preko povećanja kohezije. Pored toga, zapaženo je da i veličina čestica može da igra značajnu ulogu pri određivanju čvrstoće smicanja. Utvrđeno je da uzorci formirani sa krupnijim frakcijama, nisu obezbedili dodatno armiranje otpada, tako da nisu uticali na povećanje mobilisane čvrstoće smicanja. Naime, sitnije frakcije uticale su na bolju zglobljenost i zbijanje uzoraka, pa su otuda doprinele i povećanju smičućih napona. Tako je za uzorke iz serija A i B (sa dominantnim sadržajem frakcija maksimalne veličine do 12 mm), smičući napon pri srednjim i većim deformacijama, uglavnom iznosio preko 100 kPa. Međutim, kod uzoraka otpada koji su formirani sa dominantnim sadržajem frakcija maksimalne veličine do 20 mm (uzorci serije C), smičući naponi za najveća izmerena pomeranja, bez obzira na veličinu normalnog napona, nisu prelazili vrednost od 75 kPa. Ovo se uglavnom ispoljilo u smanjenju ugla unutrašnjeg trenja. Objašnjenje za ovu pojavu treba tražiti u činjenici da veće frakcije imaju veću tendenciju ka horizontalnoj orijentaciji, a s obzirom da se smicanje obavlja duž horizontalne ravni, onda je i čvrstoća smicanja ovako formiranih uzoraka, nešto manja.

Kod većine ispitanih uzoraka, kod kojih su čestice orijentisane paralelno ravni smicanja, kohezija je dostizala maksimalne vrednosti u zoni relativno malih horizontalnih pomeranja ($\Delta l = 2-5$ mm) i zavisila je od zbijenosti uzoraka. Za velike vrednosti pomeranja ($\Delta l > 12$ mm), konstatovano je da uticaj zbijenosti nema veliki uticaj na vrednosti kohezije, jer su se razlike za sve ispitane uzorke kretale u intervalu od $\Delta c'_{mob} = 2-5$ kN/m². Može se reći da ovaj zaključak ne odgovara rezultatima do kojih su došli Gabr i Valero (1995) kao i Gotteland i dr. (2000), prema kojima je mobilisana kohezija komunalnog otpada, nezavisna od vrednosti horizontalnih pomeranja. Međutim, zaključeno je da orijentacija armirajućih čestica ima značajan uticaj na vrednosti kohezije, s obzirom da su uzorci serije D, kod kojih su armirajuće čestice orijentisane upravno na ravan smicanja, pokazali da kohezija dostiže maksimalne vrednosti u zoni velikih horizontalnih pomeranja ($\Delta l = 13-15$ mm).

Rezultati ispitivanja su pokazali da ugao unutrašnjeg trenja raste sa porastom horizontalnih pomeranja. Do sličnog zaključka došli su Jessberger i Kockel (1993) i Gabr i Valero (1995), koji su konstatovali da se kod starijeg i raspadnutog otpada, mobilisani ugao unutrašnjeg trenja povećava do nekog maksimuma pri određenoj

vrednosti pomeranja, a zatim sa daljim povećanjem pomeranja on ostaje konstantan. Međutim, za razliku od kohezije, na promenu ugla unutrašnjeg trenja za raspon malih pomeranja ($\Delta l = 3-4$ mm), zapreminska težina nema veliki uticaj, jer pri horizontalnom pomeranju od $\Delta l = 3$ mm, razlike mobilisanih vrednosti ugla unutrašnjeg trenja praktično nema, odnosno kreću se u intervalu $\Delta\varphi'_{\text{mob}} = 2^0$. Slično kao i kod kohezije, na mobilisane vrednosti ugla unutrašnjeg trenja značajan uticaj ima orijentacija armirajućih čestica, s tim što je jasno izražen porast mobilisanog ugla unutrašnjeg trenja sa porastom horizontalnih pomeranja.

Interpretacija rezultata ispitivanja izvršena je i korišćenjem krivolinijskih anvelopa loma logaritamskog i hiperboličkog oblika. Analize su urađene za tri karakteristična slučaja: 1 - otpad nema koheziju $c' = 0$ kPa; 2 - kohezija je $c' = 5$ kPa (serije A, B i C) i $c' = 20$ kPa (serija D); 3 - kohezija je $c' = 10$ kPa (serije A, B i C) i $c' = 30$ kPa (serija D).

U slučaju krivolinijske anvelope loma logaritamskog oblika, analizirana je zavisnost sekantnog ugla unutrašnjeg trenja od normalnog napona σ'_n . Ovako dobijeni rezultati upoređivani su sa pravolinijskim Kulon-Mor-Tercagijevim oblikom jednačine čvrstoće, gde je pokazano da u rasponu primenjenih normalnih napona, postoji relativno dobro slaganje. Međutim, sa povećanjem normalnih napona, izražen je trend većih odstupanja u smislu smanjenja čvrstoće smicanja u odnosu na Kulon-Mor-Tercagijevu anvelopu loma. S obzirom da primena logaritamskog oblika jednačine čvrstoće smicanja ne važi za čitav interval normalnih napona, od nule do beskonačnosti, za minimalnu vrednost je predložen normalni napon $\sigma'_n = 2$ kPa.

Prvi put je za komunalni otpad, krivolinijska anvelopa loma definisana i preko funkcije hiperboličkog oblika (Maksimović, 1989, 1992, 1996). Ova interpretacija je urađena na osnovu promene efektivnog sekantnog ugla smičuće čvrstoće u funkciji od normalnog napona. Na taj način je dobijen normalni napon srednjeg sekantnog ugla (p_N). Njegova vrednost se, u zavisnosti od zbijenosti materijala, za uzorke serija A, B i C, kreće u rasponu $p_N = 19.5 - 51.4$ kPa, dok je za uzorke serije D njegova vrednost znatno veća i kreće se od $p_N = 36.2 - 83.5$ kPa, i to bez obzira na usvojene vrednosti kohezije. Treba reći da je za opis ovog krivolinijskog oblika jednačine čvrstoće smicanja, prvi put korišćena i kohezija.

POGLAVLJE 7

DEFORMABILNOST KOMUNALNOG OTPADA

Nasipanje preko već postojećeg otpada, menja i uslove unutar deponije komunalnog otpada i izaziva sleganje kako podloge tako i promenu zapremine odloženog materijala.

To je najčešće prouzrokovano kombinacijom više faktora:

- konsolidacijom frakcija otpada;
- kompresijom tokom odlaganja;
- hemijskim i biološkim promenama;
- degradacijom, raspadanjem;
- rastvaranjem otpada procednim vodama;
- promenom strukture zbog savijanja, lomljenja i reorijentacije čestica;
- erozijom sitnog materijala;
- starošću otpada i dr.

Sve to uslovljava i vremensku promenu mehaničkih osobina otpada, pa je prognoziranje sleganja otpada izuzetno teško, ali je neophodno, jer utiče na funkcionalnost čitave deponije.

Da bi se izvršilo modeliranje i numerička simulacija dugotrajnog sleganja deponije, od najvećeg značaja su parametri stišljivosti i konsolidacije pa i reološke karakteristike komunalnog otpada. S obzirom da je komunalni otpad izrazito heterogen i anizotropan, to je određivanje ovih parametara veoma teže nego kod tla. Međutim, obično se klasične teorije mehanike tla, koje se odnose na stišljivost, primenjuju i na komunalni otpad, pa se za opisivanje njegovog ponašanja koriste isti parametri. Za razliku od prirodnog tla, gde se sleganje najvećim delom obavi u toku inicijalne kompresije i primarne konsolidacije, kod komunalnog otpada glavnu komponentu sleganja predstavlja sekundarna kompresija, pa se može reći da se ono odvija tokom čitavog postojanja deponije.

7.1. PARAMETRI DEFORMABILNOSTI KOMUNALNOG OTPADA

Prema Fassett-u i dr. (1994), teorija konsolidacije koja se primenjuje u mehanici tla, po pravilu se primenjuje i kod komunalnog otpada, pa se koriste isti parametri deformabilnosti. Za određivanje parametara stišljivosti komunalnog otpada, najčešće se koriste laboratorijska jednodimenzionalna ispitivanja u edometarskim aparatima (Gabr i Valero, 1995; Landva i dr., 2000, Carvalho, 1999; Vilar i Carvalho, 2004; Reddy i dr., 2008; Chen i dr., 2008). Pri tome se koriste aparati različitih prečnika (od 63 mm pa do 600 mm). Pored laboratorijskih ispitivanja, vrše se i osmatranja sleganja otpada na deponijama (Sharma, 1990; Grisolia i dr., 1993; Gasparini i dr., 1995; El-Fadel i Al-Rashed, 1998; Coumoulous, 1999; Machado i dr., 2002). Rezultati ispitivanja se najčešće izražavaju preko parametara stišljivosti i to: indeksa primarne kompresije C_c (ili modifikovanog indeksa primarne kompresije C_c') i indeksa sekundarne kompresije C_α (ili modifikovanog indeksa sekundarne kompresije C_α'). Modul stišljivosti M_v , koeficijent zapreminske stišljivosti m_v , kao i koeficijent stišljivosti a_v , znatno ređe se koriste kod komunalnog otpada. Međutim, kada se analiziraju mehaničke karakteristike od kojih zavisi deformaciono ponašanje tla, u geotehničkoj praksi je uobičajena primena modula stišljivosti i modula elastičnosti, tako da će se u nastavku teksta ukratko opisati i ovi parametri.

7.1.1. Modul elastičnosti

Iako se komunalni otpad samo aproksimativno može tretirati kao elastičan materijal, modul elastičnosti predstavlja mehaničku osobinu otpada od koje zavisi njegovo deformaciono ponašanje. Mali modul elastičnosti otpada može da izazove pomeranja barijere u deponiji, dok se ne uspostave granični uslovi ravnoteže (Dixon and Jones, 1998). U literaturi se uglavnom navode dva oblika modula elastičnosti: modul koji se koristi u domenu vrlo malih deformacija (koristi se pri razmatranju seizmičkih uticaja) i modul koji se koristi u domenu velikih deformacija (koristi se u analizama sleganja).

Opšti izraz za određivanje modula elastičnosti dat je sledećom jednačinom

$$E_s = \frac{d\sigma_z}{d\varepsilon_z} \approx \frac{\Delta\sigma_z}{\Delta\varepsilon_z} \quad (7.1)$$

Analizirajući literaturne podatke, Jessberger i dr. (1990) navode da se modul elastičnosti kreće između 0.3 i 3.0 MPa. Green and Jamnejad (1997) su određivali modul elastičnosti kućnog otpada i dobili vrednost od 0.7 MPa, što potvrđuje rezultate Watta and Charles-a (1990), prema kojima je E_s za komunalni otpad uglavnom manji od 1 MPa.

Dixon i dr. (2004) su vršili merenja na terenu i dobili vrednost modula elastičnosti između 0.3 i 2.0 MPa. Slične vrednosti tj. 0.2 – 2.5 MPa navode i Landva i dr. (2000), Beavan i Powrie (1995) i Powrie i Beavan (1999), koji su izvodili ispitivanja na uzorcima velikih dimenzija u specijalnoj kompresionj komori i dobili vrednosti modula elastičnosti E_s u granicama 0.3 – 4.5 MPa.

7.1.2. Parametri stišljivosti

7.1.2.1. Modul stišljivosti

Najčešći laboratorijski opit, pomoću kojeg se uspostavljaju veze između napona i deformacija za komunalni otpad, jeste edometarski opit iz kojeg se dobija tzv. edometarski modul, odnosno, modul stišljivosti M_v . U ovom aparatu je sprečeno bočno širenje pa su deformacije jednodimenzionalne a naponsko stanje je rotaciono simetrično. Modul stišljivosti se menja sa promenom nivoa napona i promenom zapreminske težine otpada i zato nije konstantna veličina.

Iz rezultata ovog opita, za usvojeni interval napona $\Delta\sigma'_v = \sigma'_{v,i} - \Delta\sigma'_{v,i-1}$, može se definisati tangenti, odnosno sekantni modul stišljivosti

$$M_v = \frac{\Delta\sigma'_v}{\Delta\varepsilon_v} \quad (7.2)$$

Kada se sekantni modul izražava preko zanemarljivo malog odsečka na naponsko-deformacionoj krivoj, tj. ako interval napona $\Delta\sigma'_v$ teži nuli, dobija se tangenti modul stišljivosti u sledećem obliku

$$M_t(\sigma'_v) = \frac{d\sigma'_v}{d\varepsilon_v} \approx \frac{\Delta\sigma'_v}{\Delta\varepsilon_v} \quad (7.3)$$

i može se aproksimirati sekantnom vrednošću. Ako se ona pripiše tangentskoj veličini koja odgovara sredini intervala napona za koji je izračunata, mogu se izračunati vrednosti u nizu ispitanih intervala napona i kasnije se ova zavisnost može aproksimirati pogodnim analitičkim izrazima.

Ako je poznata početna visina uzorka i smanjenje visine pri određenom stepenu opterećenja, onda se relativna deformacija može odrediti na sledeći način

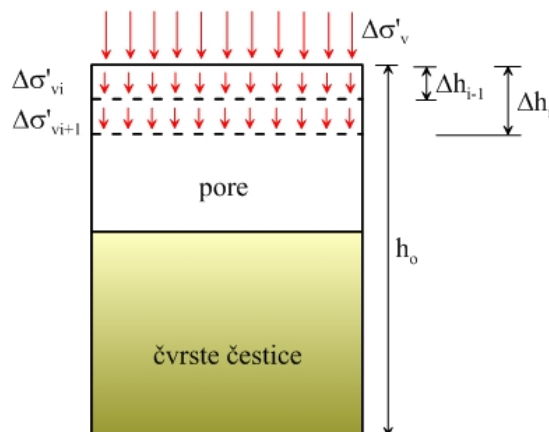
$$\Delta\varepsilon_v = \frac{\Delta h_i - \Delta h_{i-1}}{h_0 - \Delta h_i} \quad (7.4)$$

gde je:

h_0 - početna visina uzorka u edometru,

Δh_i - smanjenje visine pri određenom stepenu opterećenja,

Δh_{i-1} - smanjenje visine pri prethodnom stepenu opterećenja (Slika 7.1).



Slika 7.1. Šematski prikaz sleganja tokom izvođenja edometarskog opita

Janbu (1967) je pokazao da se tangenti modul stišljivosti može opisati sledećim empirijskim izrazom:

$$M_t = m \cdot p_a \cdot \left(\frac{\sigma'_v}{p_a} \right)^{(1-a)} \quad (7.5)$$

gde je:

m - modulni broj

p_a - referentni napon (100 kPa)

a - naponski eksponent

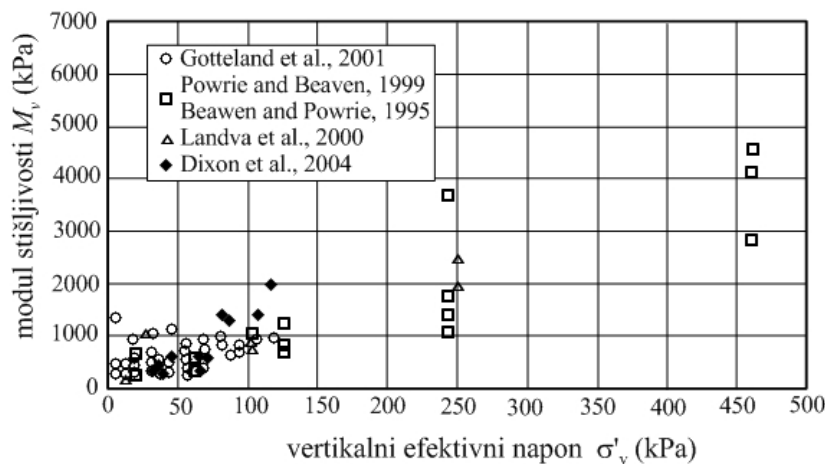
Ovaj oblik jednačine, često se pojavljuje u nelinearno elastičnim modelima.

Kada su u pitanju deponije komunalnog otpada i kontaminirana tla, na osnovu geotehničkih preporuka Nemačkog geotehničkog društva (DGGT, 1997), modul stišljivosti se može odrediti na osnovu sledeće jednačine

$$M_t(\sigma'_v) = M_0 + k \cdot \sigma'_v \quad (7.6)$$

Na osnovu izvršenih ispitivanja na 21 uzorku u edometarskom aparatu, predložena je linearna zavisnost između napona i modula stišljivosti za slučaj da je $\sigma'_v > 50$ kPa, i određeni su parametri M_0 i k koji se kreću: M_0 između - 294 kPa i - 106 kPa, a k od 10.9 do 12.5.

Dixon i dr. (2004), zbirno su prikazali vrednosti modula stišljivosti komunalnih otpada u funkciji vertikalnih efektivnih napona (Slika 7.2).



Slika 7.2. Zavisnost modula stišljivosti u od vertikalnih efektivnih napona (Dixon i dr. 2004)

7.1.2.2. Indeks primarne kompresije

Proračun sleganja komunalnog otpada, sve do aktiviranja sekundarne kompresije, vrši se kao i kod tla korišćenjem indeksa primarne kompresije C_c (u mehanici tla – indeks kompresije), koji se najčešće izražava preko promene koeficijenta poroznosti. On se određuje na osnovu nagiba završnog pravolinijskog dela dijagrama $e - \log \sigma'_v$, (Slika 7.3) na osnovu sledeće jednačine

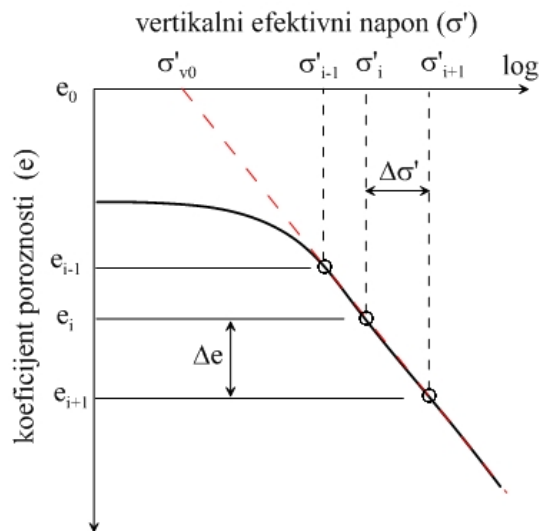
$$C_c = \frac{\Delta e}{\log \sigma'_{i+1} - \log \sigma'_i} = \frac{\Delta e}{\log(\sigma'_{i+1}/\sigma'_i)} \quad (7.7)$$

gde je:

Δe - promena koeficijenta poroznosti

σ'_i - efektivni vertikalni napon za koeficijent poroznosti e_i

σ'_{i+1} - efektivni vertikalni napon za koeficijent poroznosti e_{i+1}

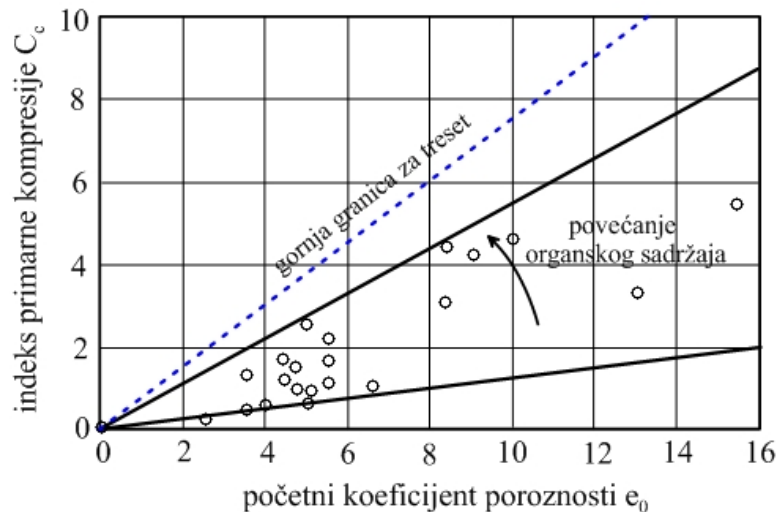


Slika 7.3. Zavisnost napona i koeficijenta poroznosti

Osnovni problemi koji se pri tom javljaju, vezani su za efektivne napone koji zavise od zapreminske težine otpada koja se vremenom menja i obično se ne može tačno odrediti. Osim toga, efektivni naponi zavise i od nivoa filtrata u deponiji, a kada se radi o starijim deponijama, problem može da predstavlja njihova početna visina koja je obično nepoznata. Pored toga, indeks primarne kompresije se značajno menja sa promenom

koeficijenta poroznosti (e). To je i razlog što vrednosti indeksa primarne kompresije dosta variraju.

Sowers (1973) je među prvima određivao indeks primarne kompresije, u zavisnosti od početne poroznosti i organskog sadržaja otpada. Rezultati do kojih je došao ukazuju da se C_c kreće u rasponu od $0.15e_0$ kod komunalnog otpada sa malim sadržajem organskih materija, do $0.55e_0$ kod komunalnog otpada sa velikim sadržajem organskih materija (Slika 7.4). Karakteristično je da su vrednosti indeksa veće ukoliko je veća zastupljenost drveta, grmlja i limenki, dok su manje vrednosti posledica prisustva krućih materijala.



Slika 7.4. Zavisnost indeksa primarne kompresije i početnog koeficijenta poroznosti (Sowers, 1973)

Gabr i Valero (1995) su prikazali rezultate koji su dobijeni iz opita stišljivosti, a izvedeni su na standardnim edometarskim aparatima, na uzorcima otpada starosti 15 – 30 godina. Za koeficijent poroznosti $e_0 = 1.0 - 3.0$, dobili su vrednosti indeksa primarne kompresije kretale su se od $C_c = 0.4 - 0.9$.

Machado i dr. (2002) su vršili ispitivanja na različitim uzorcima otpada koji su prethodno zbijeni. Za raspon napona u intervalu od 60 do 640 kPa, sračunat je indeks primarne kompresije u intervalu $C_c = 0.52 - 0.92$. Kao što se vidi, dobijene vrednosti slične su rezultatima Sowers-a (1973) ali i Gabr i Valero-a (1995).

7.1.2.3. Modifikovani indeks primarne kompresije

Kao što je pokazano u Poglavlju 3, određivanje koeficijenta poroznosti komunalnog otpada, je dosta složeno. Neki istraživači kao što su Vilar i Carvalho (2004); Hossain i dr. (2003); Gabr i Valero (1995) su pretpostavljali početnu vrednost koeficijenta poroznosti e_0 , kako bi sračunali vrednosti C_c i C_α komunalnog otpada. Iz tog razloga sve se češće koristi modifikovani indeks primarne kompresije C_c' , koji se može izraziti preko aksijalne deformacije, a ne preko razlike koeficijenta poroznosti, na sledeći način.

$$C_c' = \frac{\Delta \varepsilon}{\log(\sigma'_{i+1}/\sigma'_i)} \quad (7.8)$$

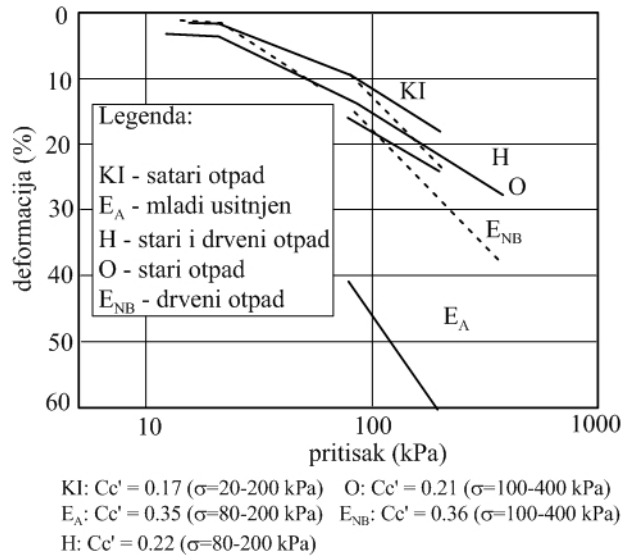
odnosno

$$C_c' = \frac{\Delta h}{h_0 \cdot \log(\sigma'_{i+1}/\sigma'_i)} = \frac{C_c}{1 + e_0} \quad (7.9)$$

gde je:

- e_0 - početni koeficijent poroznosti,
- $\Delta \varepsilon$ - razlika vertikalne deformacija za logaritamsku jedinicu promene vertikalnog efektivnog napona - $[\Delta \log(\sigma')]$,
- h_0 - početna visina sloja otpada (uzorka) i
- Δh - promena debljine sloja otpada, tj. sleganje otpada (uzorka).

U ispitivanjima Landve i Clarka (1990), razlike za vrednost parametra C_c' kretale su se između 0.2% i 3.0% za jedan logaritamski ciklus vremena, dok su se na osnovu rezultata njihovih ispitivanja, izmerene vrednosti C_c' kretale između 0.8% i 0.9% po logaritamskom ciklusu vremena. Autori navode prosečne vrednosti C_c' koje se kreću od 0.17 - 0.36, dobijene iz laboratorijskih ispitivanja na uzorcima starog otpada sa deponija u Kanadi (Slika 7.5). Takođe navode i prosečne literaturene vrednosti koje se kreću od $C_c' = 0.09 - 0.41$. Gabr i Valero (1995) su zapazili da razlike u vrednostima modifikovanog indeksa primarne kompresije C_c' , koje su dobili Landva i Clark (1990), i onih koje su izmerene u toku njihovih izučavanja nisu značajne, bez obzira na korišćenje edometarskih aparata različitih dimenzija.



Slika 7.5. Zavisnost pritiska i deformacija u fazi primarne kompresije (Landva i Clark, 1990)

Bowders i dr. (2000) su vršili su merenje sleganja komunalnog otpada u jednoj ćeliji aktivne deponije. Početna debljina jednog sloja iznosila je 2.6 m, a za 18 meseci je narasla na 8 m i za to vreme otpad se slegao 0.4 m. Analizirano je i sleganje drugog sloja čija je početna debljina iznosila 5 m, stim da je ovaj sloj dostigao istu debljinu od 8 m za 9 meseci. Kod njega je izmereno duplo manje sleganje od 0.2 m. Na osnovu sprovedenih merenja sleganja ovih slojeva, sračunat je modifikovani indeksi sekundarne kompresije koji je za prvi sloj iznosio 0.22, odnosno za drugi 0.05.

Machado i dr. (2002) navode da se prosečna vrednost C_c' kreće oko 0.21 i da je ona približna donjim vrednostima koje su prikazali Landva and Clark (1990), prilikom ispitivanja komunalnog otpada iz Kanade u velikom edometarskom aparatu.

7.1.2.4. Indeks sekundarne kompresije

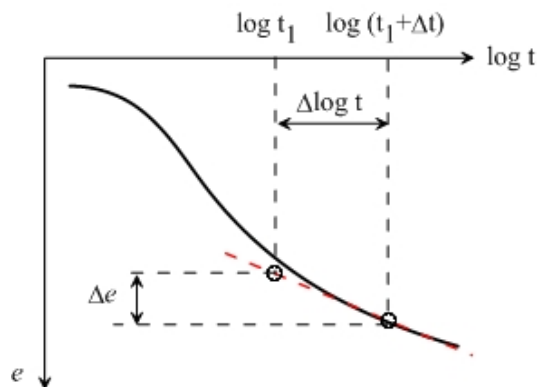
Za razliku od tla, kod koga se najveći deo deformacija obavi u toku primarne kompresije, kod komunalnog otpada veći de deformacija nastaje nakon toga, u fazi sekundarne kompresije. Sekundarna kompresija se odvija kroz čitav „aktivni život“ deponije i predstavlja glavnu komponentu ukupnog sleganja. U sekundarnu kompresiju uključeni su svi „skriveni“ efekti kao što je npr. degradacija, bilo da je u pitanju

hemijska ili biološka. Da bi se predvidelo sleganje u vremenu nakon završetka primarne faze, koristi se indeks sekundarne kompresije C_α . On predstavlja odnos smanjenja koeficijenta poroznosti (Δe) za jednu jedinicu logaritma vremena (t). Određuje se na osnovu aproksimacije sekundarnog dela krive u pravolinijski, u polu-logaritamskom dijagramu $e - \log t$, (Slika 7.6) na osnovu sledeće jednačine

$$C_\alpha = \frac{\Delta e}{\log t_2 - \log t_1} = \frac{\Delta e}{\log(t_2/t_1)} \quad (7.10)$$

gde je:

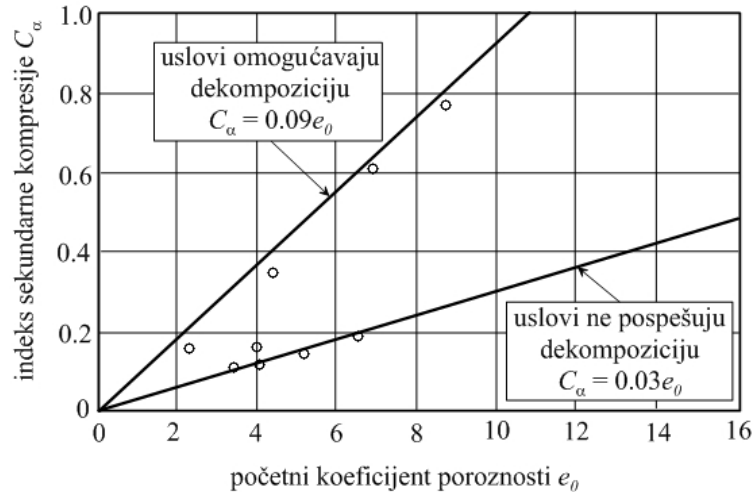
- t_1 - vreme na početku sekundarnog sleganja (vreme završetka primarne konsolidacije)
- t_2 - vreme osmatranja (s obzirom na aproksimaciju pravom linijom može da bude bilo koje vreme veće od t_1)



Slika 7.6. Komponente sekundarne kompresije

Sowers (1973) je na osnovu terenskih osmatranja utvrdio zavisnost sekundarne kompresije i vremena i prikazao vrednosti koeficijenta sekundarne kompresije za komunalne deponije. S obzirom da ovaj koeficijent zavisi od hemijskog i biološkog razlaganja otpada, Sowers je utvrdio vezu indeks sekundarne kompresije i početnog koeficijenta poroznosti (Slika 7.7). Kada se radi o otpadu za koji su uslovi razlaganja (truljenja) nepovoljni, C_α je oko $0.03e_0$, dok u suprotnom, tj. kada su uslovi razlaganja otpada povoljni (topli i vlažni uslovi) njegova vrednost raste i C_α je oko $0.09e_0$. On je

naveo da se vrednosti za komunalni otpad mogu uporediti sa vrednostima za treset i organska tla.



Slika 7.7. Zavisnost indeksa sekundarne kompresije i početnog koeficijenta poroznosti (Sowers, 1973)

Oweis i Khera (1990) navode da se vrednosti C_α kreću između 0.01 i 0.04. Kako su vrednosti koeficijenta C_α u literaturi dosta različite, oni predlažu primenu nižih vrednosti i smatraju da bi za otpad odgovarala vrednost od 0.02.

Jessberger i Kockel (1993) su sproveli ispitivanja u velikim edometarskim aparatima na netretiranom petnaestogodišnjem komunalnom otpadu i dobili prosečnu vrednost koeficijenta sekundarne kompresije od $C_\alpha = 0.06$.

Gabr i Valero (1995) su na osnovu šest izvedenih opita, dobili vrednost C_α koja se kretala u intervalu od 0.03 – 0.009, s tim što su koristili početne vrednosti koeficijenta poroznosti e_0 od 1.0 – 3.0.

Sharma i dr. (1999) navode da su utvrđene vrednosti C_α za komunalni otpad slične vrednostima za treset i da se kreću od 0.02 do 0.07 za otpad starosti 10-15 godina.

Machado i dr. (2002) su utvrdili da se izražena sekundarna kompresija javlja neposredno nakon početka ispitivanja od oko 15 s. Autori su dobili vrednosti C_α u intervalu od 0.021 do 0.044, a kao prosečnu vrednost predložili su za $C_\alpha = 0.032$.

7.1.2.5. Modifikovani indeks sekundarne kompresije

Kao i kod indeksa primarne kompresije tako se i u ovom slučaju alternativno uvodi modifikovani indeks sekundarne kompresije C_α' , koji se može izraziti preko aksijalne deformacije na sledeći način

$$C_\alpha' = \frac{\Delta \varepsilon}{\log(t_2/t_1)} \quad (7.11)$$

odnosno

$$C_\alpha' = \frac{\Delta h}{h_0 \cdot \log(t_2/t_1)} = \frac{C_\alpha}{1 + e_0} \quad (7.12)$$

Fassett je pokušao da ispita kako različiti parametri (zapreminska težina, debljina otpada i način zbijanja) utiču na modifikovani indeks sekundarne kompresije C_α' . Zaključci do kojih je došao su sledeći:

- evidentno je da postoji zavisnost između C_α' i zapreminske težine
- postoji opšta korelacija između debljine otpada i C_α' i
- ne postoji zavisnost između načina zbijanja i C_α'

Kako se zbijanjem postiže veća zapreminska težina, treba očekivati i smanjenje C_α' . Međutim, kako je dobijena zavisnost C_α' i zapreminske težine, to navodi na zaključak da sleganje otpada doprinosi povećanju zapreminske težine.

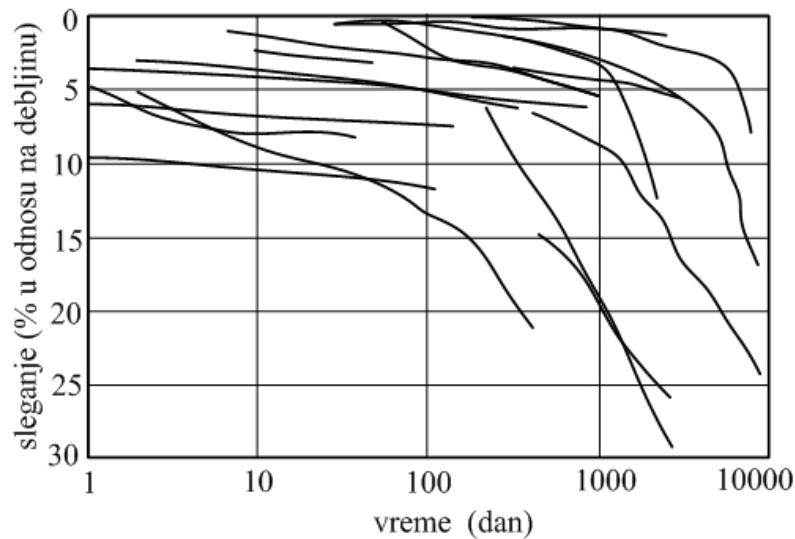
U literaturi se za modifikovani indeks sekundarne kompresije C_α' navode dosta različite vrednosti od 0.001 do 0.59, koje verovatno odražavaju razlike koje se odnose na ispitivane uzorke (sveži, raspadnuti, usitnjeni, sortirani itd.), njihovu prirodnu vlažnost i usvojenog vremena za početak sekundarne kompresije. Kod uobičajenih deponija, donja granica C_α' obično se kreće od 0.01-0.03, a gornja je oko 0.1. Najniža vrednost karakteristična je za deponije kod kojih se vrši dinamičko zbijanje otpada.

Oweis i Khera (1990) navode da vrednosti modifikovanog indeksa sekundarne kompresije C_{α}' variraju od 0.02 do 0.072.

Prema Fassett-u (1994) parametri C_c , C_c' , C_{α} i C_{α}' zavise od vrednosti usvojenih za e_0 . Pored toga C_{α}' zavisi još i od nivoa napona, intervala vremena, kao i od izbora početka vremena sekundarne kompresije.

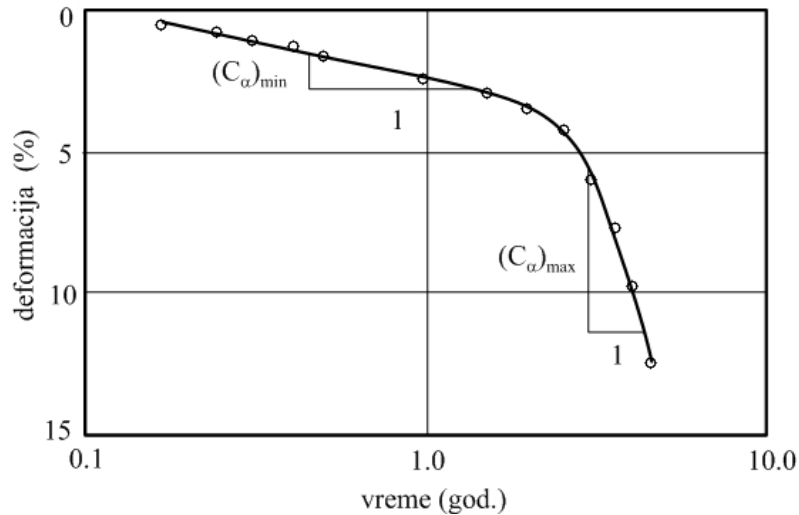
Watts i Charles (1990) su na osnovu dobijenih dijagrama sleganja za dve deponije, primenom različitih kriterijuma za izbor nultog vremena, zaključili da njegov izbor ima veliki uticaj na C_{α}' , naročito u ranijim fazama.

Drugi problem kod određivanja C_{α}' je činjenica da je on po svojoj definiciji, konstantan. Bjarngard i Edgers (1990) su prikazali tok sleganja u vremenu, za 24 različite deponije (Slika 7.8).



Slika 7.8. Vremenski osmatrana sleganja na različitim deponijama (Bjarngard i Edgers, 1990)

Kao što se može videti, većina tih krivih pokazuje relativno blagi nagib (odnosno male vrednosti C_{α}') za rani vremenski period, ali se nagib krive znatno povećava sa povećanjem vremena pa vrednost C_{α}' značajno raste (Slika 7.9). Znatno veći nagib u poodmakloj fazi kompresije, pripisuje se većem raspadanju otpada.



Slika 7.9. Idealizovana kriva zavisnosti deformacije deponije u vremenu (Bjarngard i Edgers, 1990)

Machado i dr. (2002) navode da vrednosti C_{α}' variraju između 0.012 i 0.016, a za prosečnu vrednost predlažu 0.013.

7.2. METODE I PROGRAM ISPITIVANJA

Postoje različiti pristupi problematici određivanja parametara stišljivosti komunalnog otpada. Konvencionalan način laboratorijskog određivanja kompresionih i konsolidacionih karakteristika je izvođenje edometarskog opita. Terenski pristup se zasniva na merenjima tokom odlaganja otpada koja se kasnije koriste da bi se povratnim analizama odredili parametri deformabilnosti. Često se koriste i tehnike poređenja aerostimaka, geodetsko osmatranje referentnih tačaka pa i podaci o sleganju deponije na različitim dubinama (mogu se dobiti postavljanjem optičkih deformacionih senzora).

7.2.1. Metode ispitivanja sa opisom aparata za izvođenje opita

Izvođenje edometarskih opita na uzorcima komunalnog otpada takođe podrazumeva obezbeđenje neophodnog odnosa granulometrijskog sastava različitih materijala u odnosu na dimenzije korišćene opreme. Preporuke, tj. zahtevi koji su već ranije napomenuti (EN 1997-2, ASTM 2007-a, 2007-b) vezani su za odnos najmanje dimenzije ispitivanog uzorka (visine uzorka - h), prema najvećoj dimenziji

nehomogenosti (tj. veličini najkrupnije frakcije u uzorku – d) i u ovom slučaju treba da zadovoljen uslov $h/d \geq 5$. Pored toga, dodatni zahtev je odnos prečnika (D) i visine ispitivanog uzorka (h) koji treba da je $D/h \geq 2.5$.

Konvencionalne laboratorije raspolažu sa aparatima u kojima je moguće ispitivanje uzoraka dimenzija: prečnika $D = 7.0$ cm i visine $h = 2.0-2.5$ cm, a izuzetno prečnika $D = 10.0$ cm i visine $h = 4.0$ cm. Vrlo su retki edometarski aparati u kojima se ugrađuju uzorci većih dimenzija, recimo prečnika $D = 50.0$ cm i visine $h = 20.0$ cm. Kada je u pitanju komunalni otpad, izrađuju se i specijalne kompresione ćelije u kojima je moguće simulirati ponašanje otpada, kada je on izložen ubrzanoj degradaciji pod regulisanim uslovima. To su ćelije koje omogućuju povremeno dodavanje i stalnu recirkulaciju filtrata kao i gasova (u prvom redu vazduha) koji podstiču biodegradaciju otpada. Da bi se simulirale različite faze raspadanja, od svežeg pa do raspadnutog otpada, izrađuju se i specijalni laboratorijski reaktori koji su projektovani da simuliraju raspadanje u klasičnoj, ali i u bioreaktorskoj deponiji.

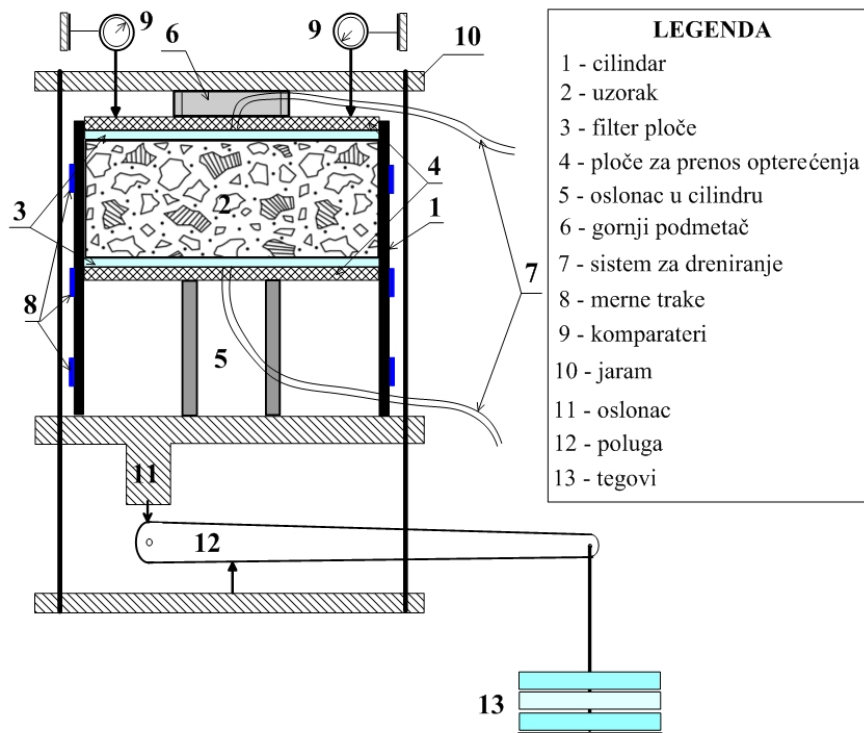
Za potrebe ove disertacije, sva ispitivanja obavljena su u laboratoriji za mehaniku tla Rudarsko-geološkog fakulteta u Beogradu tokom 2010 i 2011 god. Pri tome su korišćeni klasični edometarski aparati prečnika $D = 10$ cm i visine uzorka $h = 4$ cm (Slika 7.10).



Slika 7.10. Edometarski aparati sa dimenzijama prstena $D = 100$ mm i $h = 40$ mm – RGF Beograd

Pored toga, za potrebe ovih ispitivanja koncipirano je i urađeno jedno novo, inovaciono tehničko rešenje, koje se odnosi na edometarski aparat većih dimenzija. U pitanju je edometarski aparat prečnika $D = 20$ cm i visine 20 cm, u koji je moguća ugradnja uzorka visine $h = 8$ cm i veće. Debljina zida edometarskog prstena je 2 mm a izgrađen je od berilijum-bronze koja je otporna na agresivno dejstvo - koroziju otpada koji se ispituje. Ova debljina ćelije izabrana je zbog eventualnih mogućnosti merenja i bočnih napona. Mogućnost ugradnje uzoraka različite visine, obezbeđena je odgovarajućim izdizanjem oslonca u samom cilindru, odnosno pomeranjem njegove donje površine.

Kada su u pitanju ćelije većeg prečnika, poteškoću predstavlja način nanošenja neophodne sile kojom se obezbeđuje potreban napon (preko 100 kPa). U vezi sa tim, koncipirana je i nova platforma za opterećenje pomoću koje se obezbeđuje neophodna sila. Pored veličine sile, obezbeđena je i njena konstantnost u relativno dugom vremenskom periodu, tako da odsustvo električnog napajanja nema uticaj na izvođenje opita. Skica edometarskog aparata prečnika $D = 20$ cm i njegov izgled, prikazani su na Slikama 7.11 i 7.12.



Slika 7.11. Šematski prikaz edometarskog aparata i sistema za opterećenje

Na materijalima kod kojih je izražena sekundarna kompresija, kao što je slučaj sa komunalnim otpadom, edometarski opit traje dosta dugo – više meseci, a samo jedan stupanj opterećenja traje po nekoliko nedelja pa i meseci. Iz tog razloga vremensko praćenje vertikalnih deformacija može da predstavlja problem, jer se se na početku nanošenja opterećenja obavi veliki deo vertikalnih deformacija u veoma kratkom vremenskom intervalu (u pitanju su sekunde). S obzirom da je merenje deformacija tokom jednog stupnja opterećenja neravnomerno tj. u početku vremenski učestalo a kasnije se vremenski intervali proređuju, bilo je neophodno osmisliti i način za njihovo praćenje. Zbog toga je urađeno još jedno inovativno tehničko rešenje koje se odnosi na sistem akvizicije podataka.



Slika 7.12. Izgled edometarskog aparata i sistema za opterećenje

Za merenje pomeranja odabran je komparater – merni sat Vogel, tipa 242042, renomiranog proizvođača iz Nemačke (Slika 7.13), sa mernim opsegom od 0 – 12.5 mm i rezolucijom od 0.01 mm. Izabrani komparater je bez unutrašnjih mehaničkih pokretnih delova i obezbeđuje trenutno praćenje pomeranja, bez vremenskog kašnjenja. Pored toga, ovaj komparater ima i displej za manualno očitavanje, kao i digitalni izlaz koji omogućuje povezivanje na sistem za prikupljanje izmerenih podataka.



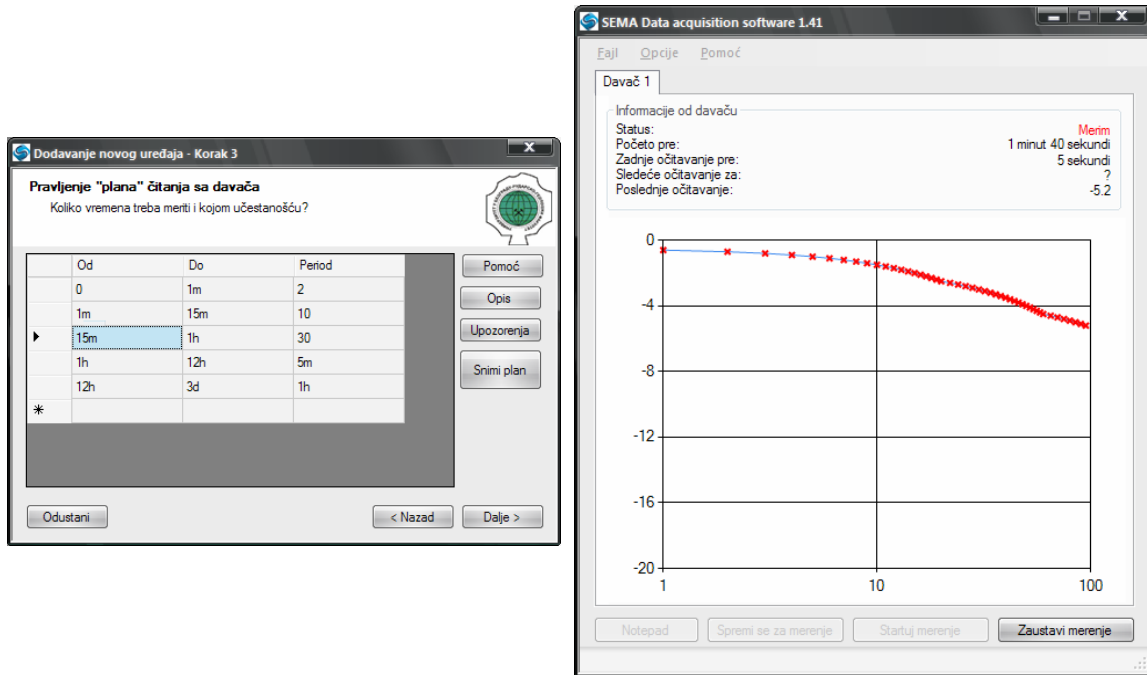
Slika 7.13. Merni sat – komparater Vogel tipa 242042, Germany

Digitalni komparateri povezni su sa računarom pomoću: DT Vogelovog boxa, SY4 kablova i specijalnog „Shema Box-a” koji je priključen na LPT port računara. Sistem povezivanja prikazan je na Slici 7.14.



Slika 7.14. Povezanost sistema za akviziciju mernih vrednosti

Ovako osmišljen akvizicioni sistem, zahtevao je efikasni nadzor i upravljanje prilikom izvođenja edoemtarskih opita, što je podrazumevalo i izradu odgovarajućeg softvera. U laboratoriji za mehaniku tla Rudarsko-geološkog fakulteta iz Beograda, realizovan je softver *DAS 1.41 – Data acquisition software*. Softver sadrži: grafički interfejs, animiranje procesa, hronološko praćenje procesa u vremenu, prikupljanje podataka, čuvanje podataka i na kraju generisanje izveštaja. Ovim softverom je omogućeno automatsko preuzimanje podataka o vertikalnim pomeranjima sa digitalnih komparatera, kao i planiranje i pristup podacima merenja u bilo kom vremenu. Izgled ekrana, sa karakterističnim opcijama softvera (plan merenja i grafički prikaz rezultata), prikazan je na Slici 7.15.



Slika 7.15. Izgled ekrana za unošenje plana merenja sa prikazom rezultatima merenja

7.2.2. Program laboratorijskih ispitivanja

Edometarska ispitivanja izvedena su u fazama koje su podrazumevale: pripremu i ugradnju materijala određenih zapreminskih težina u edometarske prstenove, ugradnju prstenova u edometarske aparate, stupnjevito nanošenje opterećenja sa kontrolisanim priraštajem vertikalnih napona u dužim vremenskim intervalima i na kraju rasterećenje.

7.2.2.1. Priprema uzoraka

Priprema uzoraka za edometarska ispitivanja je obavljena na sličan način kao i priprema uzoraka za određivanje parametara čvrstoće smicanja, koja je već opisana u Poglavlju 6. I u ovom slučaju ispitivanja su obavljena na komunalnom otpadu iz deponija Ada Huja i Novi Sad. Sastav komunalnog otpada sa ovih deponija ranije je opisan u Poglavljima 4 i 6. Sa obe deponije pripremljena je približno ista masa materijala, od po 3 kg, što je dva puta veće od mase koja je upotrebljena za formiranje svih uzoraka. Materijal je takođe prethodno homogenizovan, izmešan i usitnjen kako bi se dobila zadovoljavajuća veličina frakcija (Slika 7.16). S obzirom na dimenzije korišćenih aparata, osnovna

razlika u pripremi uzoraka odnosila se na veličinu čestica. Za ispitivanja koja su obavljena u edometarskim aparatima prečnika $D = 10$ cm, maksimalna veličina čestica iznosila je 2 cm, dok je maksimalna veličina čestica u edometarskoj ćeliji prečnika $D = 20$ cm iznosila 4 cm. Manji maseni deo plastičnih frakcija (ne više od 7 %), sadržao je i izdužene – jednodimenzionalne čestice sa dužinom ne većom od 8 cm. Granulometrijski sastav ispitanog materijala je prikazan u Poglavlju 3 na Slici 3.16.



Slika 7.16. Priprema materijala za ispitivanja

Na ovako pripremljenom materijalu, izvršeno je četvrtanje, tako da su iz otpada sa obe deponije dobijene po četiri probe, svaka od po 0.7 – 0.75 kg. Nakon toga, iz svake probe je izmerena masa koja je bila neophodna da bi se formirali uzorci za koje su unapred definisane zapreminske težine. Ovako odmerene mase odložene su u plastične kese, a iz preostalog materijala uzeti su manji uzorci koji su iskorišćeni za određivanje vlažnosti (vlažnost uzorka pre opita). Ostatak materijala sa obe deponije je pomešan, i kasnije je iskorišćen za formiranje uzorka koji je ispitan u velikoj edometarskoj ćeliji. Za ovaj opit pripremljena je masa otpada od približno 5 kg.

Formiranje uzoraka obavljeno je tako što je kompletan materijal, iz odloženih plastičnih kesa, direktno ugrađivan u edometarske prstenove, utiskivanjem i zbijanjem u horizontalnim slojevima, kako bi uzorci reprezentovali način odlaganja otpada na deponijama (Slika 7.17). Na ovaj način su za obe deponije formirana po četiri uzorka sa zapreminskim težinama $\gamma = 9.5, 10.0, 10.5$ i 11.0 kN/m^3 . Zapreminska težina uzorka, koji je ispitan u velikoj edometarskoj ćeliji, iznosila je $\gamma = 10.0 \text{ kN/m}^3$. Prema preporukama Zekkos et al. (2006), može se reći da su ovo tipične vrednosti

zapreminskih težina za većinu deponija koje sadrže veći procenat tla. Razlog za to je upotreba zemljastog materijala za prekrivke, odnosno, deponija na kojima se praktikuje zbijanje otpada.



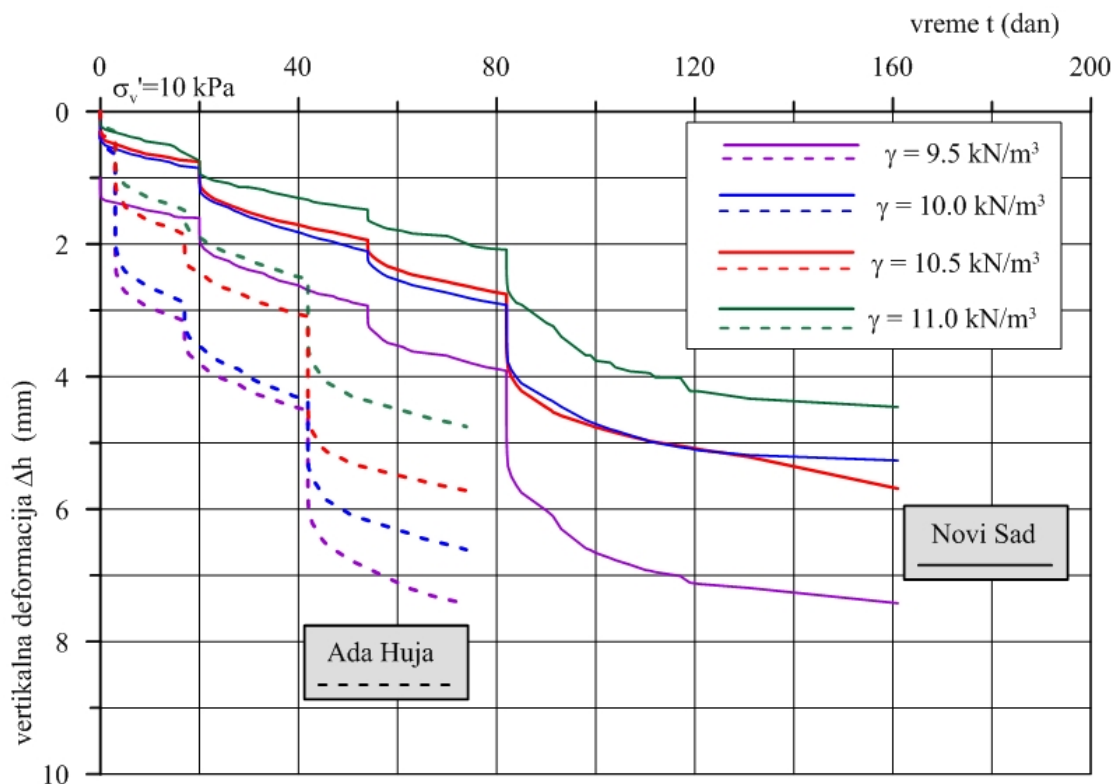
Slika 7.17. Formiranje uzorka u velikoj edometarskoj ćeliji – a); izgled uzorka nakon obavljenog sušenja – b)

Na ovaj način su formirani uzorci tri serije. Uzorci serija A formirani su od materijala sa deponije Ada Huja, serije B od materijal sa deponije u Novom Sadu, a serije C od izmešanog otpada sa obe deponije. Iz serije A i B formirana su i ispitana po četiri uzorka, a iz serije C jedan. Seriju A činili su uzorci: U-1, U-2, U-3 i U-4, a seriju B uzorci: U-5, U-6, U-7 i U-8. Uzorak serije C, ispitani je u velikom edometarskom aparatu i označen je kao U-9 (Rakić i dr. 2010)..

7.2.2.2. Postupak ispitivanja

Nakon formiranja svih uzoraka iz jedne serije u prstenove, pristupilo se njihovoj ugradnji u edometarske aparate. Ovako pripremljeni uzorci su ostavljeni 24 h, a nakon toga je nanet je prvi stupanj opterećenja i započelo se sa merenjem vertikalnih deformacija, u određenim vremenskim intervalima. Kod svih uzoraka iz serija A i B, opterećenja su nanošena stepenasto, a izabrane su sledeće vrednosti vertikalnih napona: 10 – 30 – 50 – 150 kPa (100 kPa za seriju B) koji su konstantno održavani. Uzorak U-9 ispitani je u velikom edometarskom aparatu (serija C) i opterećen je sa tri stupnja opterećenja i to: 11 – 32 – 53 kPa. Ukupno trajanje opita za uzorke iz serija A iznosilo je 74 dana, za uzorke iz serije B 161 dan, a za uzorak iz serije C 146 dana.

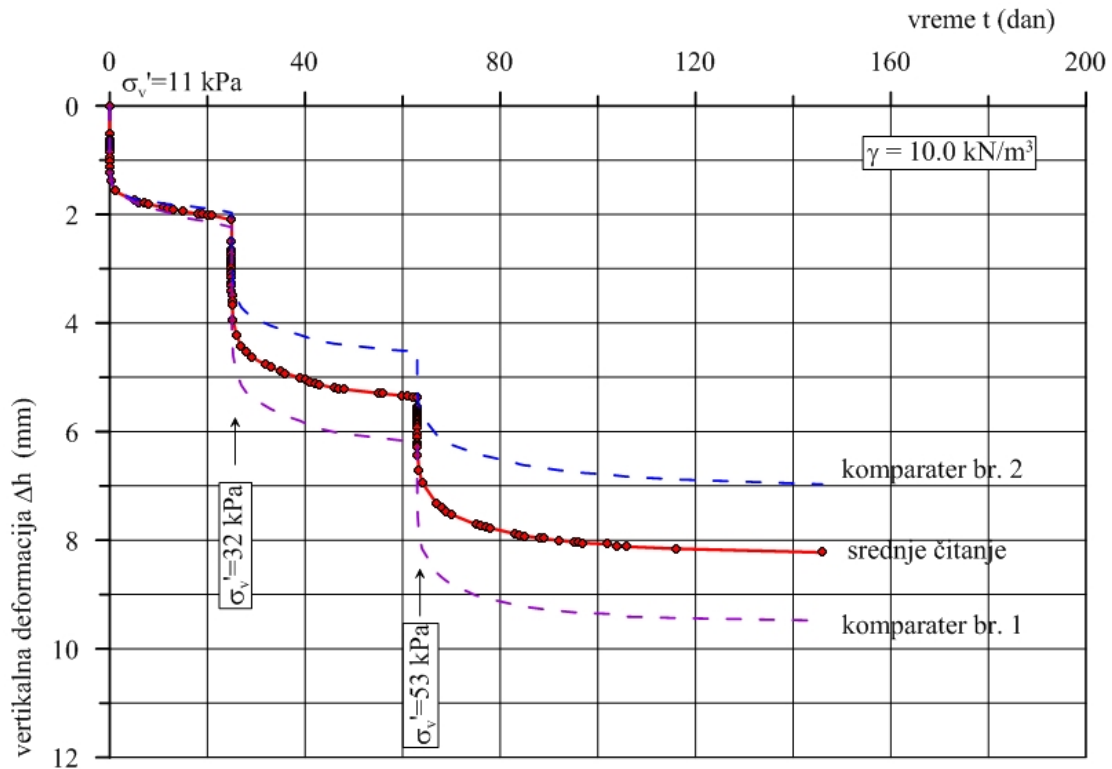
Vremena opterećenja razlikovala su se od stupnja do stupnja i od uzorka do uzorka, a kretala su se od min. 3 dana za seriju A i za stupanj opterećenja od 10 kPa, pa do max. 83 dana za uzorak iz serije C za stupanj opterećenja od 53 kPa (Slike 7.18 i 7.19). Tokom opita, uzorci nisu dodatno provlažavani.



Slika 7.18. Zavisnost vreme-deformacija za uzorke iz serija A i B

S obzirom na veću površinu uzorka iz serije C, merenje vertikalnih deformacija obavljeno je sa dva komparatera. Prvi komparater je postavljen na gornji ram edometarske ćelije u centralnom delu, a drugi komparater je postavljen u zoni prednjeg dela ploče preko koje se vrši prenošenje opterećenja (Slika 7.12). Ovo je učinjeno zato da bi se tokom opterećenja ustanovila eventualna rotacija površine preko koje se vrši prenošenje opterećenja. Merenjima je potvrđeno da se, sa ovakvom konstrukcijskom koncepcijom, obezbeđuje minimalna rotacija opterećene površine.

S obzirom da su komparateri pokazali izvesne razlike prilikom merenja vertikalnih deformacija, za dalje analize korišćena je osrednjena vrednost (Slika 7.19).



Slika 7.19. Zavisnost vreme- vertikalna deformacija za uzorak U-9 koji je ispitan u velikoj edometarskoj ćeliji

Po završetku opterećenja sa najvećim stupnjem, izvršena su kratkotrajna rasterećenja u trajanju od po 10 minuta i to: 50 – 30 – 10 – 0 kPa, odnosno: 32 – 11 – 0 kPa.

Tokom ispitivanja su prikupljeni podaci o vertikalnom vremenskom sleganju usled dejstva napona kao i osnovne - početne fizičke karakteristike uzorka kao što su: zapreminska težina, vlažnost i granulometrijski sastav materijala (Rakić i dr. 2010).

7.3. PRIKAZ REZULTATA ISPITIVANJA

U nastavku tekst su prikazani rezultati ispitivanja deformabilnih karakteristika sa osnovnim karakteristikama ispitivanih uzoraka - u zavisnosti od lokacije komunalnog otpada.

7.3.1. Prikaz rezultata ispitivanja uzoraka serije A

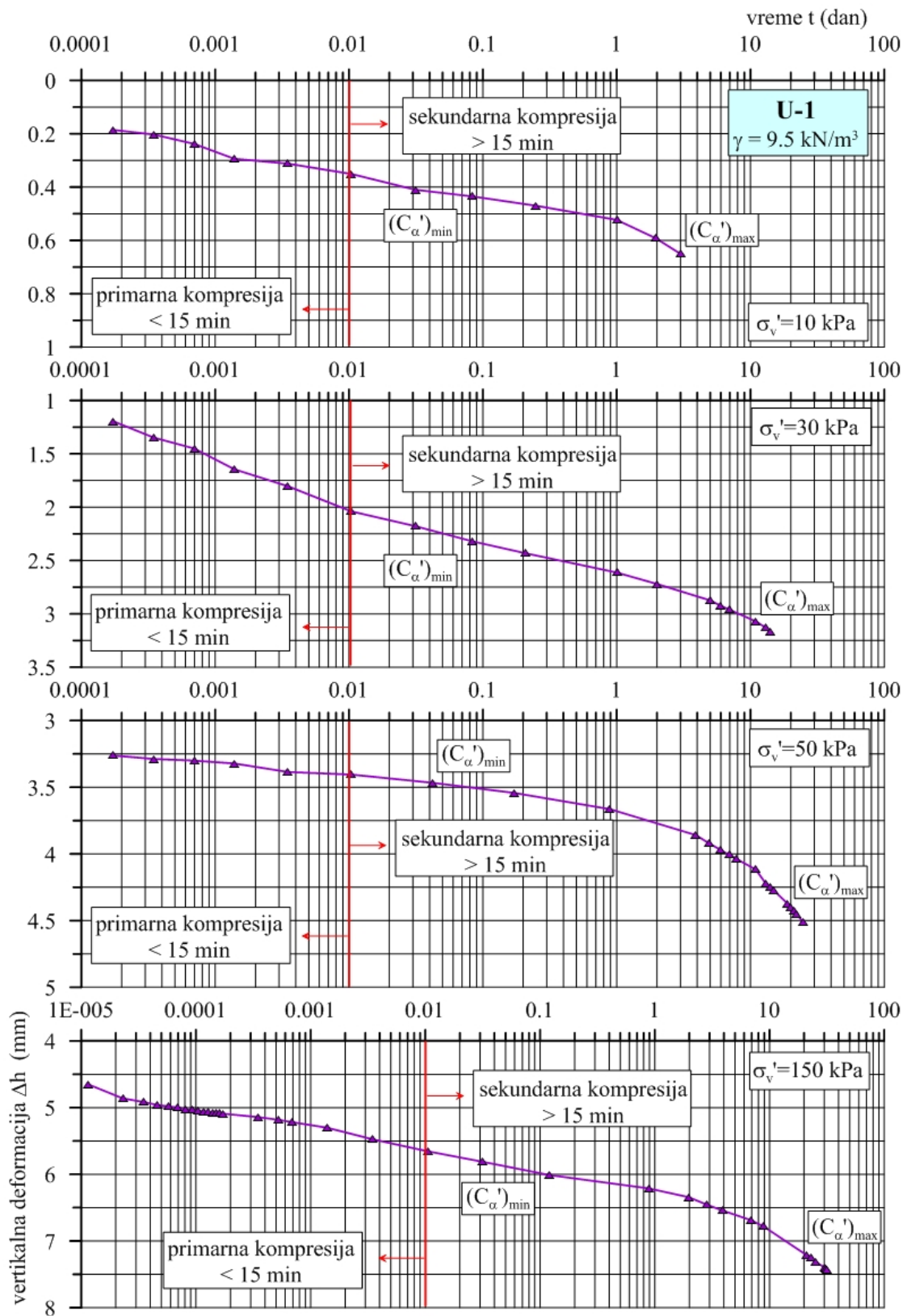
Osnovne fizičke karakteristike uzoraka iz deponije Ada Huja (serija A), koji su korišćeni za izvođenje edometarskih opita, prikazane su u Tabeli 7.1.

Tabela 7.1. Osnovne fizičke karakteristike ispitanih uzoraka iz serije A – deponija Ada Huja

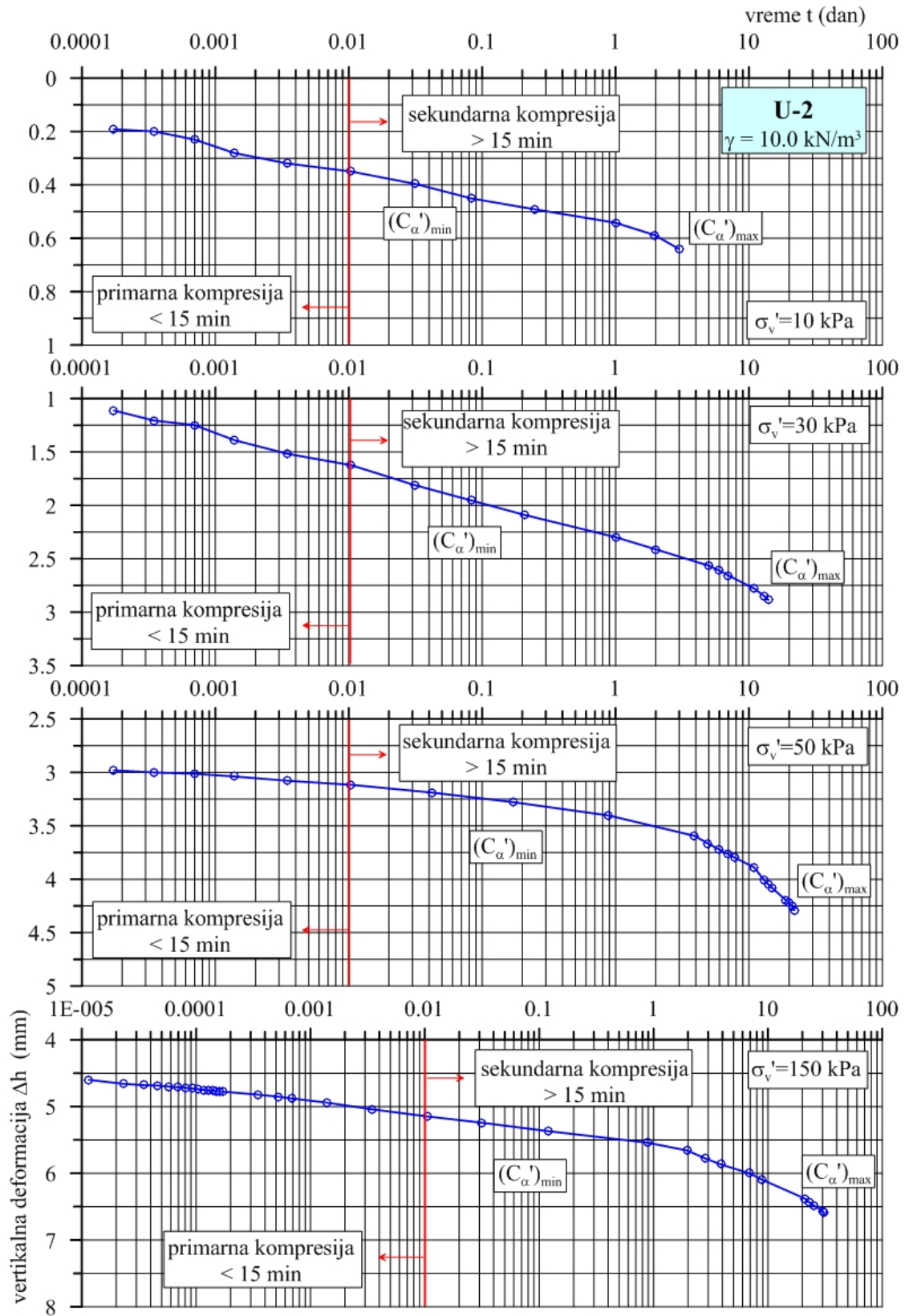
Ser. A	Identifikaciono-klasifikacioni pokazatelji								Edometarski opit			
	tež. frakcija		w		G _s	e ₀	S _r	γ		σ' _v	Δh	ε = Δh/h
	d < 20 mm	d (20-80mm)	pre opita	posle opita				pre opita	posle opita			
	(%)		(%)		-	-	(%)	(kN/m ³)		(kN/m ²)	(mm)	(%)
U-1	94.3	5.7	27.5	17.2	2.20	1.952	31	9.5	10.2	10	0.650	1.63
										30	3.170	7.93
										50	4.511	11.28
										150	7.438	18.60
U-2	93.4	6.6	39.1	22.4	2.20	2.060	42	10.0	10.8	10	0.640	1.60
										30	2.887	7.22
										50	4.356	10.89
										150	6.612	16.53
U-3	93.2	6.8	37.5	21.2	2.20	1.882	44	10.5	11.1	10	0.432	1.08
										30	1.861	4.65
										50	3.090	7.73
										150	5.720	14.30
U-4	95.3	4.7	30.7	19.8	2.20	1.614	42	11.0	11.4	10	0.300	0.75
										30	1.492	3.73
										50	2.526	6.32
										150	4.754	11.89

S obzirom da je tokom opita površina uzorka bila konstantna, promena zapremine je izračunata na osnovu promene visine uzorka (Δh). Kako je masa uzorka merena i nakon završetka opita, izračunat je i porast-smanjenje zapreminske težine na kraju opita. Na osnovu izvršenih ispitivanja, na slikama 7.20 do 7.23 je prikazano sleganje ispitivanih uzoraka u funkciji vremena. Svi uzorci iz ove serije su prvo opterećeni sa 10 kPa, a nakon toga opterećenje je stupnjevito povećavano na 30, 50 i 150 kPa. Vreme trajanja opterećenja razlikovalo se, pa je tako prvi stupanj trajao 3 dana, a svaki naredni vremenski interval je povećavan na 14, 25 i 32 dana, te je ukupno trajanje opita iznosilo 74 dana.

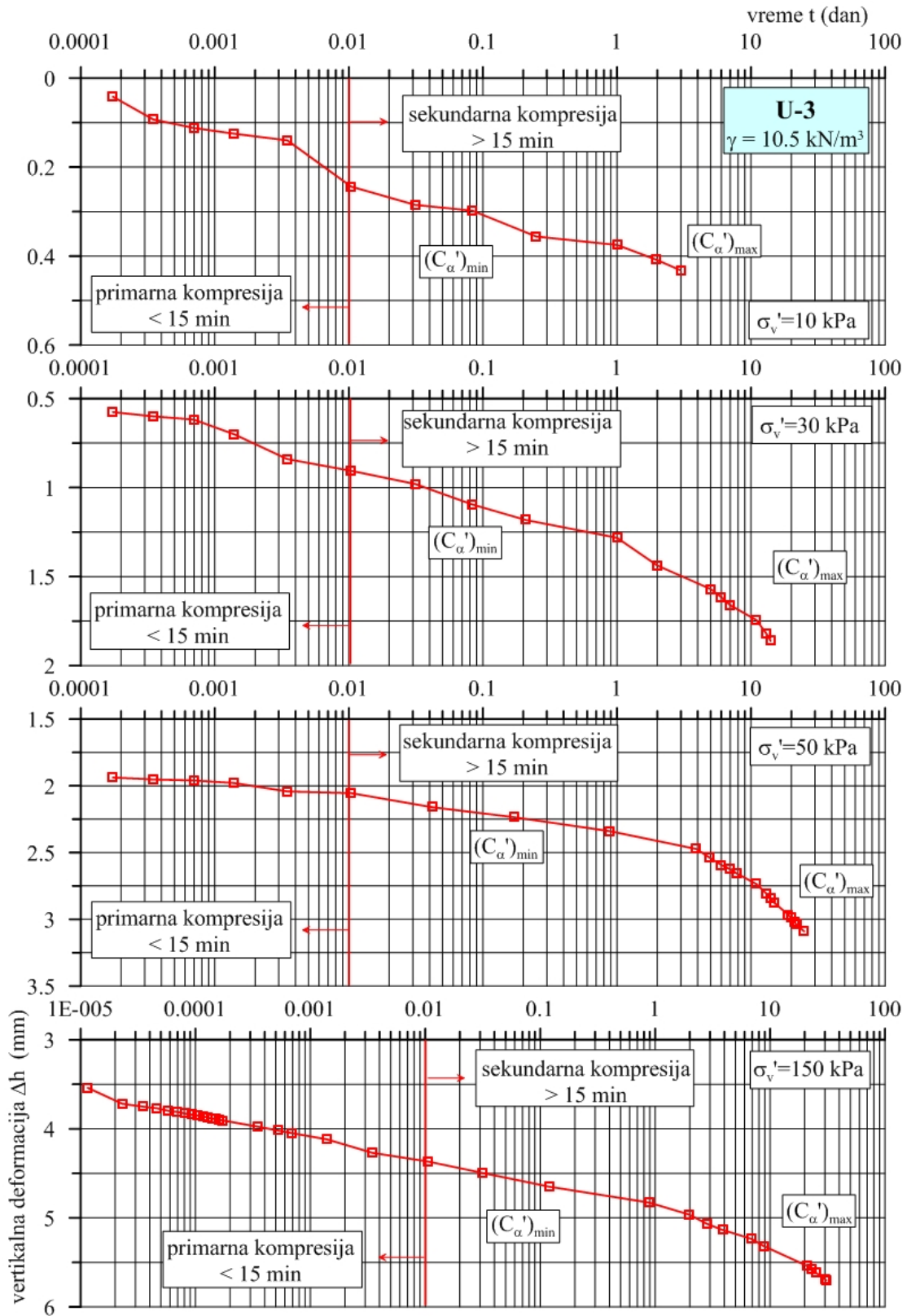
Prilikom ispitivanja uzoraka iz ove serije, prethodno opisani sistem za akviziciju podataka još uvek nije bio u funkciji, tako da su vertikalne deformacije očitavane u standardnim vremenskim intervalima koji se koriste i kod ispitivanja tla. Na uzorcima koji su opterećeni sa 150 kPa, vertikalne deformacije snimane su kamerom. Na osnovu video zapisa, u prvih 15 sec., one su registrovane na svaki sekund, a kasnije se nastavilo sa uobičajenim očitavanjima.



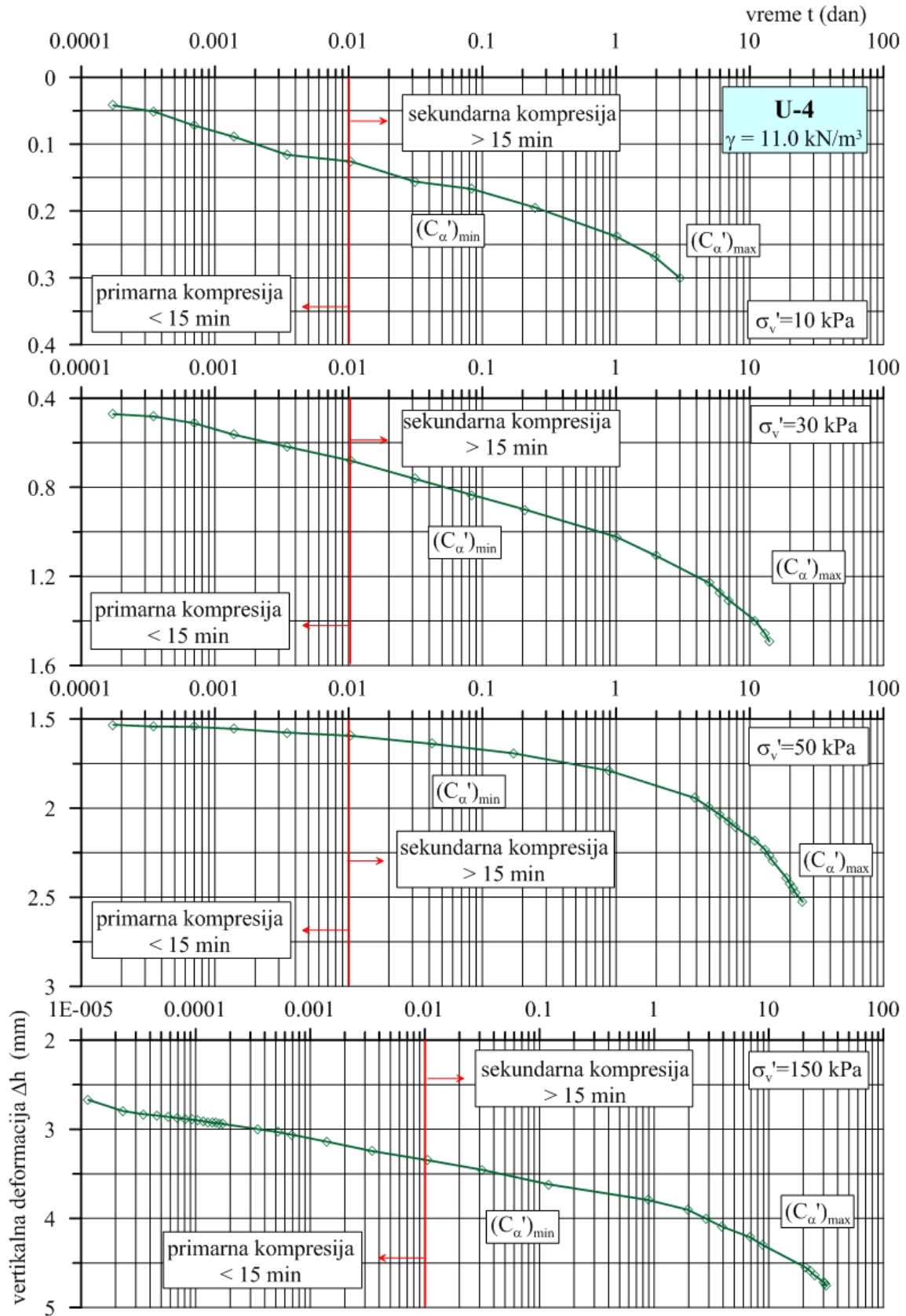
Slika 7.20. Vremensko sleganje uzorka U-1 iz serije A



Slika 7.21. Vremensko sleganje uzorka U-2 iz serije A



Slika 7.22. Vremensko sleganje uzorka U-3 iz serije A



Slika 7.23. Vremensko sleganje uzorka U-4 iz serije A

Ovi rezultati su pokazali da su vertikalne deformacije jasno izražene u prvih nekoliko sekundi. Ovo je u skladu sa napred već rečenim, da je primarna deformacija kod komunalnog otpada izražena odmah nakon nanošenja opterećenja.

7.3.1.1. Indeks i modifikovani indeks sekundarne kompresije

Na osnovu prikazanih rezultata koji se odnose na uzorke serije A, može se videti da u ranom vremenskom periodu, dijagrami sleganja pokazuju izvesno rasipanje rezultata (naročito pri nižem stupnju opterećenja od 10 kPa). Nakon toga imaju ustaljeni, relativno blagi trend, koji se kasnije značajnije povećava sa vremenom. Ono što je takođe evidentno je i to da pri malim stupnjevima opterećenja sekundarna kompresija nije izražena, ali sa povećanjem opterećenja ona postaje istaknutija. To ukazuje na činjenicu da indeks sekundarne kompresije nije konstantan, već da njegova vrednost vremenom raste.

Osim toga, bez obzira na dužinu trajanja opita od 74 dana, nisu konstatovana nagla „propadanja“ koja mogu biti česta kada je u pitanju komunalni otpad (McDougall i Pyrah, 2001; McDougall i dr., 2004). Eventualno se to može reći za uzorak U-3, pri najnižem stupnju opterećenja. U vezi sa tim pomenuti autori predlažu i mogući mehanizam kompresije komunalnog otpada koji se dovodi u vezu sa raspadanjem otpada i „faznim promenama“ pojedinih čestica otpada u toku procesa raspadanja.

Jedan od rezultata u ranoj fazi raspadanja otpada jeste povećanje veličina pora bez značajnog smanjenja zapremine. Naime, čvrsti skelet zbog raspadanja postepeno slabi, kasnije u određenom trenutku više ne može da se suprotstavi sopstvenoj težini, čime dolazi do propadanja-urušavanja. Na taj način se otpad privremeno sabija, a daljim raspadanjem stvaraju se nove pore i proces se ponavlja. Povećanje pora i česta urušavanja za vreme degradacije otpada, jedan su od glavnih faktora koji utiču na sekundarnu kompresiju.

Za potrebe ove disertacije, a na osnovu analize rezultata prikazanih na dijagramima, indeks sekundarne kompresije je sračunat tako što je za početak sekundarne kompresije

usvojeno vreme od oko 15 min. Ovde naglašavam da su i drugi istraživači uvodili slične pretpostavke o trajanju primarne i početku sekundarne kompresije (Landva i dr., 2000; Hossain, 2002; Singh, 2008). Očigledno je da prelaz od primarne ka sekundarnoj kompresiji nije jasno definisan, ali je uobičajeno da se pod sekundarnom kompresijom smatraju deformacije nastale usled kombinovanih uticaja vezanih za krivljenje, savijanje, lomljenje i preorijentaciju različitih čestica komunalnog otpada.

Vrednosti indeksa i modifikovanog indeksa sekundarne kompresije su određene za sve stupnjeve opterećenja, posebno za blaži a posebno za stmiiji deo krive. S obzirom na karakter deformacija, sa blažeg dela dijagrama, određene su njihove minimalne vrednosti $(C_{\alpha})_{\min}$ i $(C_{\alpha}')_{\min}$, dok su sa strmijeg dela dijagrama, koji se po pravilu javljao nakon 1 do 5 dana, određene maksimalne vrednost $(C_{\alpha})_{\max}$ i $(C_{\alpha}')_{\max}$.

Sračunate vrednosti minimalnih i maksimalnih indeksa sekundarne kompresije, kao i modifikovanih indeksa sekundarne kompresije, u zavisnosti od stupnja opterećenja, prikazane su u Tabeli 7.2.

Tabela. 7.2. Vrednosti indeksa i modifikovanog indeksa sekundarne kompresije

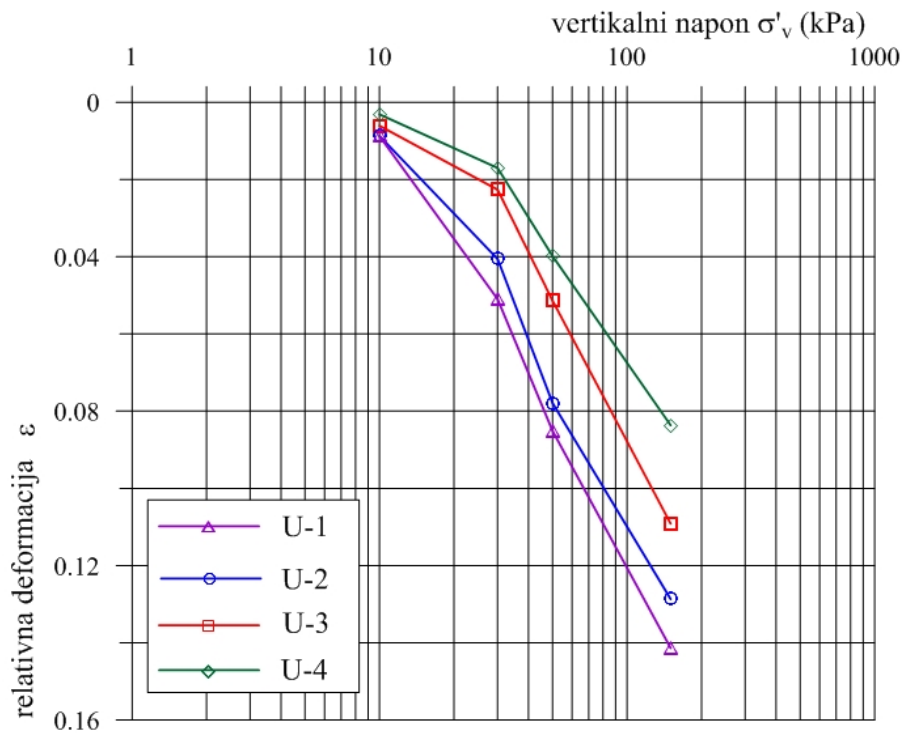
Uzorak	e_0	σ'_v	$(C_{\alpha}')_{\min}$	$(C_{\alpha})_{\min}$	$(C_{\alpha}')_{\max}$	$(C_{\alpha})_{\max}$
	-	kPa	-	-	-	-
U-1	1.952	10	0.0017	0.0050	0.0085	0.0251
		30	0.0070	0.0208	0.0247	0.0728
		50	0.0038	0.0113	0.0271	0.0800
		150	0.0066	0.0194	0.0288	0.0851
U-2	2.060	10	0.0023	0.0070	0.0089	0.0272
		30	0.0082	0.0250	0.0268	0.0820
		50	0.0039	0.0121	0.0302	0.0926
		150	0.0053	0.0162	0.0245	0.0750
U-3	1.882	10	0.0017	0.0048	0.0038	0.0111
		30	0.0053	0.0152	0.0203	0.0586
		50	0.0037	0.0106	0.0250	0.0721
		150	0.0057	0.0168	0.0259	0.0746
U-4	1.614	10	0.0012	0.0032	0.0047	0.0125
		30	0.0043	0.0112	0.0182	0.0476
		50	0.0026	0.0068	0.0240	0.0628
		150	0.0060	0.0156	0.0256	0.0668

Može se reći da su se za ovu seriju uzoraka (koja reprezentuje stariji otpad – starosti preko 40 god.) vrednosti indeksa sekundarne kompresije kretale u intervalu $(C_{\alpha})_{\min} = 0.0032 - 0.025$, odnosno $(C_{\alpha})_{\max} = 0.011 - 0.093$.

7.3.1.2. Indeks i modifikovani indeks primarne kompresije

Kao što je već rečeno a prikazano je i na Slikama od 7.20 – 7.23, vreme od 15 min. Je usvojeno kao završetak primarne i početak sekundarne kompresije.

Zavisnost između vertikalnog efektivnog napona i deformacija ostvarenih u fazi primarnog sleganja, prikazana je polu-logaritamskim dijagramom na Slici 7.24.



Slika 7.24. Zavisnost napona i deformacija u fazi primarne kompresije

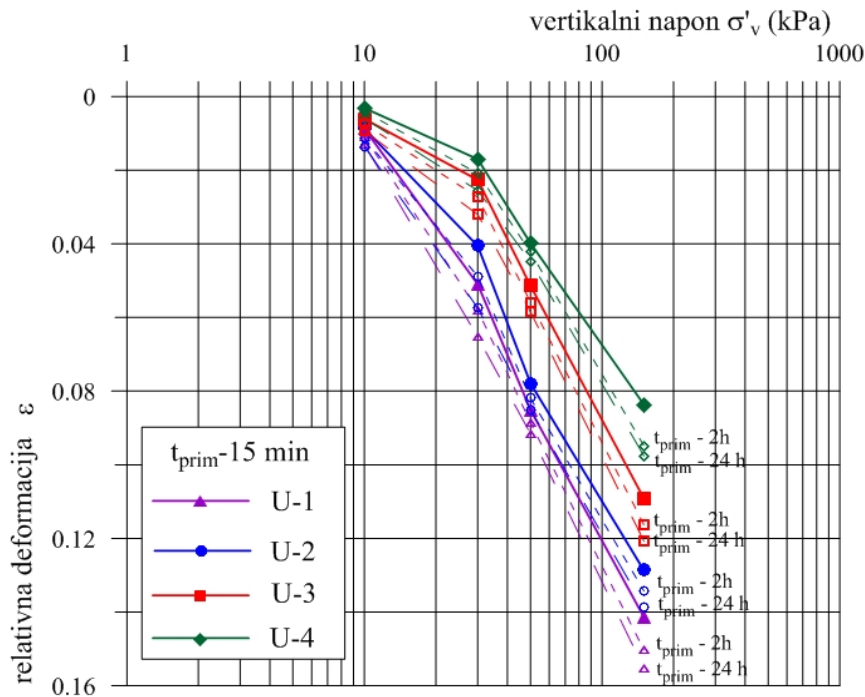
Ako se zanemare deformacije pri vertikalnom naponu od 10 kPa, ova zavisnost se može predstaviti pravom linijom. Taj deo zavisnosti, iskorišćen je za određivanje modifikovanog indeksa primarne kompresije (C_c'), a rezultati su prikazani u Tabeli 7.3.

Dobijene vrednosti indeksa primarne kompresije (za A seriju uzoraka koja reprezentuje stariji otpad) nalaze se u intervalu $C_c = 0.267-0.369$, i može se reći da se relativno dobro slažu sa prosečnim vrednostima koje su pomenute u poglavlju 7.1.2. Rezultati pokazuju da postoji opšti trend opadanja C_c sa porastom vertikalnih napona (Rakić, 2011b).

Tabela. 7.3. Vrednosti indeksa i modifikovanog indeksa primarne kompresije

Uzorak	e_0	σ'_v	$\varepsilon = \Delta h_{15 \text{ min}} / h_0$	C_c	C_c'
	-	kPa	-	-	-
U-1	1.952	10	0.0088	0.369	0.125
		30	0.0510		
		50	0.0851		
		150	0.1414		
U-2	2.060	10	0.0088	0.376	0.123
		30	0.0406		
		50	0.0779		
		150	0.1287		
U-3	1.882	10	0.0061	0.352	0.122
		30	0.0227		
		50	0.0514		
		150	0.1092		
U-4	1.614	10	0.0032	0.267	0.102
		30	0.0170		
		50	0.0399		
		150	0.0837		

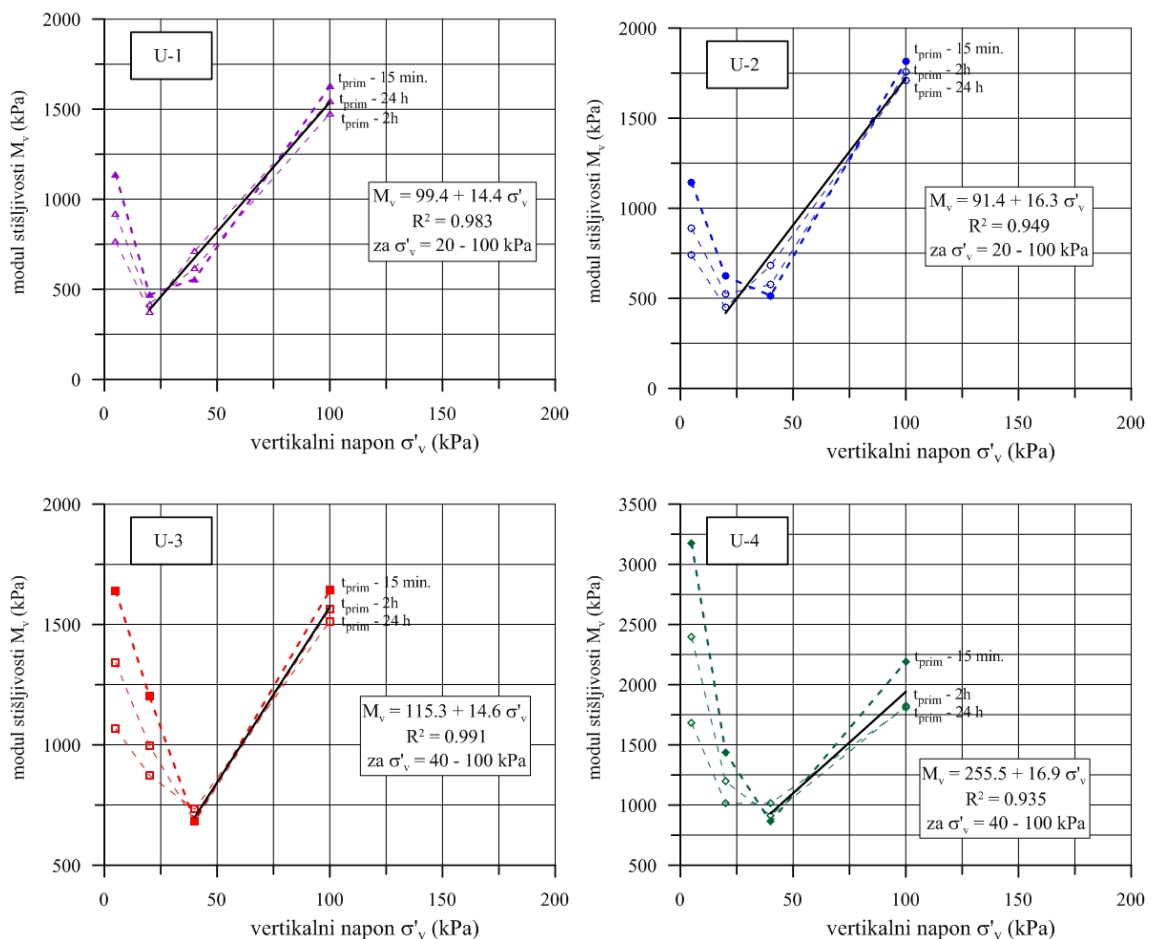
S obzirom da vreme primarne kompresije nije precizno definisano, analiza je urađena i za vremena od 2h i 24h. Rezultati su prikazani na Slici 7.25 i može se konstatovati da su dobijene skoro identične vrednosti, a neznatno povećanje od oko 3 % sračunato je samo za uzorak U-4, za koji je indeks primarne kompresije iznosio $C_c = 0.275$.



Slika 7.25. Zavisnost napona i deformacija za različito vreme primarne kompresije

7.3.1.3. Modul stišljivosti

Modul stišljivosti sračunat je na osnovu jednačine 7.2. Korigovana visina uzorka izračunata je na osnovu izraza 7.4, a za promenu visine uzorka uzeta je deformacija ostvarena u fazi primarne kompresije. Kao i kod proračuna indeksa primerne kompresije, pored deformacija očitanih nakon 15 min, modul stišljivosti je sračunat i za deformacije nakon 2h i 24h. Kako ove deformacije ne uključuju i sekundarnu komresiju, to vrednosti modula stišljivosti ne obuhvataju uticaj raspadanja otpada. Rezultati za uzorke iz ove serije, prikazani su dijagramima na Slici 7.26.



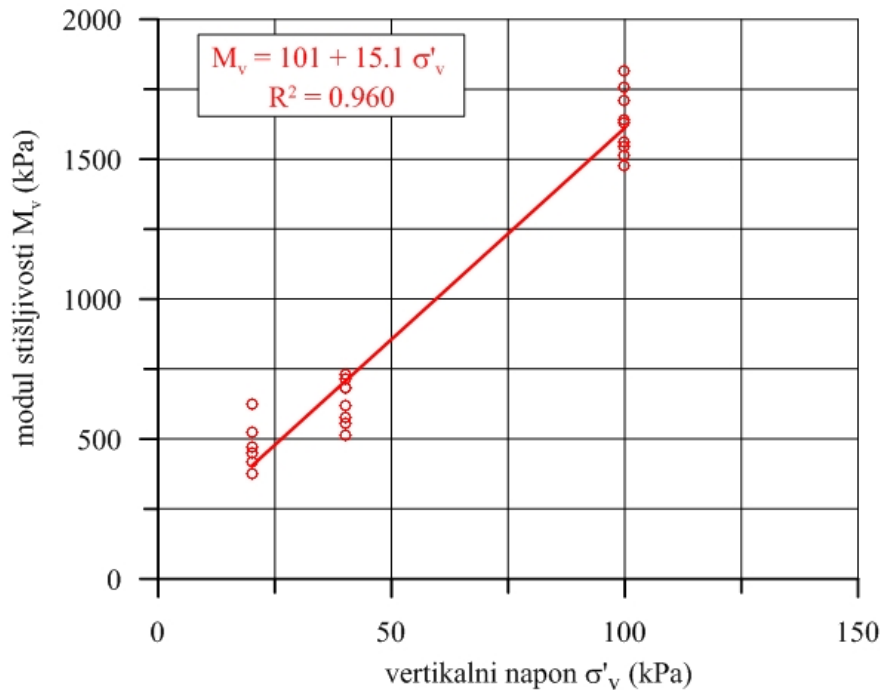
Slika 7.26. Vrednosti modula stišljivosti za uzorke iz serije A

Može se videti da u zavisnosti od početne zbijenosti uzoraka (zapreminske težine), vrednosti modula rastu od min. 470 kPa za raspon opterećenja od 10 – 30 kPa (uzorak U-1), do max. 2190 kPa za raspon opterećenja od 50 – 150 kPa (uzorak U-4). Ako se

zanemare vrednosti modula stišljivosti za početni raspon opterećenja od 0 – 10 kPa, za uzorke U-1 i U-2, odnosno, 0 – 10 – 30 kPa, za uzorke U-3 i U-4, sa velikom tačnošću može se uspostaviti linearna zavisnost modula stišljivosti i vertikalnog napona.

Na osnovu jednačine 7.6 dobijeno je da se vrednosti parametra M_0 kreću u intervalu 91.4 – 255.5, dok bi parametar k iznosio 14.4 do 16.9.

Linearna funkcionalna zavisnost modula stišljivosti i vertikalnog efektivnog napona napon (za srednje vrednosti razmatranih opsega $\sigma'_v = 20 - 100$ kPa) za prvu seriju ispitivanja, prikazana je na Slici 7.27.



Slika 7.27. Zavisnost modula stišljivosti i vertikalnog napona za uzorke serije A

7.3.2. Prikaz rezultata ispitivanja uzoraka serije B

Osnovne fizičke karakteristike uzoraka iz deponije Novi Sad (serija B), koji su korišćeni za izvođenje edometarskih opita, prikazane su u Tabeli 7.4.

Tabela 7.4. Osnovne karakteristike ispitanih uzoraka iz serije B – otpad sa deponije Novi Sad

Ser. B	Identifikaciono-klasifikacioni pokazatelji								Edoemtarski opit			
	tež. frakcija		w		G _s	e ₀	S _r	γ		σ' _v	Δh	ε = Δh/h
	d < 20 mm	d (20-80mm)	pre opita	posle opita				pre opita	posle opita			
	(%)		(%)		-	-	(%)	(kN/m ³)		(kN/m ²)	(mm)	(%)
U-5	95.6	4.4	39.9	18.8	2.0	1.944	41	9.5	9.4	10	0.755	1.89
										30	1.938	4.85
										50	2.756	6.89
										100	5.690	14.23
U-6	96.5	3.5	39.9	20.4	2.0	1.798	44	10.0	9.9	10	0.853	2.13
										30	2.110	5.28
										50	2.919	7.30
										100	5.266	13.17
U-7	94.1	5.9	42.9	18.1	2.0	1.722	50	10.5	11.4	10	1.604	4.01
										30	2.930	7.33
										50	3.912	9.78
										100	7.420	18.55
U-8	96.8	3.2	40.7	20.0	2.0	1.559	52	11.0	10.6	10	0.742	1.86
										30	1.481	3.70
										50	2.084	5.21
										100	4.459	11.15

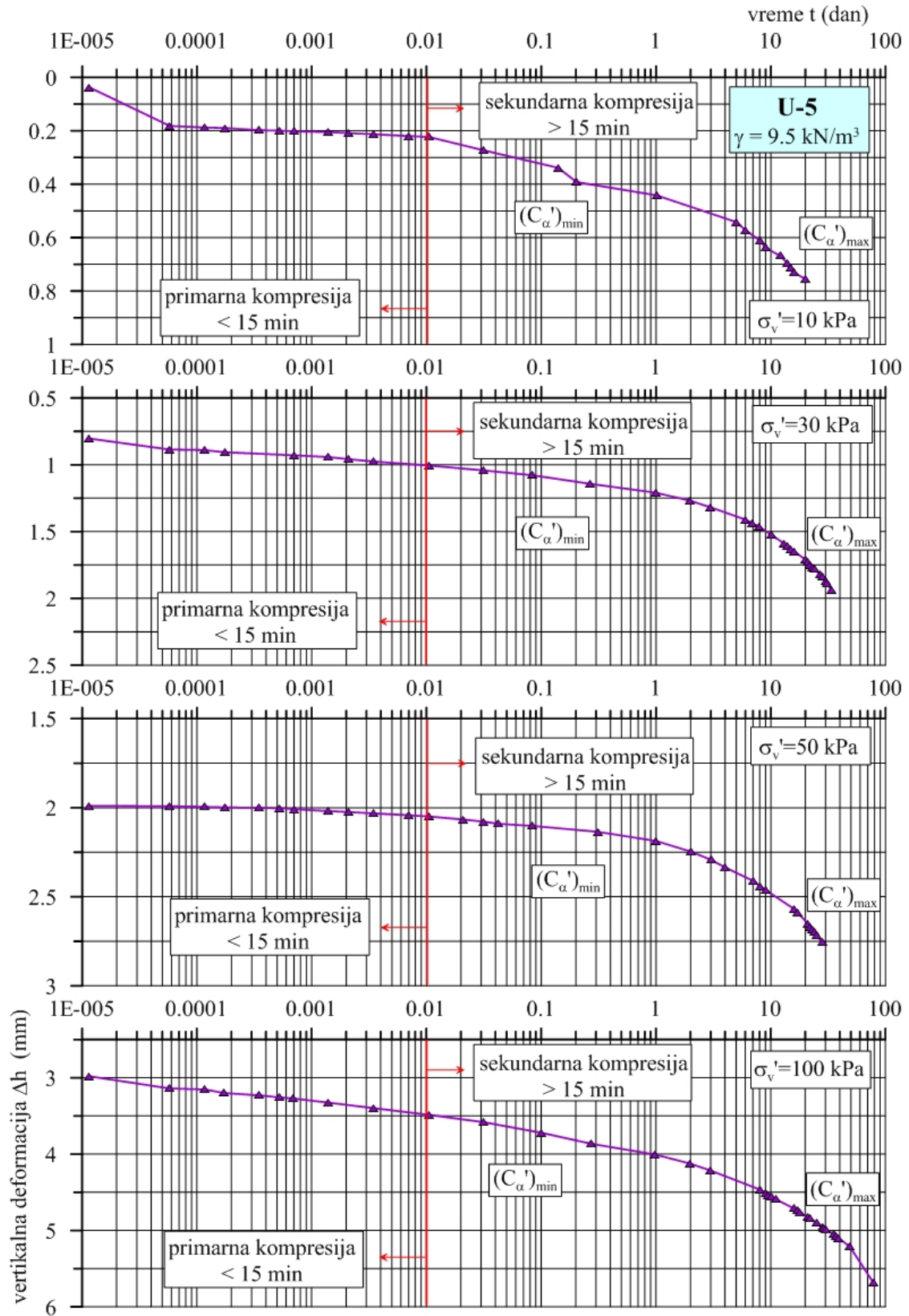
Na osnovu izvršenih ispitivanja, na Slikama 7.28 do 7.31 je prikazano sleganje ispitivanih uzoraka u funkciji vremena. Postupak ispitivanja bio je identičan postupku primenjenom za uzorke iz serije A, s tim što je u ovom slučaju maksimalni stupanj opterećenja iznosio 100 kPa.

Vreme trajanja opterećenja se razlikovalo se pa je kod ove serije prvi stupanj trajao 20 dana, a za svaki naredni vremenski interval se menjao i iznosio je: 34, 28 i 79 dana.

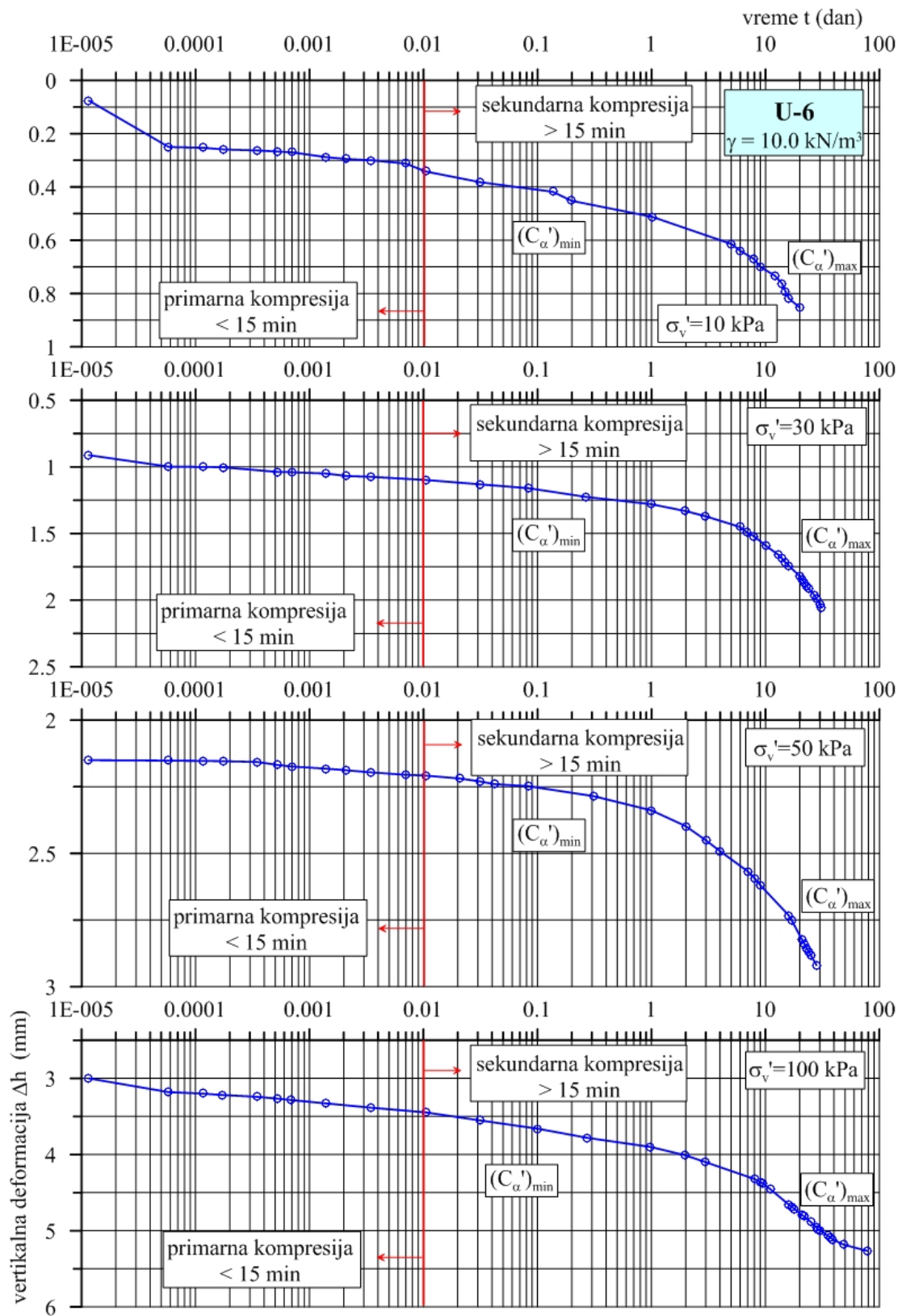
Ukupno vreme trajanja opita na uzorcima iz serije B je iznosilo 161 dan, što je znatno duže u odnosu na seriju A (2.2 puta, odnosno oko 3 meseca).

7.3.2.1. Indeks i modifikovani indeks sekundarne kompresije

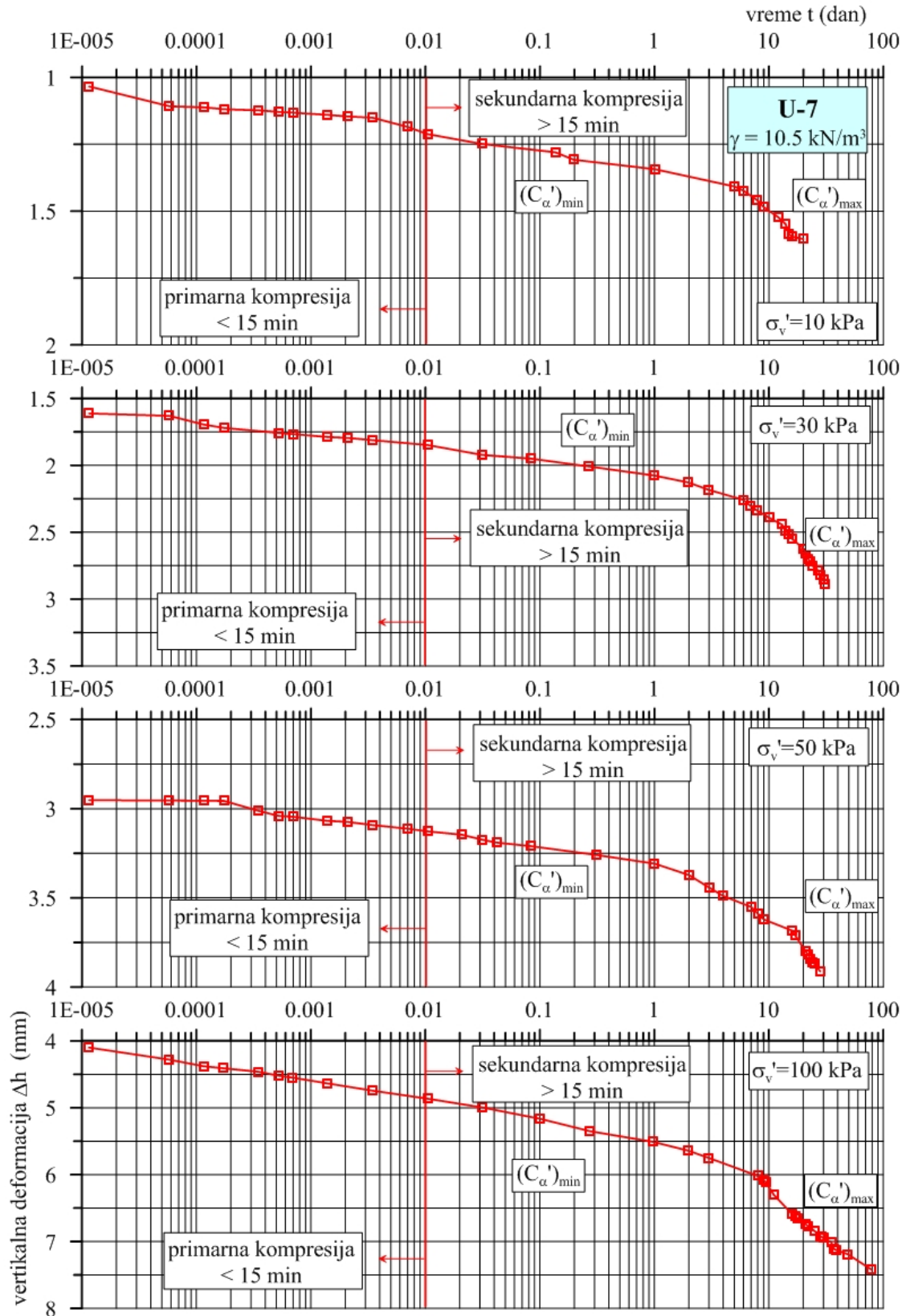
Na osnovu prikazanih rezultata, može se videti da u ranom vremenskom periodu, dijagrami sleganja imaju ustaljeni, relativno blagi nagib, koji se značajno povećava tokom sekundarne kompresije. Izraženo naglo „propadanje“, konstatovano je kod uzorka U-7, odmah nakon nanošenja opterećenja (može se protumačiti i kao naleganje filter ploče na uzorak), a u toku opita kod uzoraka U-5 i U-8, pri opterećenjima od 10 kPa, odnosno 100 kPa.



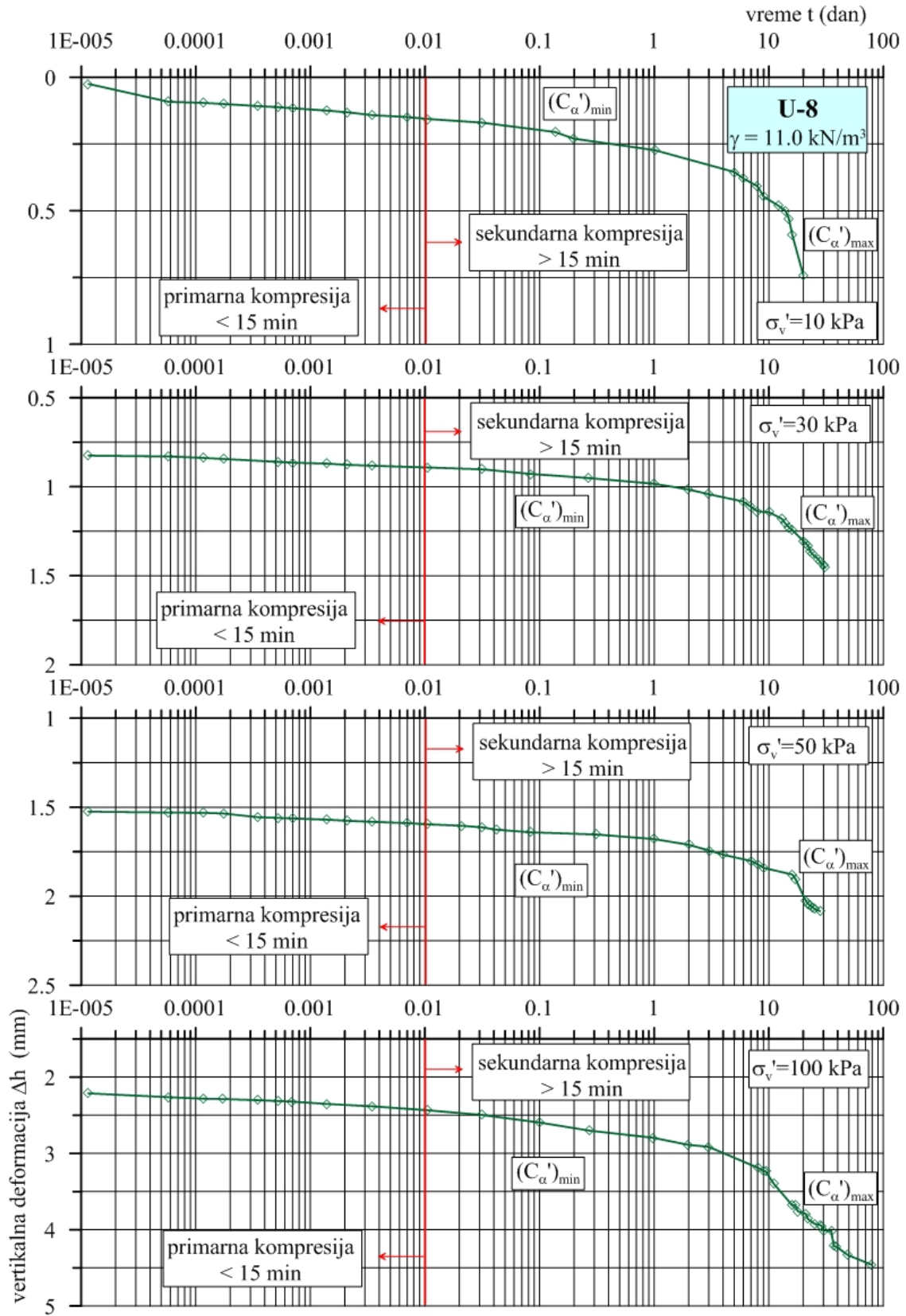
Slika 7.28. Vremensko sleganje uzorka U-5 iz serije B



Slika 7.29. Vremensko sleganje uzorka U-6 iz serije B



Slika 7.30. Vremensko sleganje uzorka U-7 iz serije B



Slika 7.31. Vremensko sleganje uzorka U-8 iz serije B

Za razliku od uzoraka iz serije A, kod uzoraka serije B: U-5, U-6 i U-7 pri opterećenju od 10 kPa, kao i uzoraka: U-6, U-7 i U-8 pri opterećenju od 100 kPa, dijagrami sleganja pokazuju da nakon izvesnog vremena (preko 20 dana) dolazi do završetka sekundarne kompresije i znatnog usporavanja pa i konačnog završetka dekompozicije organskih materija. Na to ukazuje blagi nagib dijagrama, koji predstavlja ostatak deformacija usled kompresije neorganskih čestica nakon dužeg vremenskog perioda.

I za ovu seriju uzoraka, za početak sekundarne kompresije je usvojeno vreme od oko 15 min. Postupak koji je primenjen za seriju A, primenjen je i za uzorke iz ove serije. To znači da su sa blažeg dela dijagrama određene minimalne, a sa strmijeg dela dijagrama određene maksimalne vrednosti indeksa i modifikovanog indeksa sekundarne kompresije. Kod uzoraka iz ove serije, strmiji deo dijagrama registovan je nakon 5 do 10 dana, što se može objasniti starošću otpada.

Sračunate vrednosti minimalnog i maksimalnog indeksa sekundarne kompresije kao i modifikovanih indeksa sekundarne kompresije, u zavisnosti od stupnja opterećenja, prikazane su u Tabeli 7.5.

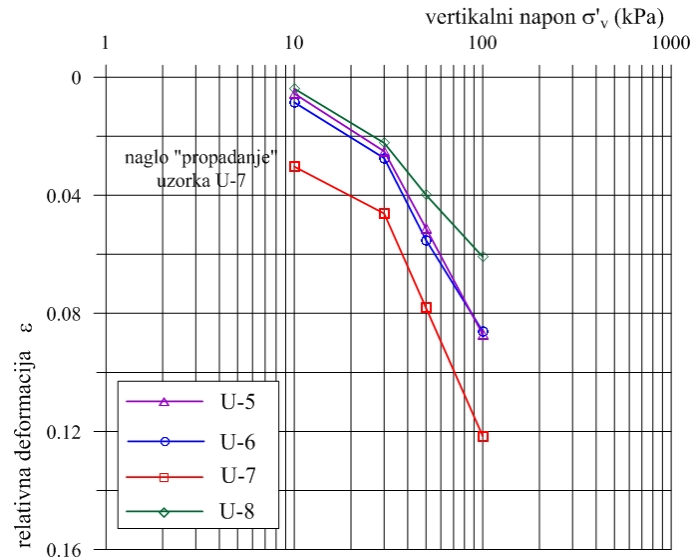
Tabela. 7.5. Vrednosti indeksa i modifikovanog indeksa sekundarne kompresije

Uzorak	e_0	σ'_v	$(C_\alpha)_{\min}$	$(C_\alpha)_{\min}$	$(C_\alpha)_{\max}$	$(C_\alpha)_{\max}$
	-	kPa	-	-	-	-
U-5	1.944	10	0.0031	0.0012	0.0094	0.0277
		30	0.0027	0.0074	0.0211	0.0622
		50	0.0016	0.0048	0.0169	0.0498
		100	0.0066	0.0195	0.0509	0.0883
U-6	1.798	10	0.0022	0.0023	0.0113	0.0315
		30	0.0021	0.0058	0.0240	0.0672
		50	0.0013	0.0036	0.0187	0.0524
		100	0.0054	0.0152	0.0309	0.0866
U-7	1.722	10	0.0017	0.0046	0.0086	0.0235
		30	0.0026	0.0071	0.0273	0.0742
		50	0.0023	0.0061	0.0226	0.0614
		100	0.0089	0.0241	0.0392	0.1068
U-8	1.559	10	0.0015	0.0020	0.0094	0.0241
		30	0.0011	0.0028	0.0168	0.0429
		50	0.0013	0.0034	0.0160	0.0409
		100	0.0050	0.0127	0.0352	0.0902

Može se reći da su se za ovu seriju uzoraka (koja reprezentuje otpad srednje starosti - oko 15 god.) vrednosti indeksa sekundarne kompresije kretale u intervalu $(C_\alpha)_{\min} = 0.0012 - 0.0241$, odnosno $(C_\alpha)_{\max} = 0.0235 - 0.107$.

7.3.2.2. Indeks i modifikovani indeks primarne kompresije

Za ovu seriju uzoraka, zavisnost između vertikalnog efektivnog napona i deformacija ostvarenih u fazi primarne kompresije, prikazana je dijagramom na Slici 7.32.



Slika 7.32. Zavisnost napona i deformacija u fazi primarne kompresije

I u ovom slučaju, zanemarene su deformacije pri vertikalnom naponu od 10 kPa, tako da je ova zavisnost predstavljena pravom linijom i iskorišćena je za određivanje modifikovanog indeksa primarne kompresije (C_c'). Rezultati su prikazani u Tabeli 7.6.

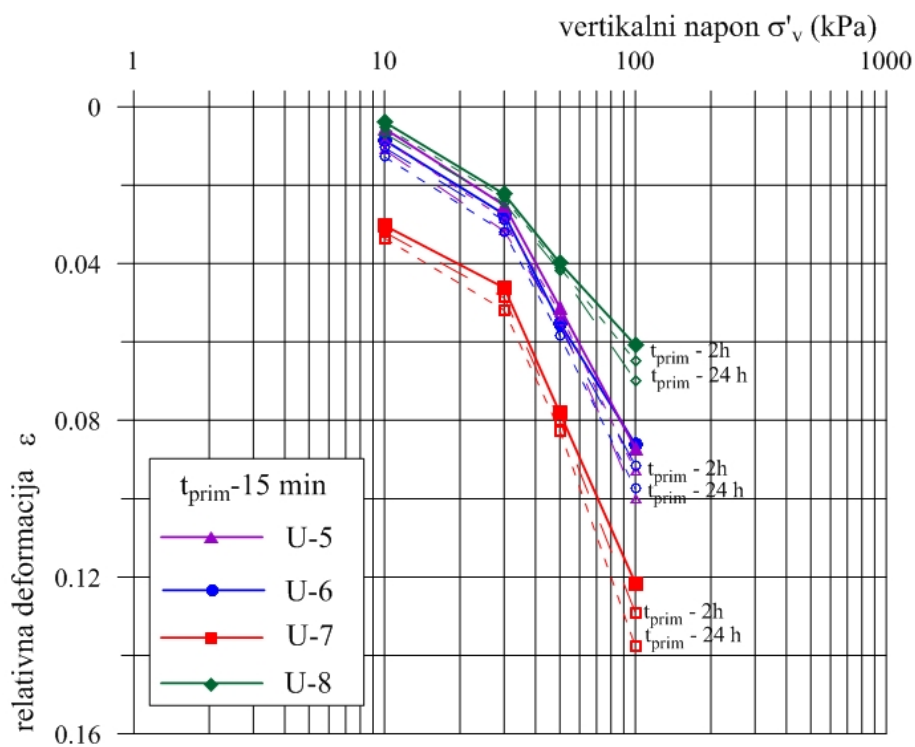
Tabela. 7.6. Vrednosti indeksa i modifikovanog indeksa primarne kompresije

Uzorak	e_0	σ'_v	$\varepsilon = \Delta h_{15 \text{ min}} / h_0$	C_c	C_c'
	-	kPa	-		
U-5	1.944	10	0.0056	0.350	0.119
		30	0.0251		
		50	0.0512		
		100	0.0871		
U-6	1.798	10	0.0086	0.313	0.112
		30	0.0275		
		50	0.0552		
		100	0.0862		
U-7	1.722	10	0.0303	0.392	0.144 zbog propadanja
		30	0.0462		
		50	0.0782		
		100	0.1216		
U-8	1.559	10	0.0039	0.189	0.074
		30	0.0223		
		50	0.0399		
		100	0.0609		

Dobijene vrednosti indeksa primarne kompresije (za uzorke serije B koji reprezentuju otpad srednje starosti) nalaze se u intervalu $C_c = 0.189 - 0.392$ i takođe se dobro slažu sa prosečnim vrednostima koje su navedene u Poglavlju 7.1.2 (Rakić, 2011b)..

Ako bi se zanemarila vrednost za uzorak U-7, zbog propadanja na početku opita, može se zaključiti da i u ovom slučaju postoji opšti trend opadanja C_c sa porastom vertikalnih napona (pretpostavka da je veća zapreminska težina otpada posledica i većih vertikalnih napona).

Analize su, kao i kod uzoraka serije A, urađene i za vremena od 2h i 24h. Rezultati su prikazani na Slici 7.33.

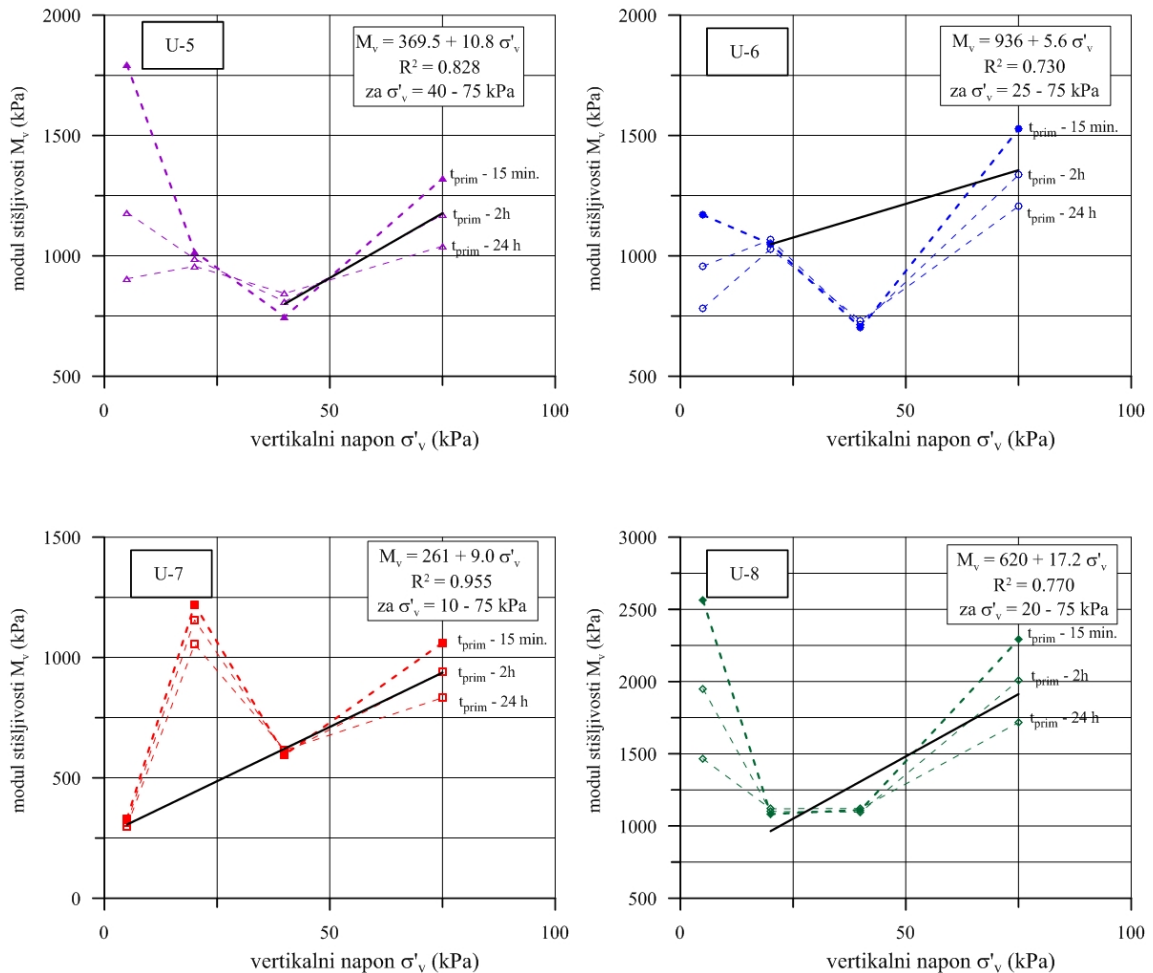


Slika 7.33. Zavisnost napona i deformacija za različito vreme primarne kompresije

Kao i za prethodnu seriju A, dobijene su skoro identične vrednosti, a najveće povećanje od oko 10 % dobijeno je za uzorak U-8, za koji je indeks primarne kompresije iznosio $C_c = 0.208$.

7.3.2.3. Modul stišljivosti

I za ovu grupu uzoraka, moduli stišljivosti su sračunati za deformacije očitane nakon 15 min, 2h i 24h. Rezultati su prikazani dijagramima na Slici 7.34.



Slika 7.34. Vrednosti modula stišljivosti za uzorke iz serije B

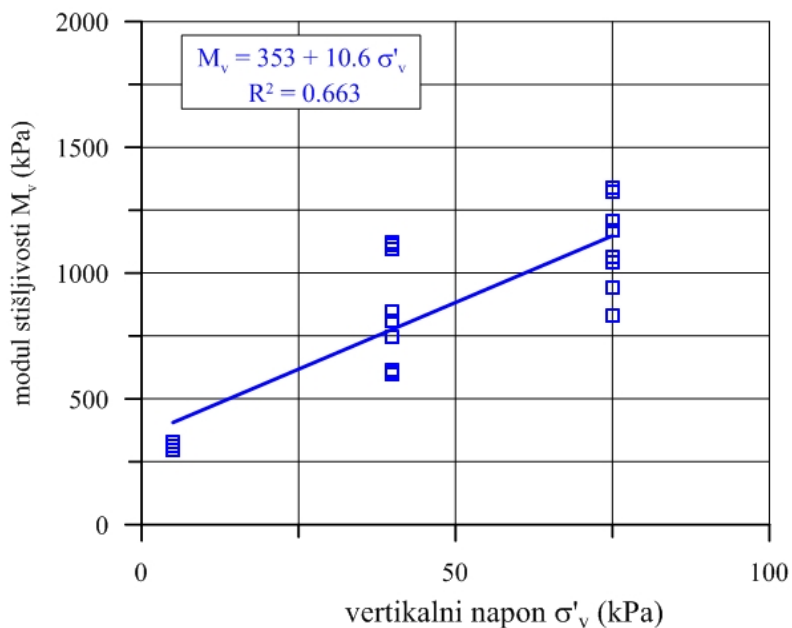
Najniža vrednost modula stišljivosti iznosi 330 kPa, za raspon opterećenja od 0 - 10 kPa (uzorak U-7), s tim što jednom naglašavamo da je došlo do propadanja filter ploče nakon početnog stupnja opterećenja i da su tom prilikom izmerene veće deformacije.

Maksimalna vrednost je iznosila 2290 kPa i prema očekivanju sračunata je za raspon opterećenja od 50 – 100 kPa, za najviše zbijeniji uzorak iz ove serije, U-8.

Linearna zavisnost za ovu seriju je uspostavljena je za pojedine uzorke na sledeći način. Tako npr. su za uzorak U-5 zanemarene vrednosti modula stišljivosti za dva stupnja opterećenja 10 i 30 kPa. Za sve ostale uzorke zanemaren je po jedan stupanj opterećenja i to: za uzorak U-6, 50 kPa, za uzorak U-7, 30 kPa, a za uzorak U-8, uobičajeno prvi stupanj opterećenja od 10 kPa.

I za ovu seriju uzoraka je uspostavljena linearna zavisnost modula stišljivosti i vertikalnog napona i dobijen je dosta širok interval vrednosti za parametre M_0 i k i to: M_0 od 261 do 936, dok se za parametar k , vrednosti nalaze takođe u širem intervalu od 5.6 do 17.2.

Linearna funkcionalna zavisnost modula stišljivosti i vertikalnog efektivnog napona (za srednje vrednosti razmatranih opsega $\sigma'_v = 10 - 75$ kPa) za drugu seriju ispitivanja, prikazana je na Slici 7.35.



Slika 7.35. Zavisnost modula stišljivosti i vertikalnog napona za uzorke serije B

Napominjem da pošto nije bilo zadovoljavajućeg slaganja, da bi se uspostavila opšta linearna zavisnost, ekstremne vrednosti su odbačene.

7.3.3. Prikaz rezultata ispitivanja uzorka serije C

Osnovne fizičke karakteristike uzorka koji je dobijen mešanjem otpada iz deponije Ada Huja i deponije u Novom Sadu, prikazane su u Tabeli 7.7.

Tabela 7.7. Osnovne karakteristike uzorka iz serije C – izmešan otpad sa obe deponije

Ser. C	Identifikaciono-klasifikacioni pokazatelji								Edoemtarski opit			
	tež. frakcija		w		G _s	e ₀	S _r	γ		σ' _v	Δh _{sr}	ε = Δh _{sr} /h
	d < 20 mm	d (20-80mm)	pre opita	posle opita				pre opita	posle opita			
	(%)		(%)		-	-	(%)	(kN/m ³)		(kN/m ²)	(mm)	(%)
U-9	93.7	6.3	30.8	18.0	2.05	1.559	37	10.0	10.1	11	2.103	2.63
										32	5.363	6.70
										53	8.225	10.28

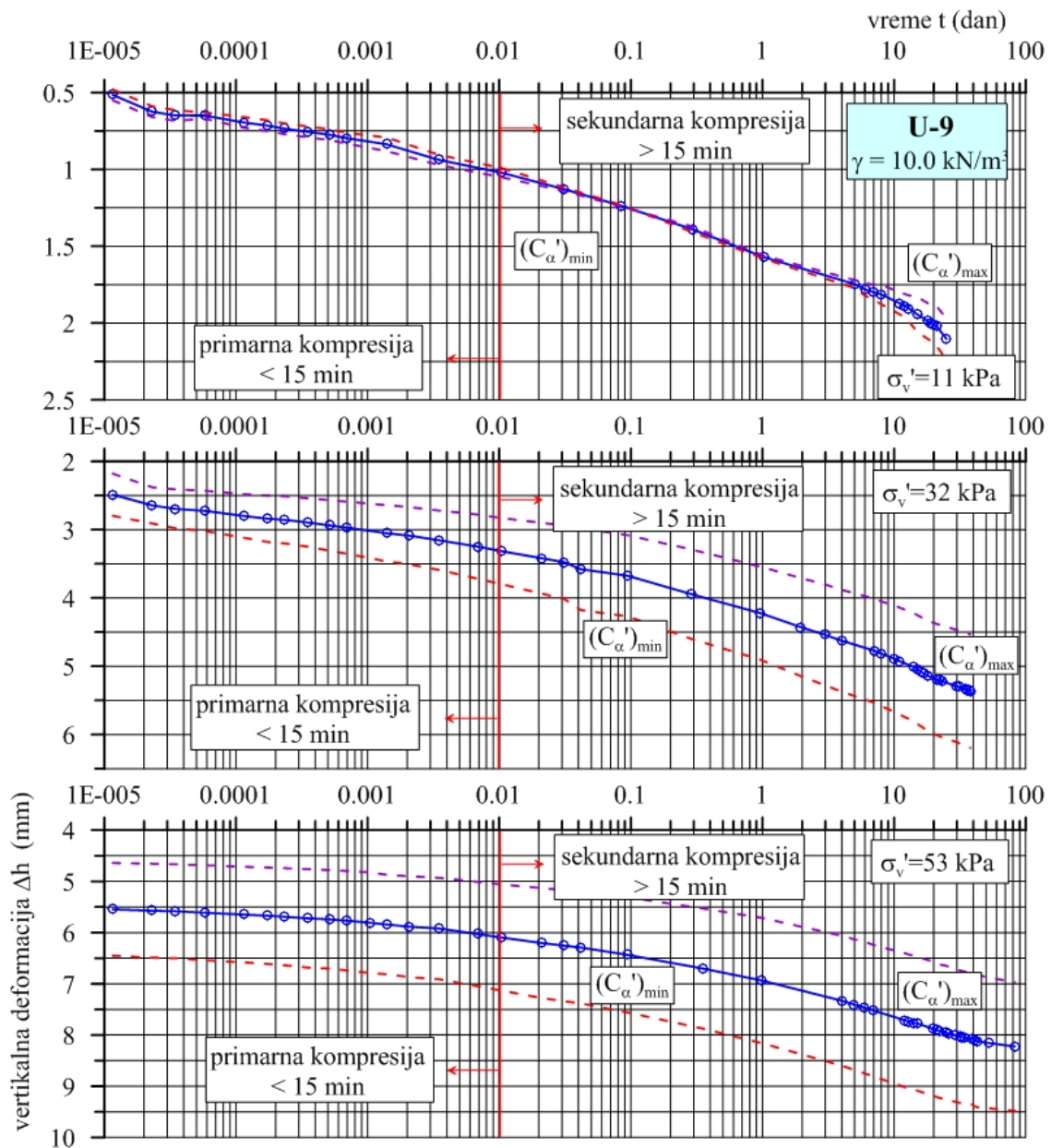
Na osnovu izvršenih ispitivanja, na Slici 7.36 je prikazano je sleganje ispitivanog uzorka u funkciji vremena. Postupak ispitivanja bio je identičan prethodnim postupcima, a već je napred napomenuto da su zbog znatno većih dimenzija uzoraka, primenjena tri stupnja opterećenja (11, 32 i 53 kPa).

I kod ove serije vreme trajanja opterećenja se razlikovalo, pa je prvi stupanj trajao 25 dana, drugi 38 a treći 83 dana, tako da je ukupno vreme trajanja opita, na ovom uzorku, iznosilo 147 dana (približno je vremenu trajanja opita na uzorcima iz serije B - 161 dan).

Kao i kod uzoraka iz serija A i B, rezultati su i ovde pokazali da su vertikalne deformacije pri manjim stupnjevima opterećenja (11 kPa i 32 kPa) jasno izražene, u prvih nekoliko sekundi.

7.3.3.1. Indeks i modifikovani indeks sekundarne kompresije

I za ovaj uzorak je karakteristično to što u ranom vremenskom periodu dijagrami sleganja imaju ustaljeni, relativno blagi nagib, koji se povećava tokom sekundarne kompresije. Naglih „propadanja“, takoreći nije bilo. Kada je u pitanju vreme završetka sekundarne kompresije, za ovaj uzorak može se reći da je ono nešto veće u odnosu na uzorke iz prethodnih serija.



Slika 7.36. Vremensko sleganje uzorka U-9 iz serije C

Dijagrami sleganja ukazuju da za prvi stupanj opterećenja vreme završetka sekundarne kompresije nije dostignuto, ali je kod drugog ono oko 30 dana, dok je kod trećeg stupnja opterećenja ono oko 40 dana (blagi nagib dijagrama).

I za ovaj uzorak, za početak sekundarne kompresije je usvojeno vreme od oko 15 min., pa je primenjen isti postupak za određivanje indeksa sekundarne kompresije. Kod sva tri stupnja opterećenja, strmiji deo dijagrama registrovan je nakon 10 dana.

Sračunate vrednosti minimalnog i maksimalnog indeksa sekundarne kompresije kao i modifikovanih indeksa sekundarne kompresije, u zavisnosti od stupnja opterećenja, prikazane su u Tabeli 7.8.

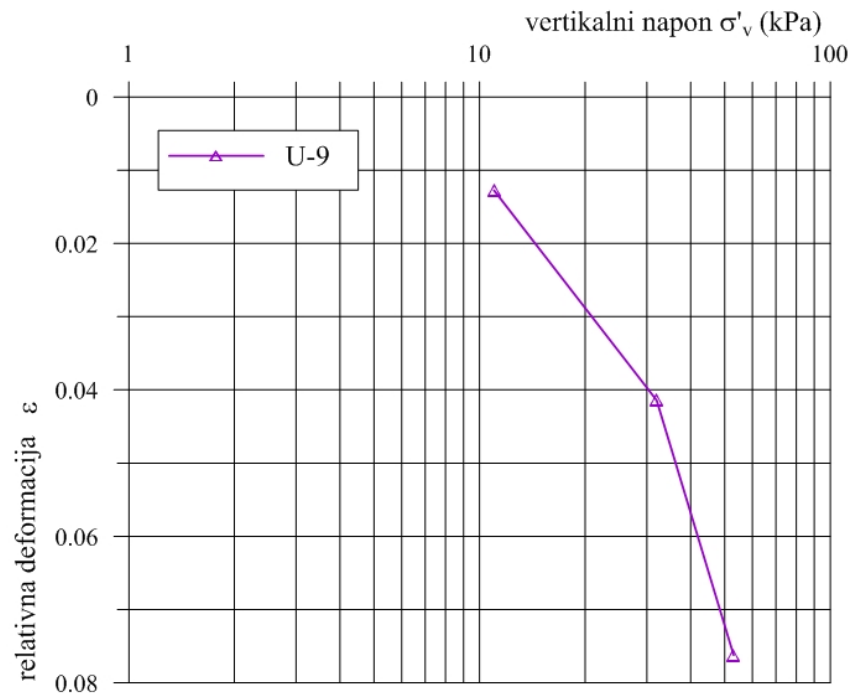
Tabela. 7.8. Vrednosti indeksa i modifikovanog indeksa sekundarne kompresije

Uzorak	e_0	σ'_v	$(C_\alpha)'_{\min}$	$(C_\alpha)_{\min}$	$(C_\alpha)'_{\max}$	$(C_\alpha)_{\max}$
	-	kPa	-	-	-	-
U-9	1.676	11	0.0068	0.0181	0.0174	0.0466
		32	0.0101	0.0270	0.0225	0.0602
		53	0.0102	0.0272	0.0228	0.0610

Može se reći da su se za ovaj uzorak (reprezentuje izmešani otpad sa obe deponije) vrednosti minimalnog i maksimalnog indeksa sekundarne kompresije kretale u intervalu $(C_\alpha)_{\min} = 0.0181 - 0.0272$, odnosno $(C_\alpha)_{\max} = 0.0466 - 0.0610$.

7.3.3.2. Indeks i modifikovani indeks primarne kompresije

Za ovaj uzorak, zavisnost između vertikalnog efektivnog napona i deformacija ostvarenih u fazi primarnog sleganja, prikazana je dijagramom na Slici 7.37.



Slika 7.37. Zavisnost napona i deformacija u fazi primarne kompresije

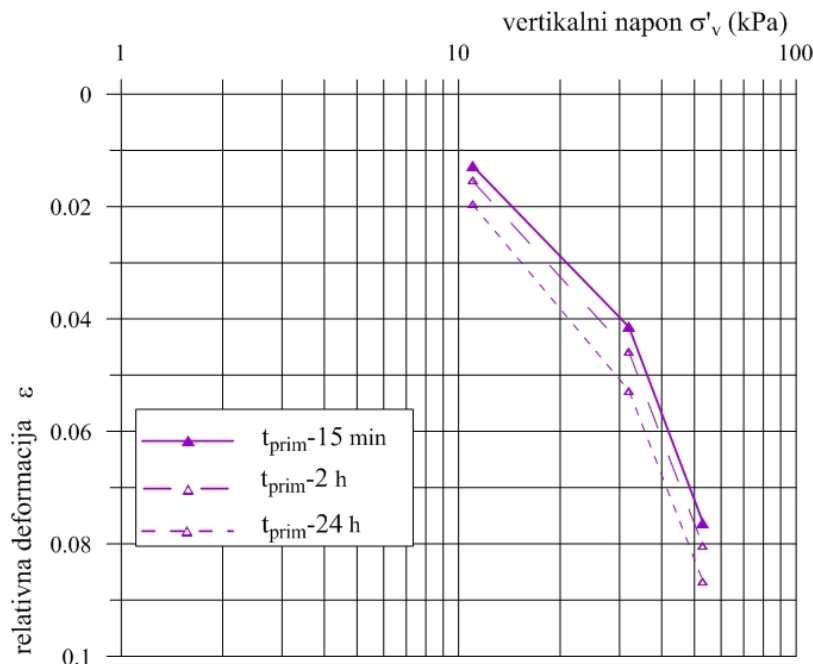
I u ovom slučaju, zanemare su deformacije pri vertikalnom naponu od 11 kPa, tako da je ova zavisnost predstavljena pravom linijom između vertikalnih napona 32 i 53 kPa i iskorišćena je za određivanje modifikovanog indeksa primarne kompresije (C_c'). Rezultat je prikazan u Tabeli 7.9.

Tabela. 7.9. Vrednosti indeksa i modifikovanog indeksa primarne kompresije

Uzorak	e_0	σ'_v	$\varepsilon = \Delta h_{15 \text{ min}} / h_0$	C_c	C_c'
	-	kPa	-	-	-
U-9	1.676	11	0.0128	0.425	0.159
		32	0.0414		
		53	0.0762		

Dobijena vrednost indeksa primarne kompresije $C_c = 0.425$ je nešto veća u odnosu na vrednosti dobijene za uzorke iz serija A i B, ali se takođe dobro slaže sa prosečnim vrednostima koje su navedene u poglavlju 7.1.2.

Analize su, kao i kod uzoraka iz prethodnih serija, urađene i za vremena od 2h i 24h (Slika 7.38).

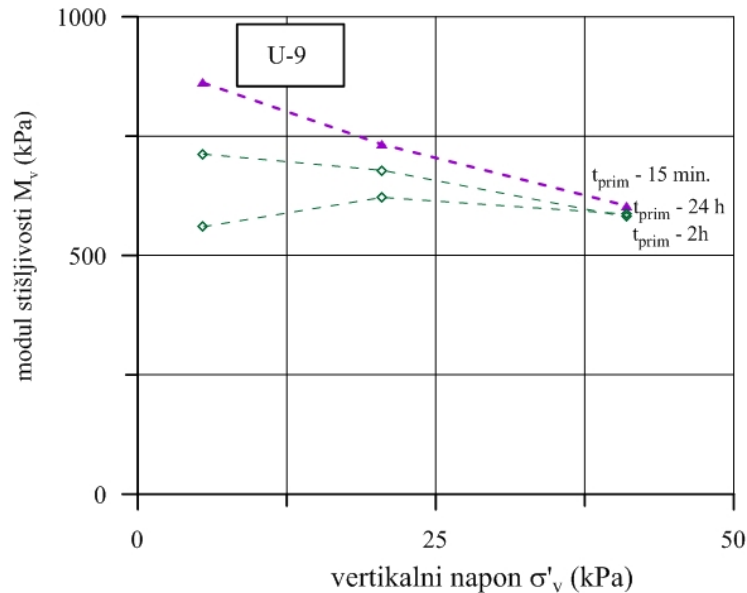


Slika 7.38. Zavisnost napona i deformacija za različito vreme primarne kompresije

Kao i kod prethodnih serija, dobijene su skoro identične vrednosti, sa trendom minimalnog smanjenja sa povećanjem vremena primarne kompresije ($C_c^{2h} = 0.420$, $C_c^{24h} = 0.414$).

7.3.3.3. Modul stišljivosti

I za ovaj uzorak, moduli stišljivosti je sračunat za deformacije očitane nakon 15 min, 2h i 24h. Rezultati su prikazani dijagramom na Slici 7.39.



Slika 7.39. Vrednosti modula stišljivosti za uzorak iz serije C

Kao i kod prethodnih serija tako je i kod ovog uzorka vrednost modula stišljivosti opadala za prva tri stupnja opterećenja. Kako je konstrukcija aparata bila ograničena tako da četvrti stupanj opterećenja, sa najvećom vrednošću vertikalnog napona nije izveden, linearna zavisnost nije uspostavljena.

U svakom slučaju, najniža vrednost modula stišljivosti kretala se oko 600 kPa za raspon opterećenja 32 - 53 kPa, dok je maksimalna vrednost iznosila preko 800 kPa, i to za najniži raspon opterećenja 0 – 11 kPa, kao i kod ostalih uzoraka iz serija A i B.

7.4. ZAKLJUČAK

U okviru ovog poglavlja prikazani su rezultati laboratorijskih ispitivanja komunalnog otpada koji je izložen jednodimenzionalnoj kompresiji sa stupnjevitim priraštajem vertikalnih napona. Izvedene su tri serije ispitivanja (A, B, C) na ukupno devet uzoraka. Svi uzorci su veštački pripremljeni sa unapred definisanim zapreminskim težinama $\gamma = 9.5, 10.0, 10.5$ i 11.0 kN/m^3 , uz poštovanje preporuka vezanih za odnos granulometrijskog sastava i dimenzija aparata.

Za ispitivanje osam uzoraka iz prve dve serije koristio sam klasične edometarske aparate prečnika $D = 10 \text{ cm}$ i visine uzorka $h = 4 \text{ cm}$, dok je jedan uzorak ispitan u edometarskom aparatu prečnika $D = 20 \text{ cm}$ sa visinom uzorka od $h = 8 \text{ cm}$. Ovaj edometarski aparat, zajedno sa platformom za opterećenje, pomoću koje su obezbeđene neophodne sile, konstruisan je za potrebe ovih ispitivanja. Pored toga, osmišljen je i realizovan sistem za akviziciju podataka kao i softver za nadzor i hronološko praćenje procesa ispitivanja u vremenu. Svi pomenuti uređaji, verifikovani su od strane naučnog veća Instituta IMS iz Beograda i predstavljaju novo inovaciono tehničko rešenje.

Ispitivanja su obavljena sa sledećim vrednostima vertikalnih napona: $\sigma'_v = 10(11) - 30(32) - 50(53) - 100(150) \text{ kPa}$. Vreme izvođenja opita se razlikovalo kod pojedinačnih stupnjeva opterećenja, u okviru jedne serije, ali i od serije do serije. Tako su uzorci iz serije A bili izloženi opterećenju u ukupnom trajanju od 74 dana, uzorci iz serije B u trajanju od 161 dana, a uzorak iz serije C u trajanju od 147 dana.

Analizom dijagrama sleganja, pokazan je opšti trend da se, u početnom vremenskom periodu, dešava rasipanje rezultata pri nižim stupnjevima opterećenja, a nakon toga dijagrami dobijaju ustaljeni, relativno blagi nagib, koji se kasnije značajnije povećava sa vremenom. Osim toga, uočeno je da prelaz od primarnog sleganja ka sekundarnoj kompresiji nije jasno izražen, pa sam zaključio da se i u fazi primarnog sleganja obavljaju deformacije koje su izazvane krivljenjem, savijanjem, lomljenjem i preorijentacijom čestica otpada. Iz tog razloga, prikazani dijagrami su označeni kao

"dijagrami sleganja" a ne konsolidacije, što je uobičajena terminologija kada je u pitanju tlo.

Na osnovu dobijenih rezultata su određeni parametri stišljivosti komunalnog otpada i to: indeks (C_α) i modifikovani indeks (C_α') sekundarne kompresije, indeks (C_c) i modifikovani indeks (C_c') primarne kompresije i modul stišljivosti (M_v).

Za sve stupnjeve opterećenja, određene su minimalne i maksimalne vrednosti indeksa (C_α) i modifikovanog indeksa (C_α') sekundarne kompresije. Na uzorcima otpada sa deponije Ada Huja u Beogradu, (reprezentuje stariji otpad) indeks sekundarne kompresije, kretao se u intervalu $(C_\alpha)_{\min} = 0.0032 - 0.025$, odnosno $(C_\alpha)_{\max} = 0.011 - 0.093$. Granične vrednosti indeksa sekundarne kompresije, za uzorke otpada sa deponije u Novom Sadu (prezentuje otpad srednje starosti), kretale su se u intervalu $(C_\alpha)_{\min} = 0.0012 - 0.024$, odnosno $(C_\alpha)_{\max} = 0.0235 - 0.107$. Opšti je zaključak da se njihove vrednosti povećavaju sa povećanjem vertikalnih napona, što ukazuje na činjenicu da indeks sekundarne kompresije nije konstantan, već da njegova vrednost vremenom raste.

Bez obzira na to što je za realizaciju primarnog sleganja usvojeno vreme od 15 min, i u ovoj početnoj fazi opterećenja uzoraka, ostvarene su značajne deformacije, koje su se u proseku kretale oko 1% (max oko 3 %) u odnosu na početnu visinu uzoraka (i drugi istraživači pravili su slične pretpostavke, Landva i dr. 2000). Ako se uzme u obzir da se kumulativna vertikalna deformacija, za 60 dana opterećenja (u zavisnosti od početne zbijenosti uzorka), kretala od 1.81 mm (4.5 %) do 7.2 mm (18 %), može se reći da se u primarnoj fazi obavi preko 15 % od ukupnog sleganja (dobijene su vrednosti od 17 – 22 %).

Dobijene vrednosti indeksa primarne kompresije nalaze se u intervalu $C_c = 0.267 - 0.369$ (za stariji otpad), odnosno, $C_c = 0.189 - 0.392$ (za otpad srednje starosti), pa je opšti zaključak da starost otpada nema značajniji uticaj na ovaj parametar. Opšti je trend da vrednosti indeksa primarne kompresije opadaju sa povećanjem zapremine težine (ovo se može poistovetiti i sa povećanjem vertikalnih napona).

Polazeći od činjenice da se vreme primarne kompresije ne može precizno definisati, analiza je urađena i za slučaj povećanja vremena početka sekundarne kompresije na 2^h, odnosno 24^h. Dobijene su vrednosti skoro identične prethodnim, a manja odstupanja od 3 %, odnosno 10 %, zabeležena su samo kod dva uzorka.

U zavisnosti od početne zbijenosti uzoraka (zapreminske težine), vrednosti modula stišljivosti rastu od min. 330 kPa za raspon opterećenja 0 - 10 kPa (uzorak U-7), do max. 2290 kPa za raspon opterećenja 50 – 100 kPa (uzorak U-8). Modul stišljivosti sračunat je i za vrednost deformacija koje su ostvarene nakon 2^h i 24^h. Konstatovan je trend značajnijeg povećanja modula stišljivosti samo pri maksimalnim rasponima opterećenja. Rezultati su pokazali da starost otpad od preko 15-20 god., nema značajniji uticaj na promenu modula stišljivosti.

Na kraju ovog poglavlja može reći da dobijeni rezultati, potvrđuju opšti mehanizam sekundarne kompresije komunalnog otpada, koji se odvija fazno u zavisnosti od brzine procesa stvaranja pora i kasnije njihovog rušenja. To je rezultat delovanja više faktora kao što su: veličina čestica, hemijske i biološke promene, starost otpada, prisustvo procednih voda, način odlaganja otpada i dr. Zbog svega toga, da bi se bolje shvatio mehanizam sleganja komunalnog otpada, neophodna su dugotrajna laboratorijska i/ili terenska istraživanja.

POGLAVLJE 8

VERIFIKACIJA REZULTATA ISPITIVANJA

Poznavanje mehaničkih karakteristika komunalnog otpada, čvrstoće smicanja i deformabilnosti (stišljivosti), fundamentalno je kada je u pitanju procena stabilnosti kosina deponije kod nosivosti i sleganja komunalnog otpada. Ranije je naglašeno da na mehaničke karakteristike komunalnog otpada utiče veći broj faktora, kao što su: način uzorkovanja, priprema uzoraka, fizičko stanje (vlažnost, zbijenost, granulacija), starost, postupak ispitivanja i sl., koji se kod komunalnog otpada vrlo teško mogu objedinjeno analizirati. Ono što je posebno karakteristično, to je da se komunalni otpad u laboratoriji ispituje u poremećenom stanju. Ako se u obzir uzme i činjenica da se, u literaturi – u nekim radovima, ne daju potpuni podaci o sastavu, granulaciji, zapreminskim težinama, vlažnostima i drugim značajnim fizičkim pokazateljima, onda se može reći da je tumačenje, korišćenje i poređenje dobijenih rezultata, znatno otežano.

U ovom Poglavlju, verifikacija rezultata ispitivanja je posebno je obavljena za parametre čvrstoće smicanja, a posebno za parametre stišljivosti.

8.1. VERIFIKACIJA ČVRSTOĆE SMICANJA

Pregledom literaturnih podataka, može se videti da se za definisanje parametara čvrstoće smicanja komunalnog otpada koriste različiti postupci pripreme uzoraka, primenjuju se različiti kriterijumi loma, a često se pri tumačenju dobijenih rezultata uvode i određene pretpostavke.

U ovoj disertaciji je, provera dobijenih vrednosti parametara čvrstoće smicanja obavljena na osnovu poređenja sa rezultatima koje su drugi istraživači prikazali u literaturi. S obzirom da su u radu prikazane vrednosti parametara čvrstoće smicanja, dobijene iz pravolinijskog i krivolinijskih oblika jednačine čvrstoće smicanja, to je poređenje dobijenih rezultata urađeno za oba slučaja, tj. izvršeno je poređenje sa rezultatima koji su dobijeni korišćenjem:

- pravolinijskog Kulon-Mor-Tercagijevog oblika jednačine čvrstoće smicanja i
- krivolinijskih oblika jednačine čvrstoće smicanja logaritamskog i hiperboličkog oblika.

8.1.1. Pravolinijska Kulon-Mor-Tercagijeva jednačina čvrstoće smicanja

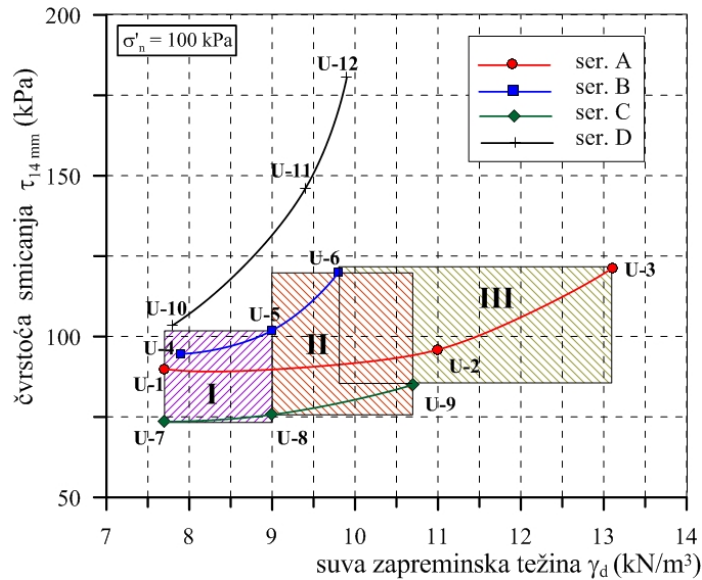
U Tabeli br. 8.1 prikazani su zbirni rezultati parametara čvrstoće smicanja, definisani za usvojeni kriterijum loma pri horizontalnom pomeranju od $\Delta l = 14$ mm iz opita direktnog smicanja a u zavisnosti od zapreminskih težina i vlažnosti. Opšti je zaključak da čvrstoća smicanja ima tendenciju porasta sa povećanjem zapreminske težine, odnosno zbijenosti komunalnog otpada, bez obzira na način pripreme uzoraka (bilo da su armirajuće frakcije orijentisane paralelno ili upravno na ravan smicanja, Slika 8.1). S obzirom na to, u nastavku teksta je posebno analizirana čvrstoća smicanja rastresitog do srednje zbijenog, a posebno zbijenog komunalnog otpada. U vezi sa tim, predložene su i vrednosti parametara čvrstoće smicanja, koje karakterišu komunalni otpad sa deponija u Srbiji.

Tabela 8.1. Zbirni prikaz parametara čvrstoće smicanja

	Manje zbijen					Zbijeniji				Serija D		
	U-1	U-4	U-5	U-7	U-8	U-2	U-3	U-6	U-9	U-10	U-11	U-12
γ (kN/m ³)	10.6	11.1	12.1	10.0	12.1	15.0	17.5	13.4	14.3	10.0	11.6	14.0
w (%)	37.2	39.8	35.0	30.9	33.9	36.4	27.2	36.9	32.9	28.7	29.7	31.8
c' _{mob} (kN/m ²)	9	22	21	11	18	12	28	33	15	41	31	57
φ'_{mob} (°)	39	36	39	32	30	40	43	41	35	32	49	51

Zbog načina formiranja uzoraka, analiza je obuhvatila samo serije A, B i C. U prvu grupu uzoraka koji karakterišu rastresiti do manje zbijeni otpad, svrstani su uzorci: U-1,

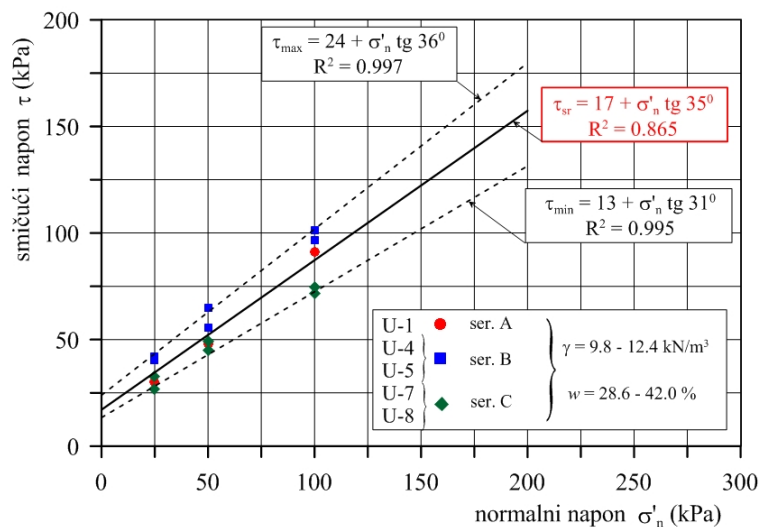
U-4, U-5, U-7 i U-8 čije su se zapreminske težine probnih tela kretale u granicama $\gamma = 9.8 - 12.4 \text{ kN/m}^3$, odnosno suve zapreminske težine u intervalu $\gamma_d = 7.7 - 9.3 \text{ kN/m}^3$. Na osnovu toga, definisana je čvrstoća smicanja koja je prikazana na Slici 8.2.



Slika 8.1 Uticaj zapreminske težine na čvrstoću smicanja komunalnog otpada

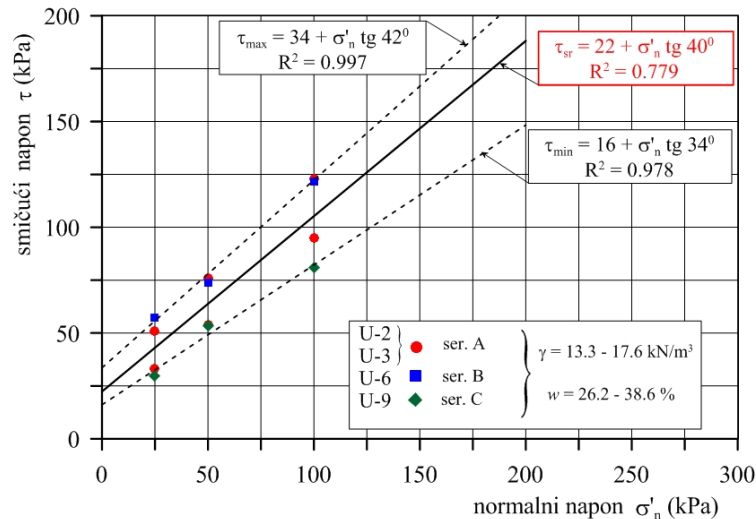
Kao što se može videti, definisane su minimalna i maksimalna čvrstoća smicanja. Na osnovu toga je dobijena prosečna vrednost, koja bi karakterisala rastresiti do srednje zbijeni otpad sa komunalnih deponija u Srbiji i definisana je jednačinom

$$\tau_f = 17 + \sigma'_n \cdot \text{tg } 35^\circ \quad (8.1)$$



Slika 8.2 Čvrstoća smicanja manje zbijenog komunalnog otpada sa deponija u Srbiji

Slična analiza urađena je i za zbijeniji otpad (grupa III na Slici 8.1) u koji su svrstani uzorci: U-2, U-3, U-6 i U-9 sa zapreminskim težinama u granicama $\gamma = 13.3 - 17.6 \text{ kN/m}^3$ ($\gamma_d = 9.7 - 13.2 \text{ kN/m}^3$). Za ovu grupu uzoraka čvrstoća smicanja prikazana je na Slici 8.3.



Slika 8.3 Čvrstoća smicanja zbijenijeg komunalnog otpada sa deponija u Srbiji

I u ovom slučaju, definisana je minimalna i maksimalna čvrstoća smicanja. Predložena je takođe prosečna vrednost, koja bi karakterisala zbijeni otpad sa komunalnih deponija u Srbiji i koja se definiše na sledeći način

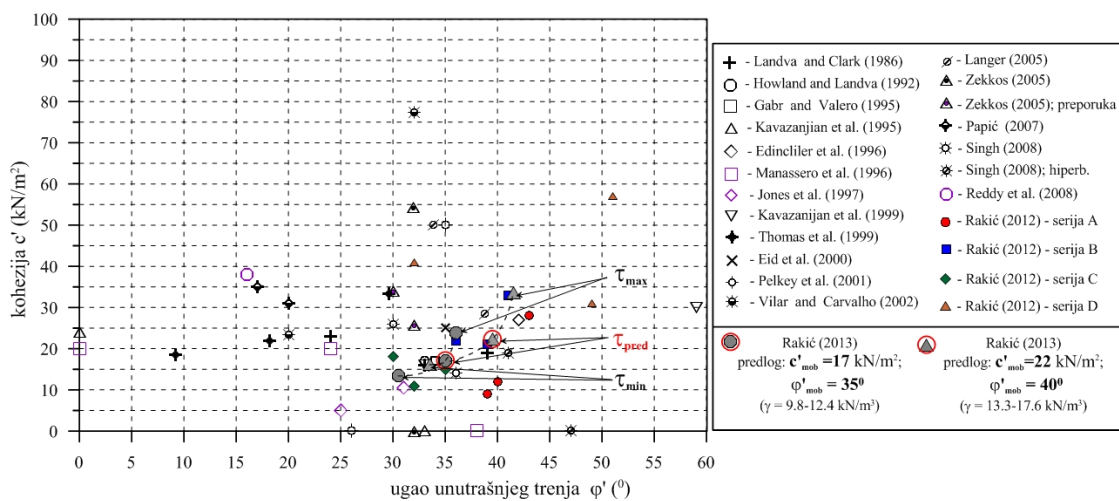
$$\tau_f = 22 + \sigma'_n \cdot \text{tg } 40^\circ \quad (8.2)$$

Može se zaključiti da u oba analizirana slučaja maksimalnu čvrstoća smicanja predodređuju uzorci serije B, čime se na neki način potvrđuju opšte pretpostavke nekoliko autora koji smatraju da sa degradacijom komunalnog otpada, opada i čvrstoća smicanja (Turczynski, 1988; Landva i Clark, 1990; Mahler i dr. 1998; Jessberger, 2001; Kölsch i Ziehmman, 2004). Međutim, ima i drugačijih mišljenja (Manassero i dr. 1997; Van Impe i Bouazza, 1998; Hossain, 2002), pa se može reći da još uvek nije pouzdano utvrđen uticaj starosti komunalnog otpada na čvrstoću smicanja. Naime, stepen degradacije otpada koji se poistovećuje sa njegovom starošću, jeste značajan faktor koji utiče na čvrstoću smicanja komunalnog otpada, ali veliki uticaj na degradaciju imaju i drugi faktori kao što su: sastav otpada, lokalna klima, vlažnost, način odlaganja otpada, materijal koji se koristi za dnevnu prekrivku i sl.

8.1.2. Verifikacija pravolinijske Kulon-Mor-Tercagijeve jednačine čvrstoće smicanja

U Poglavlju 6 (na Slici 6.56 i u Tabelama 6.2, 6.3 i 6.6), navedeno je oko šezdesetak literaturnih podataka koji se odnose na parametre čvrstoće smicanja dobijene opitima direktnog smicanja, triaksijalnim ispitivanjima, kao i na osnovu povratnih analiza i predloga pojedinih autora. Ovi podaci potiču sa deponija širom sveta, tako da se odnose na komunalni otpad različite starosti i sastava. Može se reći da je u mnogima prikazano korišćenje Kulon-Mor-Tercagijeve jednačine za definisanje čvrstoće smicanja.

Na Slici 8.4 šematski su prikazani rezultati na osnovu dvadesetak odabranih literaturnih podataka, uključujući i rezultate koji su dobijeni ovim istraživanjima. Kao što se može videti, karakteristična je izražena promenljivost vrednosti kohezije i ugla unutrašnjeg trenja ($c' = 0 - 80$ kPa a $\phi' = 0 - 59^{\circ}$). Prikazani rezultati dobijeni su različitim vrstama ispitivanja i primenom različitih kriterijuma loma.



Slika 8.4 Zbirni prikaz parametara čvrstoće smicanja komunalnog otpada

Ranije je već napomenuto da se na osnovu povratnih analiza, uglavnom dobijaju niže vrednosti parametara čvrstoće smicanja, u odnosu na rezultate laboratorijskih i terenskih ispitivanja. Zato je iz pomenutih tabela izdvojeno devet radova u kojima je čvrstoća smicanja dobijena opitima direktnog smicanja u laboratorijskim uslovima, na uzorcima maksimalnih dimenzija od 45.4 x 45.4 cm. Pored dimenzija uzoraka, na ovaj izbor

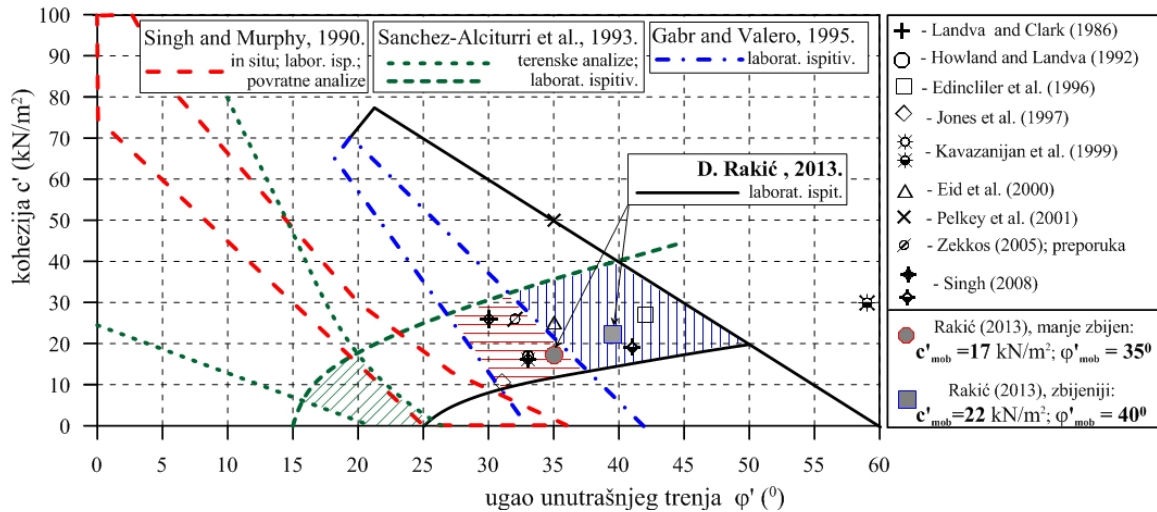
uticala je i zbijenost ispitivanih uzoraka tj., izabrao sam radove sa vrednostima zapreminskih težina koje su najviše odgovarale vrednostima korišćenim tokom ispitivanja u doktorskoj disertaciji. Osim toga, uključen je i jedan literaturni podatak dobijen na uzorcima većih dimenzija i na osnovu povratnih analiza (Eid i dr. 2000).

U Tabeli 8.2 prikazani su podaci o parametrima čvrstoće smicanja, ispitivanim uzorcima i načinu izvođenja ispitivanja, za izdvojene literaturne podatke (Rakić i dr. 2011c).

Tabela 8.2. Parametri čvrstoće smicanja dobijeni izvođenjem opita direktnog smicanja pojedinih autora iz izabranih literaturnih podataka

red br.	Autori	Parametri čvrstoće smicanja		Detalji vezani za ispitivanje	
		c' (kPa)	ϕ' (°)		
1	Landva and Clark (1986),	16	33	otpad sa različitih deponija u Kanadi; uzorci: 43.4 x 28.7 cm; brzina smicanja 1.5 mm/min; kriterijum max. smičući napon; $\gamma_d = 10 - 14 \text{ kN/m}^3$	
2	Howland and Landva (1992)	17	33	opiti na 10 do 15 god. starom otpadu; uzorci: 43.2 x 27.9 cm	
3	Edinçliler et al. (1996)	27	42	mlad otpad sa deponije u Wisconsinu; uzorci prečnika 30 cm; brzina smicanja 0.4 mm/min; kriterijum max. smičući napon i pomeranja od $\Delta l = 2.5 \text{ cm}$; $\gamma_d = 7.5 - 14.2 \text{ kN/m}^3$; $d < 5 \text{ mm}$.	
4	Jones et al. (1997)	10.5	31	predlog na osnovu literaturnih podataka	
5	Kavazanjian et al. (1999)	16	33	donja granica	otpad starosti od 11 – 35 god. – Kalifornija; uzorci 45.4 x 45.4 cm
		30	59	gornja granica	
6	Eid et al. (2000)	25	35	veliki aparat ali i povratne analize	
7	Pelkey et al. (2001),	50	35	otpad starosti od 2 – 5 god. sa tri deponije u Kanadi; uzorci 45.0 x 30.5 cm - gornja granica za $\Delta l = 3.0 \text{ cm}$; $\gamma = 9 - 15.5 \text{ kN/m}^3$	
8	Zekkos et al. (2005)	26	32	prosečne vrednosti, uzorci 30.0 x 30.0 cm $\gamma = 10.2 - 15.1 \text{ kN/m}^3$	
9	Singh (2008)	26	30	max. pomeranja	jedan opit sa četiri probna tela
		19	41	hiperbolička ekstrapolacija	
10	D. Rakić (2013)	17	35	otpad starosti 15- 30 god.; uzorci 6.0 x 6.0 cm i 10.0 x 10.0 cm; za $\Delta l = 14 \text{ mm}$, $\gamma=9.8-12.4\text{kN/m}^3$	
		22	40	otpad starosti 15- 30 god.; uzorci 6.0 x 6.0 cm i 10.0x10.0 cm; za $\Delta l = 14 \text{ mm}$, $\gamma=13.3-17.6\text{kN/m}^3$	

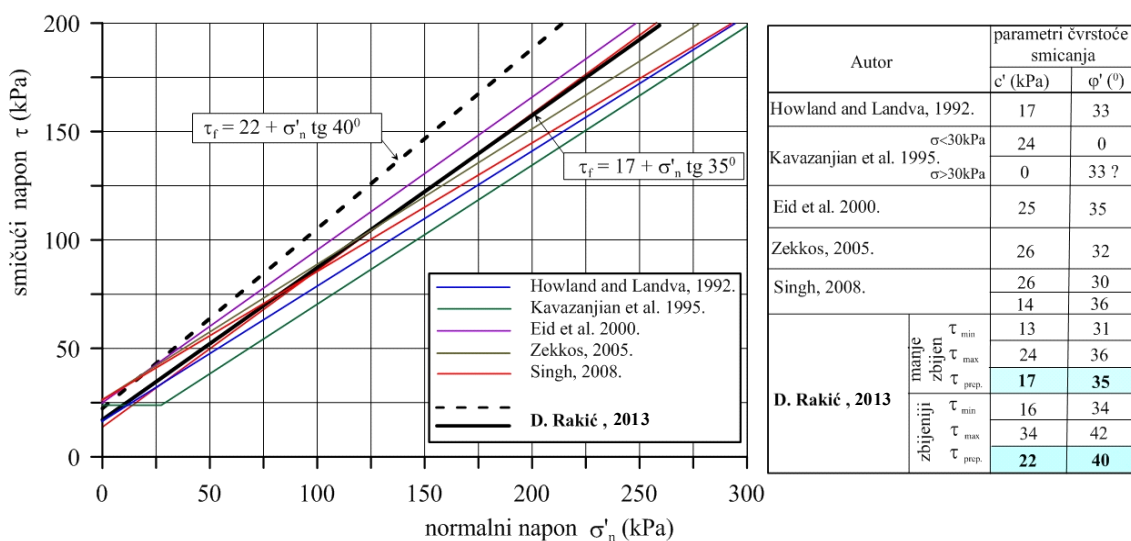
Pored toga, podaci prikazani u Tabeli 8.2, zbirno su prikazani i na Slici 8.5. sa koje se može videti relativno ograničeno rasipanje podataka, bez obzira na poreklo otpada i njegov sastav.



Slika 8.5 Zbirni prikaz parametara čvrstoće smicanja za izdvojene literaturne podatke

Vrednosti parametara čvrstoće smicanja, dobijene laboratorijskim ispitivanjima na manje zbijenom komunalnom otpadu sa pomenutih deponija u Srbiji, dobro se slažu sa onima koji su na osnovu laboratorijskih ispitivanja preporučili Sanchez-Alciturri i dr. (1993), odnosno, Gabr i Valero (1995). S obzirom da su u ovoj doktorskoj disertaciji dobijeni i parametri čvrstoće smicanja za zbijeniji otpad, na Slici 8.5 je izvršeno proširenje opsega parametara čvrstoće smicanja, a predložena je i donja granica.

Na Slici 8.6, prikazane su i pravolinijske anvelope loma za manje zbijen i zbijeniji komunalni otpad. One su upoređene sa predlozima drugih autora koji imaju široku primenu u praksi.



Slika 8.6 Uporedni prikaz pravolinijskih anvelopa loma predloženih u ovom radu i literaturnih podataka

Može se zaključiti da se predložena anvelopa loma, za manje zbijeni otpad, (na osnovu vrednosti zapreminskih težina on najviše odgovara literaturnim podacima), nalazi između donjih i gornjih granica smičuće čvrstoće, čime se dokazuje slaganje sa literaturnim podacima.

8.1.3. Krivolinijski oblici jednačine čvrstoće smicanja

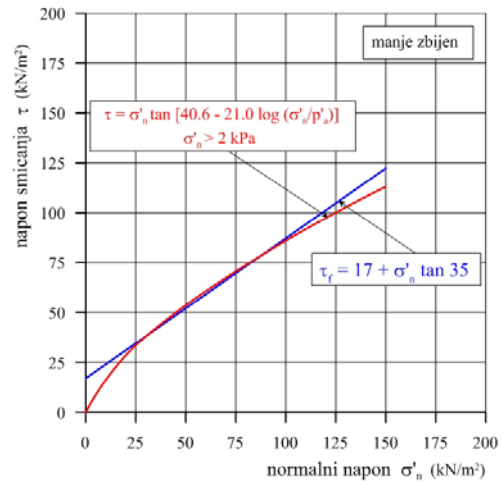
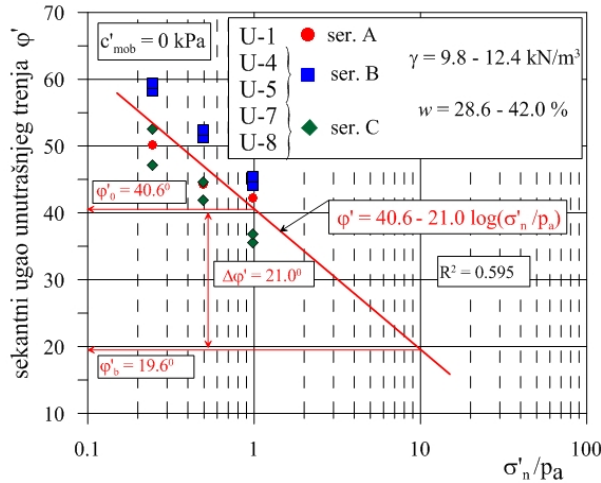
I u ovom slučaju je primenjen isti postupak kao kod predlaganja parametara za pravolinijski oblik jednačine čvrstoće smicanja. Pri tome je posebno analizirana grupa uzoraka koja karakteriše rastresit do srednje zbijeni komunalni otpad, a posebno grupa koju čine zbijeni uzorci. Analiza je najpre urađena za krivolinijsku jednačinu logaritamskog oblika, a iskorišćeni su podaci iz Poglavlja 6.6, koji su zbirno prikazani u Tabeli 8.3.

Tabela 8.3. Prikaz parametara čvrstoće smicanja za jednačinu čvrstoće logaritamskog oblika

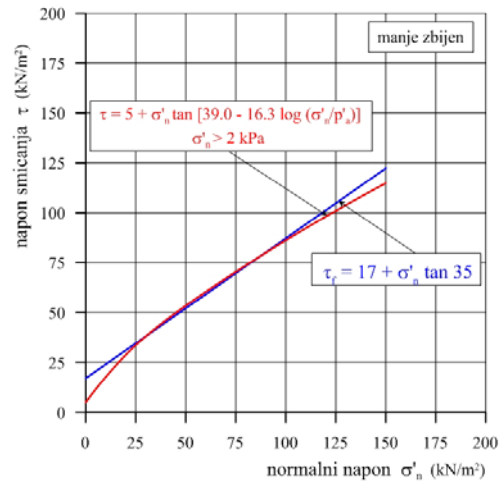
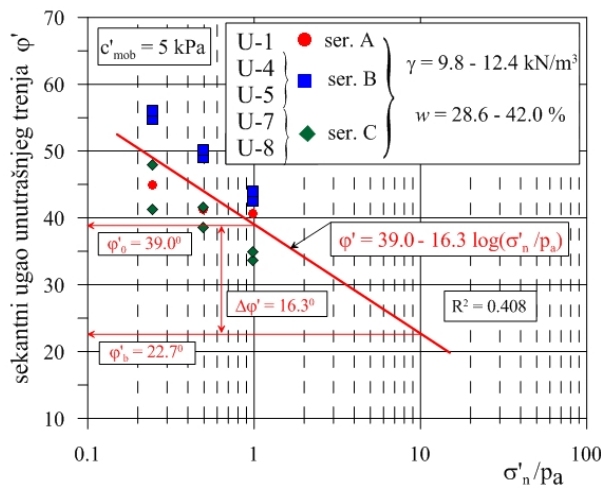
	Manje zbijen					Zbijeniji			
	U-1	U-4	U-5	U-7	U-8	U-2	U-3	U-6	U-9
γ (kN/m ³)	10.6	11.1	12.1	10.0	12.1	15.0	17.5	13.4	14.3
w (%)	37.2	39.8	35.0	30.9	33.9	36.4	27.2	36.9	32.9
c'_{mob} (kN/m ²)	0					0			
ϕ'_b (°)	28.4	20.5	22.0	16.6	10.4	28.2	28.7	23.3	20.4
ϕ'_0 (°)	41.5	44.0	45.2	35.7	36.6	43.1	50.5	49.6	39.4
$\Delta\phi'$ (°)	13.1	23.5	23.2	19.1	26.2	14.9	21.7	26.3	19.0
c'_{mob} (kN/m ²)	5					5			
ϕ'_b (°)	32.9	22.4	23.7	21.4	13.2	32.0	29.6	23.3	24.6
ϕ'_0 (°)	40.1	42.6	43.1	34.0	34.8	41.6	49.3	48.2	37.8
$\Delta\phi'$ (°)	7.2	20.2	20.2	12.6	21.6	9.6	19.7	24.9	13.2
c'_{mob} (kN/m ²)	10					10			
ϕ'_b (°)	35.0	25.3	26.3	28.2	17.6	37.4	31.1	23.8	30.6
ϕ'_0 (°)	37.2	41.1	42.4	32.2	33.0	40.2	48.1	46.9	36.3
$\Delta\phi'$ (°)	2.2	15.8	16.1	4.0	15.4	2.8	17.0	23.1	5.7

Rezultati izvršenih analiza na uzorcima, koji su svrstani u grupu rastresitog do srednje zbijenog otpada, prikazani su na Slikama 8.7 – 8.9. Najbolje slaganja sa pravolinijskom jednačinom čvrstoće smicanja, pokazala je krivolinijska anvelopa koja je dobijena sa mobilisanom kohezijom $c'_{mob} = 10$ kPa, i koja se može prikazati jednačinom

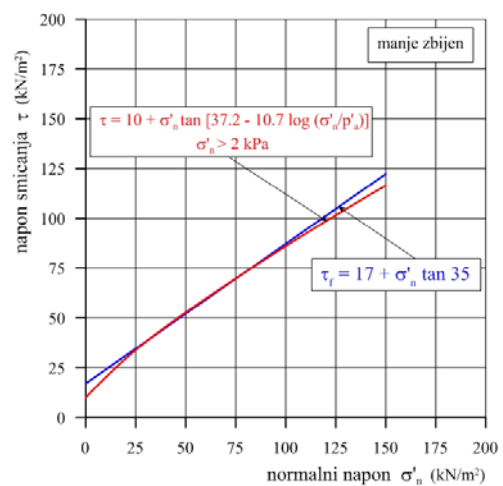
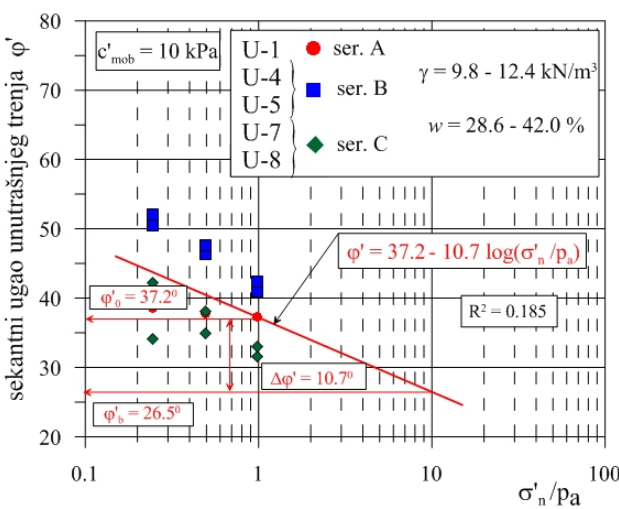
$$\tau_f = 10.0 + \sigma'_n \cdot \tan \left[37 - 11 \cdot \log \left(\frac{\sigma'_n}{p'_a} \right) \right] \quad (8.3)$$



Slika 8.7 Krivolinijska jednačina čvrstoće logaritamskog oblika za manje zbijeni otpad ($c'_{mob} = 0 \text{ kPa}$)



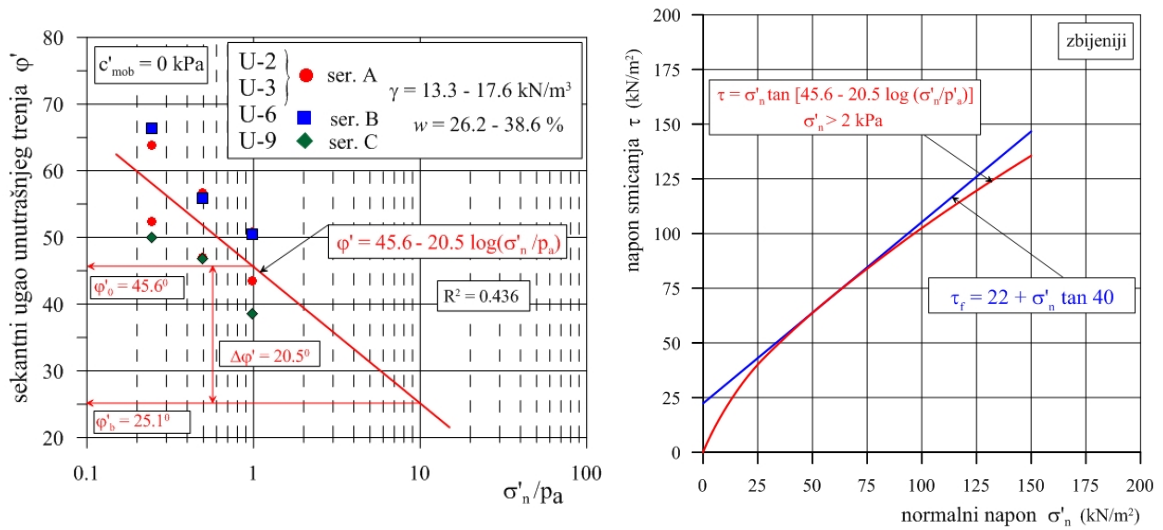
Slika 8.8 Krivolinijska jednačina čvrstoće logaritamskog oblika za manje zbijeni otpad ($c'_{mob} = 5 \text{ kPa}$)



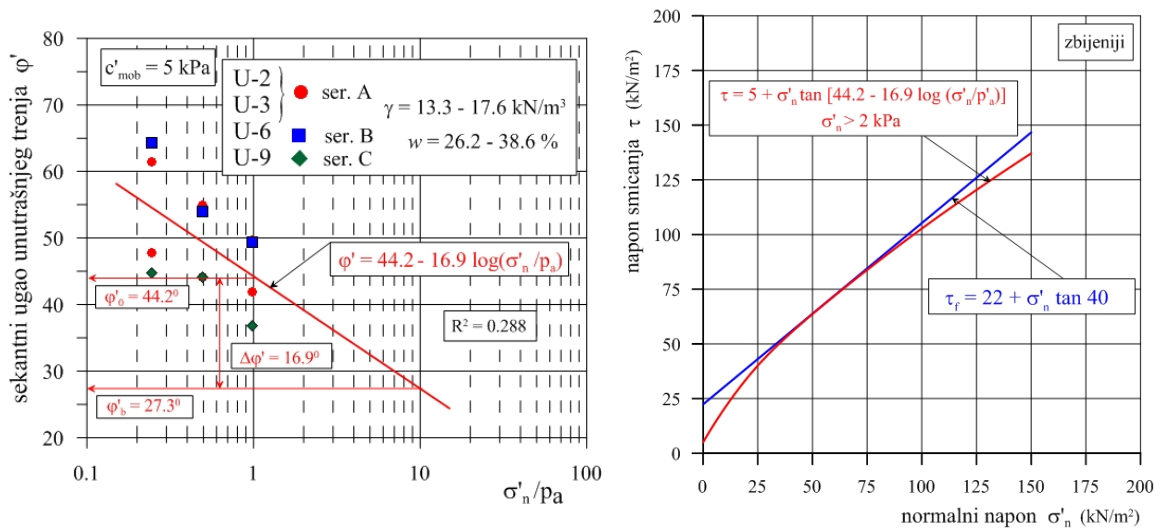
Slika 8.9 Krivolinijska jednačina čvrstoće logaritamskog oblika za manje zbijeni otpad ($c'_{mob} = 10 \text{ kPa}$)

Rezultati izvršenih analiza, na uzorcima koji su svrstani u grupu zbijenijeg otpada, prikazani su na Slikama 8.10 – 8.12. Kao što se može videti i u ovom slučaju najbolje slaganja sa pravolinijskom jednačinom čvrstoće smicanja, pokazala je krivolinijska anvelopa koja je dobijena sa kohezijom $c'_{mob} = 10$ kPa, i koja je definisana na ovaj način

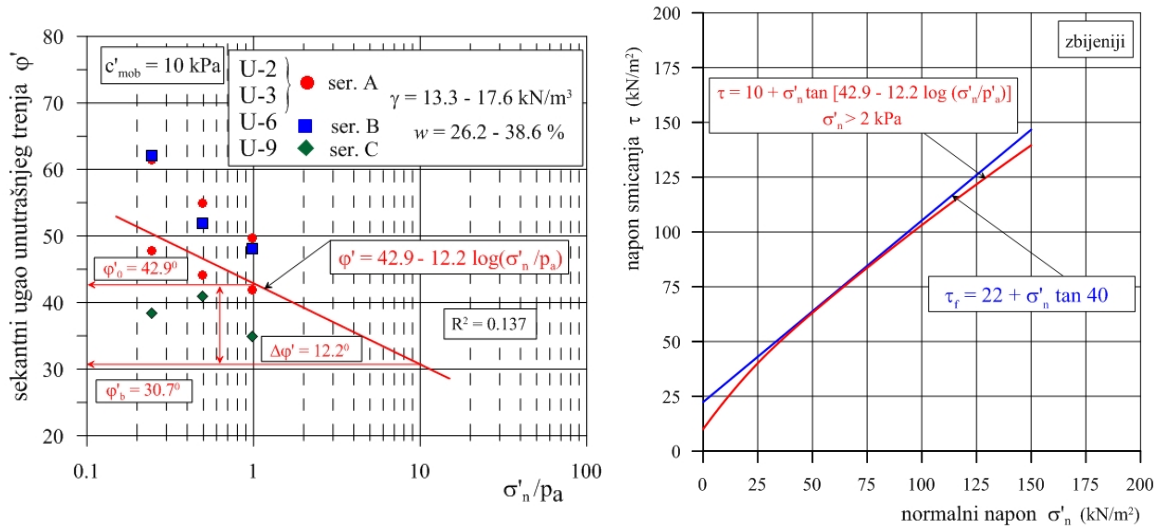
$$\tau_f = 10.0 + \sigma'_n \cdot \tan \left[43 - 12 \cdot \log \left(\frac{\sigma'_n}{p'_a} \right) \right] \quad (8.4)$$



Slika 8.10 Krivolinijska jednačina čvrstoće logaritamskog oblika zbijenijeg otpada ($c'_{mob} = 0$ kPa)



Slika 8.11 Krivolinijska jednačina čvrstoće logaritamskog oblika zbijenijeg otpada ($c'_{mob} = 5$ kPa)



Slika 8.12 Krivolinijska jednačina čvrstoće logaritamskog oblika zbijenijeg otpada ($c'_{mob} = 10 \text{ kPa}$)

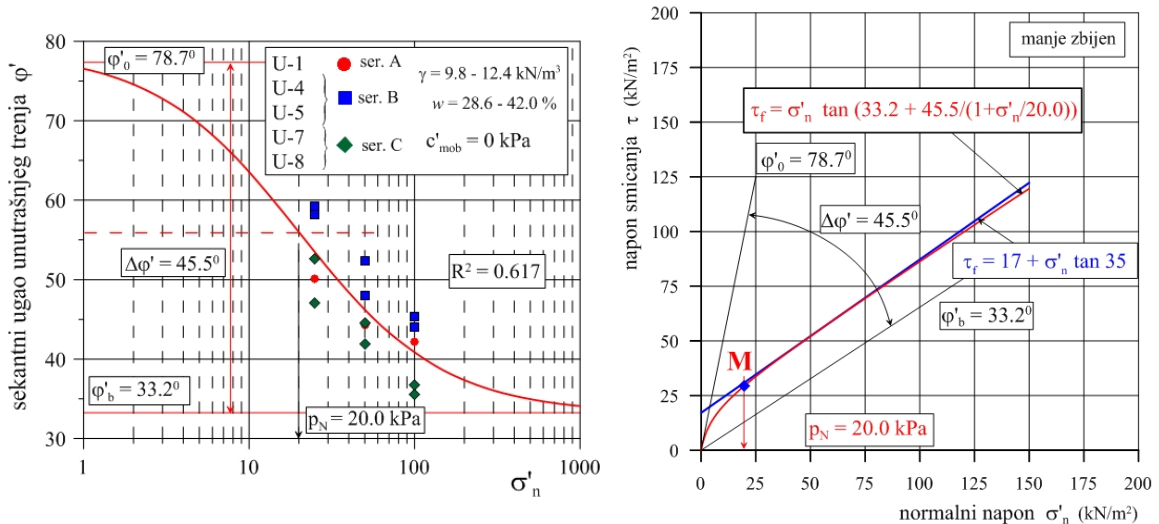
Kao i u prethodnom slučaju, kada je analiziran pravolinijski oblik jednačine čvrstoće smicanja, i u ovom slučaju, maksimalnu čvrstoća smicanja predodređuju uzorci serije B, koji karakterišu mlađi otpad uzet sa deponije u Novom Sadu.

Analiza je urađena i za krivolinijsku jednačinu hiperboličkog oblika, na osnovu podataka prikazanih u Poglavlju 6.6, i zbirno data u Tabeli 8.4.

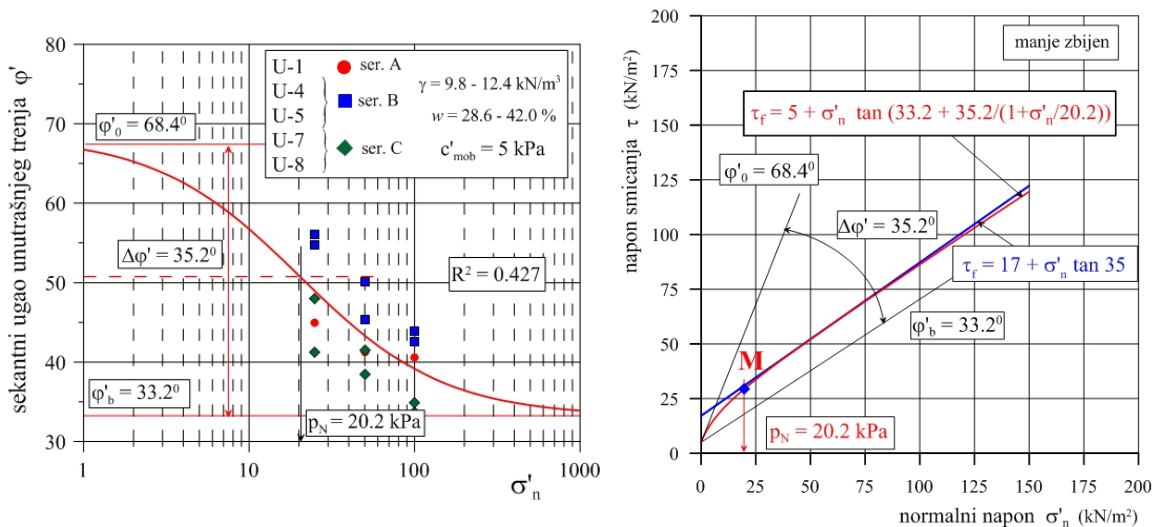
Tabela 8.4. Prikaz parametara čvrstoće smicanja za jednačinu čvrstoće hiperboličkog oblika

	Manje zbijen					Zbijeniji			
	U-1	U-4	U-5	U-7	U-8	U-2	U-3	U-6	U-9
$\gamma \text{ (kN/m}^3\text{)}$	10.6	11.1	12.1	10.0	12.1	15.0	17.5	13.4	14.3
$w \text{ (}\% \text{)}$	37.2	39.8	35.0	30.9	33.9	36.4	27.2	36.9	32.9
$c'_{mob} \text{ (kN/m}^2\text{)}$	0					0			
$\phi'_b \text{ (}^\circ\text{)}$	37.0	34.0	35.0	28.0	25.0	37.5	41.5	36.5	28.5
$\phi'_0 \text{ (}^\circ\text{)}$	67.3	81.2	79.9	68.3	75.3	69.5	83.6	84.0	68.6
$\Delta\phi' \text{ (}^\circ\text{)}$	30.3	47.2	44.9	40.3	50.3	32.0	42.1	47.5	40.1
$p_N \text{ (kPa)}$	20.0	24.8	30.2	24.1	31.0	20.0	29.2	39.5	65.1
$c'_{mob} \text{ (kN/m}^2\text{)}$	5					5			
$\phi'_b \text{ (}^\circ\text{)}$	36.5	34.0	33.5	28.0	25.0	38.0	41.5	34.5	27.0
$\phi'_0 \text{ (}^\circ\text{)}$	54.8	76.6	70.6	54.0	66.3	58.3	74.3	79.8	58.2
$\Delta\phi' \text{ (}^\circ\text{)}$	18.3	42.6	37.1	26.0	41.3	20.3	32.8	45.3	31.2
$p_N \text{ (kPa)}$	20.5	22.3	39.4	29.4	32.1	23.2	35.0	44.8	46.5
$c'_{mob} \text{ (kN/m}^2\text{)}$	10					10			
$\phi'_b \text{ (}^\circ\text{)}$	36.2	34.5	32.5	27.5	25.0	38.5	38.8	33.5	24.5
$\phi'_0 \text{ (}^\circ\text{)}$	42.6	73.7	61.9	42.5	54.3	44.9	69.9	76.0	53.7
$\Delta\phi' \text{ (}^\circ\text{)}$	6.4	39.2	29.4	15.0	29.3	6.4	31.1	42.5	29.2
$p_N \text{ (kPa)}$	19.5	16.4	51.4	34.6	38.0	31.2	42.0	46.9	47.0

Na Slikama 8.13 – 8.15 prikazani su rezultati izvršenih analiza na uzorcima koji su svrstani u grupu rastresitog do srednje zbijenog otpada.



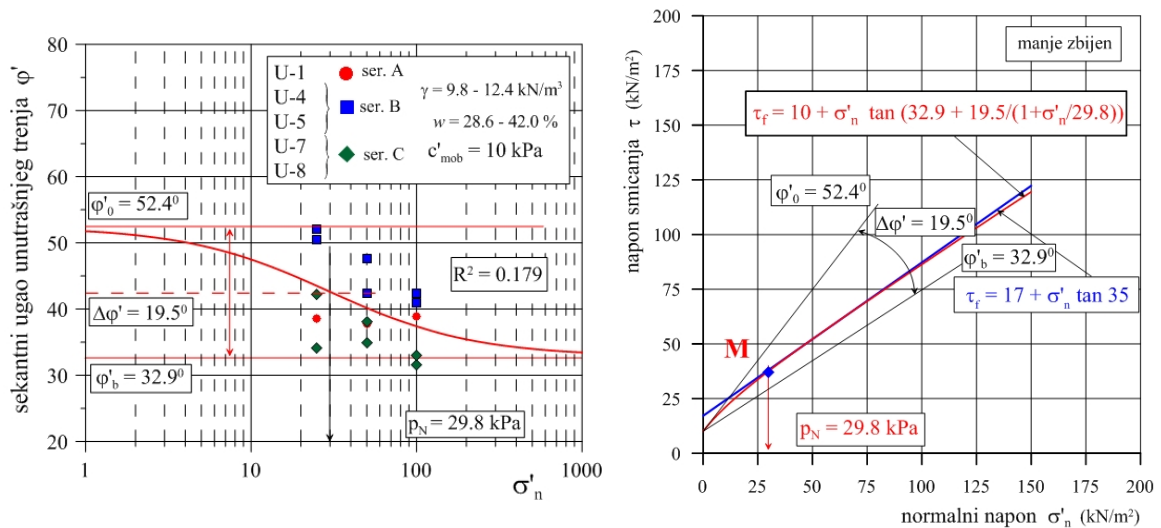
Slika 8.13 Krivolinijska jednačina čvrstoće hiperboličkog oblika manje zbijenog otpada ($c'_{mob} = 0$ kPa)



Slika 8.14 Krivolinijska jednačina čvrstoće hiperboličkog oblika manje zbijenog otpada ($c'_{mob} = 5$ kPa)

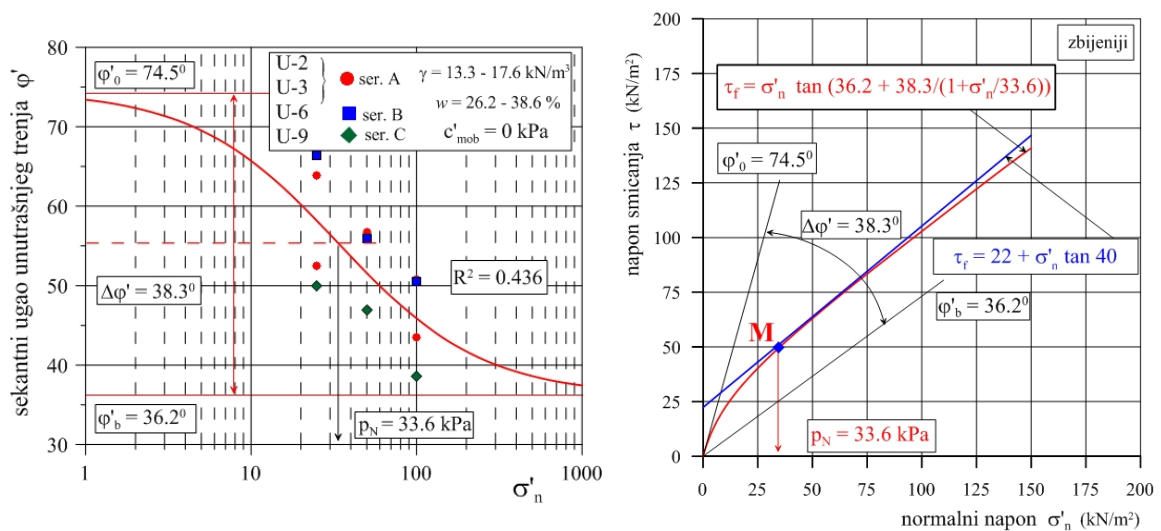
Za ovaj oblik jednačine čvrstoće smicanja, može se reći da je pokazao bolje slaganje sa pravolinijskom jednačinom, i to za sva tri analizirana slučaja: bez kohezije, sa kohezijom od $c' = 5$ i 10 kPa. Kako je u prethodnom slučaju predložena krivolinijska anvelopa u kojoj je uključena i kohezija $c' = 10$ kPa, to je urađeno i u ovom slučaju, tj. predložena je jednačina u sledećem obliku:

$$\tau_f = 10.0 + \sigma'_n \cdot \tan \left(33 + \frac{20}{1 + \frac{\sigma'_n}{30}} \right) \quad (8.5)$$

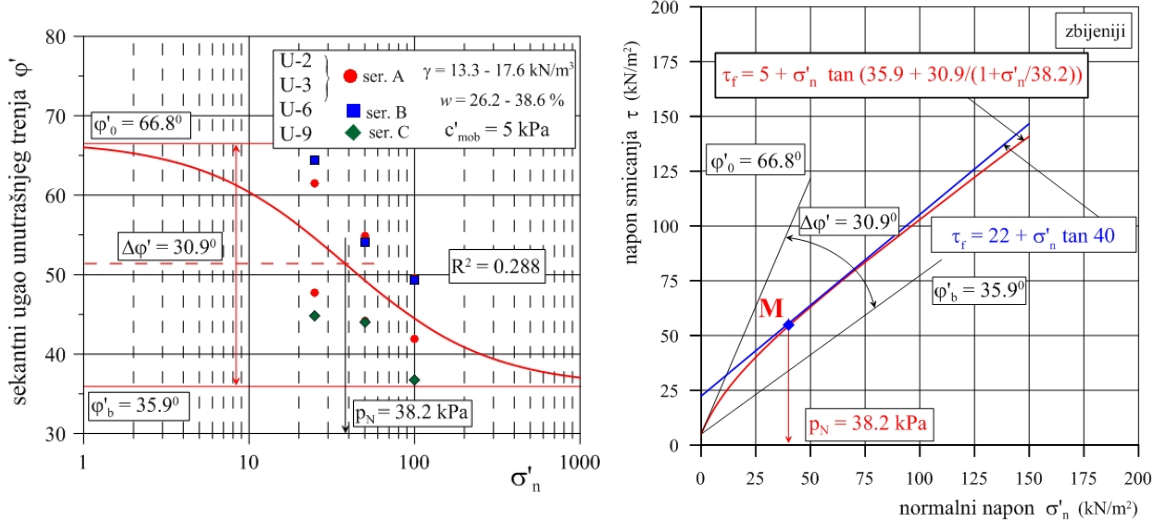


Slika 8.15 Krivolinijska jednačina čvrstoće hiperboličkog oblika manje zbijenog otpada ($c'_{mob} = 10$ kPa)

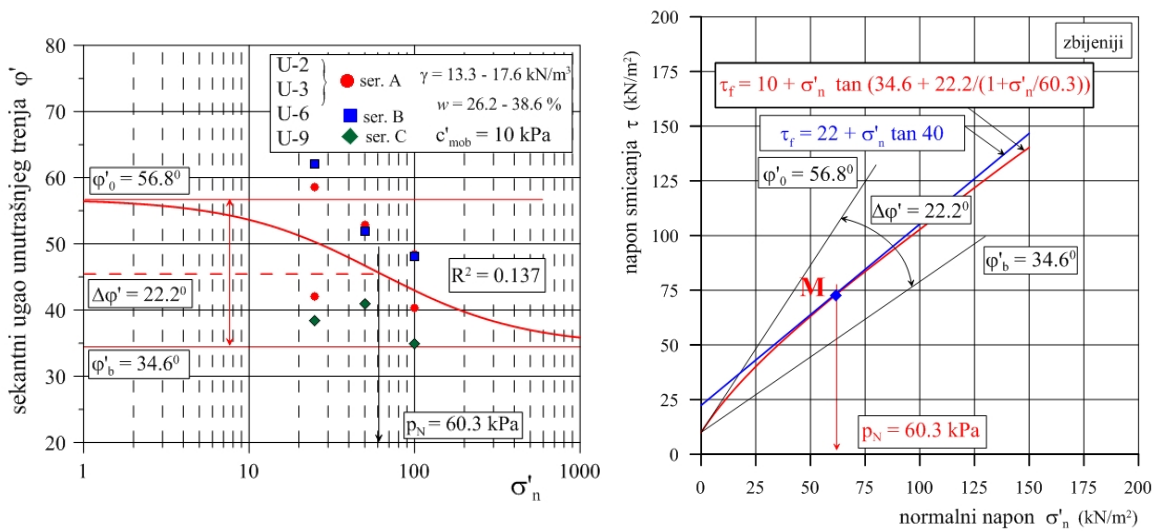
Rezultati izvršenih analiza, na uzorcima koji su svrstani u grupu zbijenog otpada, prikazani su na Slikama 8.16 – 8.18.



Slika 8.16 Krivolinijska jednačina čvrstoće hiperboličkog oblika zbijenijeg otpada ($c'_{mob} = 0$ kPa)



Slika 8.17 Krivolinijska jednačina čvrstoće hiperboličkog oblika zbijenijeg otpada ($c'_{mob} = 5 \text{ kPa}$)



Slika 8.18 Krivolinijska jednačina čvrstoće hiperboličkog oblika zbijenijeg otpada ($c'_{mob} = 10 \text{ kPa}$)

Za zbijeni otpad je, kao i u prethodnom slučaju, predložena krivolinijska anvelopa u kojoj je uključena kohezija $c'_{mob} = 10 \text{ kPa}$ i koja se može prikzati na sledeći način

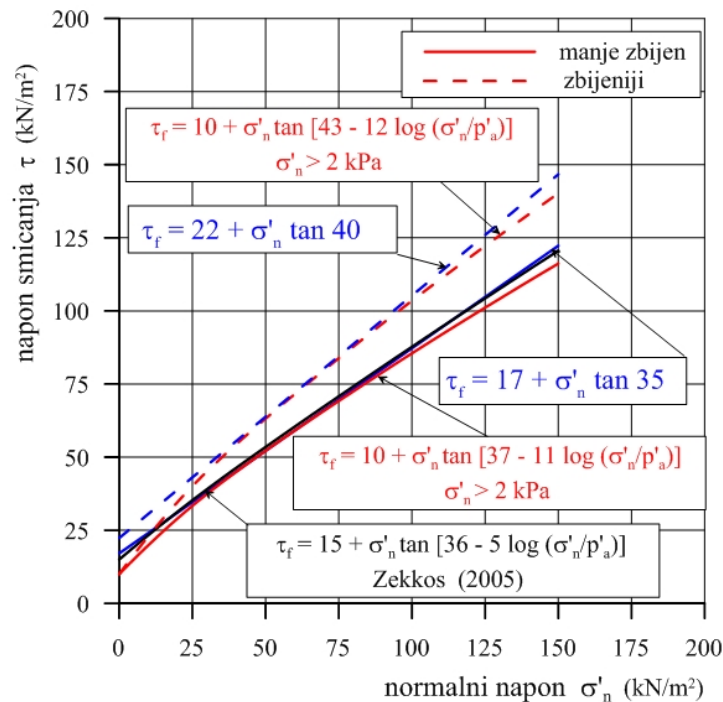
$$\tau_f = 10.0 + \sigma'_n \cdot \tan \left(35 + \frac{22}{1 + \frac{\sigma'_n}{60}} \right) \quad (8.6)$$

8.1.4. Verifikacija krivolinijskih oblika jednačine čvrstoće smicanja

Na osnovu pregleda literaturnih podataka, može se videti da su autori za definisanje čvrstoće smicanja komunalnog otpada, uglavnom predlagali pravolinijsku Kulon-Mor-Tercagijevu jednačinu. U literaturi se jedino može naći krivolinijska jednačina čvrstoće smicanja komunalnog otpada, koju je predložio Zekkos-a (2005). On je na osnovu obavljenih ispitivanja direktnog smicanja na 16 uzoraka komunalnog otpada (sa $\gamma = 10.2 - 15.1 \text{ kN/m}^3$), predložio logaritamski oblik jednačine čvrstoće smicanja, sa vrednostima uglova unutrašnjeg trenja: $\varphi'_0 = 40.8^\circ$ i $\Delta\varphi' = 14.0^\circ$. Međutim, analizirajući i rezultate drugih istraživača, on je preporučio opštu krivolinijsku anvelopu loma za komunalni otpad u sledećem analitičkom obliku:

$$\tau_f = 15.0 + \sigma'_n \cdot \tan \left[36.0 - 5.0 \cdot \log \left(\frac{\sigma'_n}{p'_a} \right) \right] \quad (8.7)$$

Kako za sada drugih predloga krivolinijske anvelope loma za komunalni otpad nema, predloženi krivolinijski oblici jednačine čvrstoće smicanja (jed. 8.3 i 8.4), upoređeni su sa jednačinom koju je predložio Zekkos, a rezultati su prikazani na Slici 8.19.

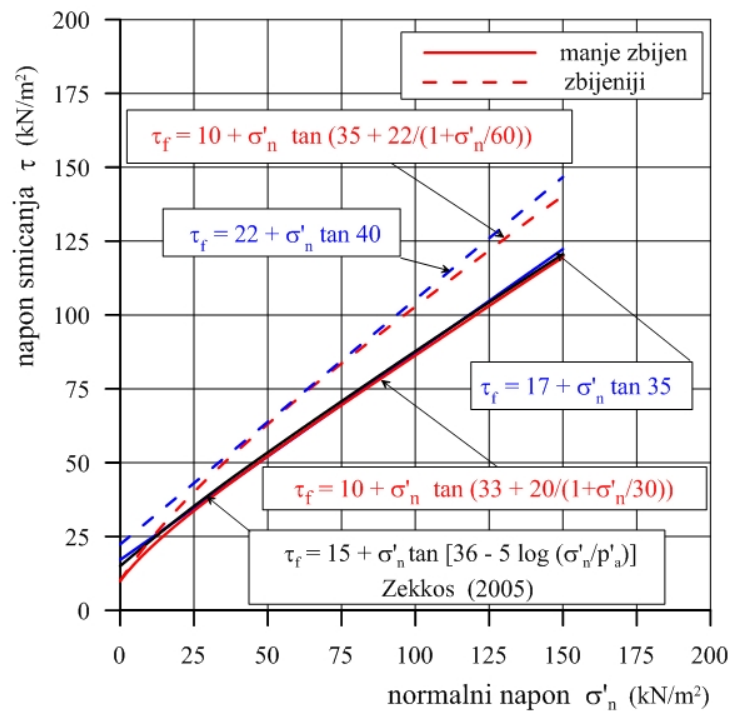


Slika 8.19 Krivolinijske anvelope loma logaritamskog oblika

Može se videti da se čvrstoća smicanja za komunalni otpad sa deponija u Srbiji dobro slaže sa jednačinom koju je predložio Zekkos (2005), u opsegu normalnih napona od $\sigma'_n = 25 - 100$ kPa. Za normalne napone $\sigma'_n > 100$ kPa, predložena krivolinijska jednačina čvrstoće smicanja, komunalnog otpada u Srbiji, ukazala je na veće neslaganje.

Na Slici 8.19 prikazane su i pravolinijske anvelope loma za rastresit do srednje zbijen i zbijen komunalni otpad. U oba slučaja, pravolinijske anvelope loma dosta se dobro poklapaju sa krivolinijskim, ali takođe samo u opsegu normalnih napona od $\sigma'_n = 25 - 100$ kPa. Međutim, pri normalnim naponima $\sigma'_n > 100$ kPa, pokazano je da se korišćenjem krivolinijske anvelope loma dobijaju manje vrednosti ugla unutrašnjeg trenja, odnosno dolazi do smanjenja čvrstoće smicanja u odnosu na pravolinijsku Kulon-Mor-Tercagijevu anvelopu.

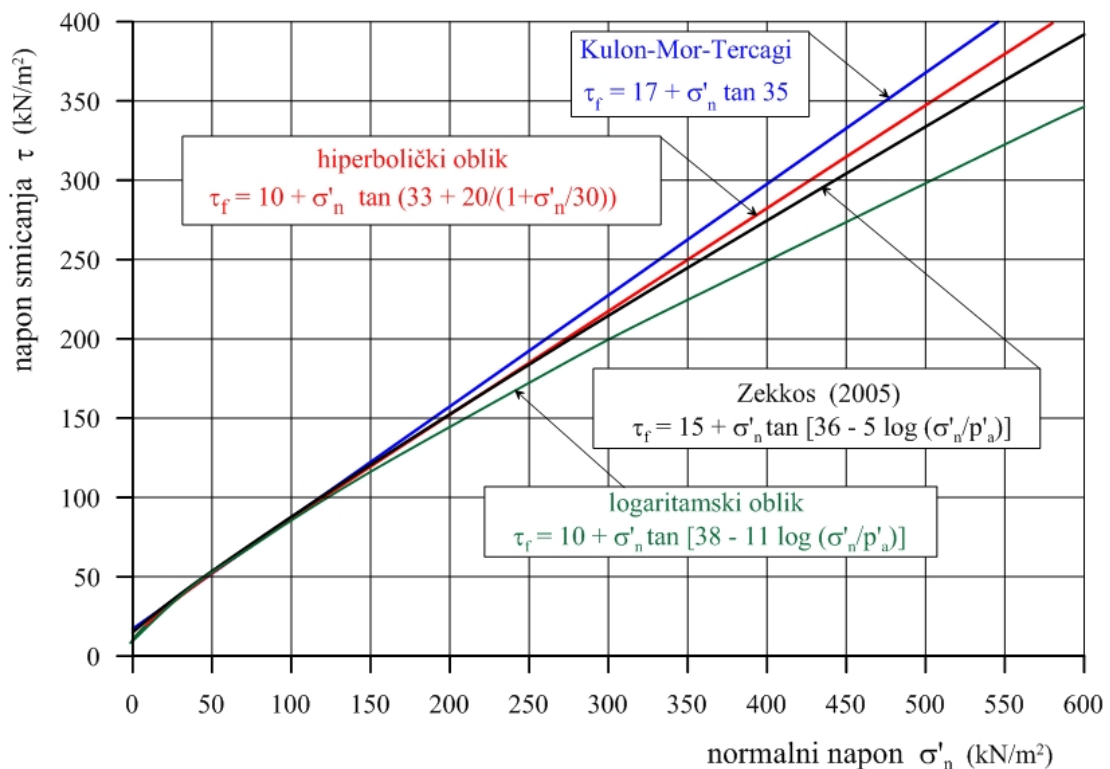
Kako hiperbolički oblik jednačine čvrstoće smicanja, do sada nije korišćen za opisivanje čvrstoće smicanja komunalnog otpada, dobijene vrednosti (jed. 8.5 i 8.6) upoređene su sa krivolinijskom anvelopom predloženom od strane Zekkos-a (2005). Rezultati ovog poređenja, prikazani su na Slici 8.20.



Slika 8.20 Krivolinijske anvelope loma hiperboličkog oblika

I u ovom slučaju se može primetiti da se preporučena čvrstoća smicanja za komunalni otpad sa deponija u Srbiji, dobro slaže sa jednačinom koju je predložio Zekkos (2005), ali za nešto veći opseg normalnih napona od $\sigma'_n = 20 - 150$ kPa.

Međutim, da bi se ukazalo na značaj korišćenja krivolinijske anvelope loma i za znatno veći opseg normalnih napona tj. za $\sigma'_n > 150$ kPa, na Slici 8.21 su prikazane zavisnosti za interval normalnih napona od 0 - 600 kPa.



Slika 8.21 Pravolinijske i krivolinijske anvelope loma

Jasno se može videti da predložena krivolinijska anvelopa loma hiperboličkog oblika, u odnosu na anvelope logaritamskog oblika, ima bolje slaganje sa pravolinijskom Kulon-Mor-Tercagijevom anvelopom. Međutim, kako komunalne deponije u Srbiji retko prelaze visinu od 15 m, to su i vertikalni efektivni naponi po pravilu manji od 150 kPa, pa se može reći da predložene zavisnosti, bilo da su u pitanju pravolinijska (Kulon-Mor-Tercagijev) ili krivolinijske (logaritamskog ili hiperboličkog oblika), daju prihvatljive rezultate.

Međutim, s obzirom da se u narednom periodu (2010 – 2019 god.) očekuje značajnije povećanje visina deponija ("Strategiji upravljanja otpadom za period 2010 - 2019") to će usloviti i povećanje normalnih efektivnih napona. Iz tog razloga, za potrebe analiza stabilnosti kosina i proračun nosivosti, može se preporučiti krivolinijska anvelopa loma hiperboličkog oblika, koja daje nešto manje vrednosti čvrstoće smicanja u odnosu na uobičajenu pravolinijsku anvelopu loma. Ako se uzme u obzir i činjenica da su na osnovu podataka terenskih ispitivanja i na osnovu povratnih analiza (Slika 8.5), predlagane manje vrednosti čvrstoće smicanja, onda i sa tog aspekta postoji opravdanje za njeno korišćenje.

Sa druge strane, predloženi logaritamski oblik daje još manju vrednost čvrstoće smicanja. Međutim, treba reći da logaritamska funkcija ne važi za čitav interval normalnih napona (pokazano je na Slikama 6.121 i 6.122) jer nije definisana u nuli, pa zato korišćenje hiperboličkog oblika krivolinijske čvrstoće smicanja ima prednost, u odnosu na predloženu anvelopu logaritamskog oblika. Ipak, autor predloženog logaritamskog oblika (Zekkos, 2005), napominje da je za sada njegova prednost korišćenja u tome što se on bazira na mnogo većem broju analiziranih opita direktnog smicanja koji su obavljani na otpadnim materijalima, takoreći, iz celog sveta. U svakom slučaju oba krivolinijska rešenja, uključuju znatno veći opseg normalnih napona, pa zato kada treba analizirati kosine visokih deponija, treba usvojiti jedno od ova dva predložena rešenja.

8.2. VERIFIKACIJA PARAMETARA STIŠLJIVOSTI

U okviru ovog poglavlja prikazaću najčešće korišćene međuzavisnosti osnovnih fizičkih pokazatelja i parametara stišljivosti komunalnog otpada i to:

- koeficijenta poroznosti i indeksa primarne i sekundarne kompresije
- koeficijenta poroznosti i modifikovanih indeksa primarne i sekundarne kompresije
- vertikalnog efektivnog napona i indeksa sekundarne kompresije
- vertikalnog efektivnog napona i modula stišljivosti

S obzirom da se sva laboratorijska ispitivanja komunalnog otpada izvode na veštački pripremljenim uzorcima, sa izrazito heterogenim sastavom, različitog granulometrijskog sastava, različite zbijenosti i sl., verifikacija je obavljena na osnovu poređenja sa rezultatima koji su drugi istraživači prikazali u literaturi. Ovo je urađeno za sledeće parametre:

- indeks i modifikovani indeks primarne kompresije (C_c, C_c')
- indeks i modifikovani indeks sekundarne kompresije (C_α, C_α') i
- modul stišljivosti (M_v).

8.2.1. Zavisnost indeksa i modifikovanog indeksa primarne kompresije (C_c, C_c') od koeficijenta poroznosti

U Tabeli 8.4, zbirno su prikazane vrednosti indeksa i modifikovanog indeksa primarne i sekundarne kompresije, koje je prezentovalo tridesetak autora, uključujući i vrednosti koje su dobijene ovim istraživanjima.

Može se primetiti da se vrednosti dosta razlikuju i da većina autora daje dosta široke intervale. Jedan od razloga za ovako izraženo rasipanje rezultata mogao bi da bude način pripreme uzorka, odnosno, različite početne vrednosti koeficijenta poroznosti i zapreminske težine, ali i primena različitih vrednosti normalnih napona tokom ispitivanja. Treba, takođe, napomenuti da su autori primenjivali i različite metodologije tokom vršenja ispitivanja. Tako su pojedini autori vršili kratkotrajna ispitivanja, a opterećenja u toku jednog stupnja trajala su od nekoliko sati do nekoliko dana (Chen i dr. 2009; Chen i dr. 2010; Babu i dr. 2010). Nasuprot tome u nekim slučajevima, vreme po jednom stupnju opterećenja iznosilo je više meseci (Hossain i dr. 2003; Singh, 2008), pa i do godinu dana (Marques i dr. 2003).

S druge strane, neki rezultati dobijeni su na malom broju uzoraka (Singh, 2008., na 4), a neki na preko 30 uzoraka (Chen i dr. 2009., na 31). Pored toga, razlikovali su se i aparati u kojima su vršena ispitivanja, jer su osim konvencionalnih edometarskih aparata, korišćeni i specijalni aparati koji su uključivali i mogućnost simuliranja dugotrajnog procesa biodegradacije.

Tabela 8.5. Zbirni prikaz parametara stišljivosti

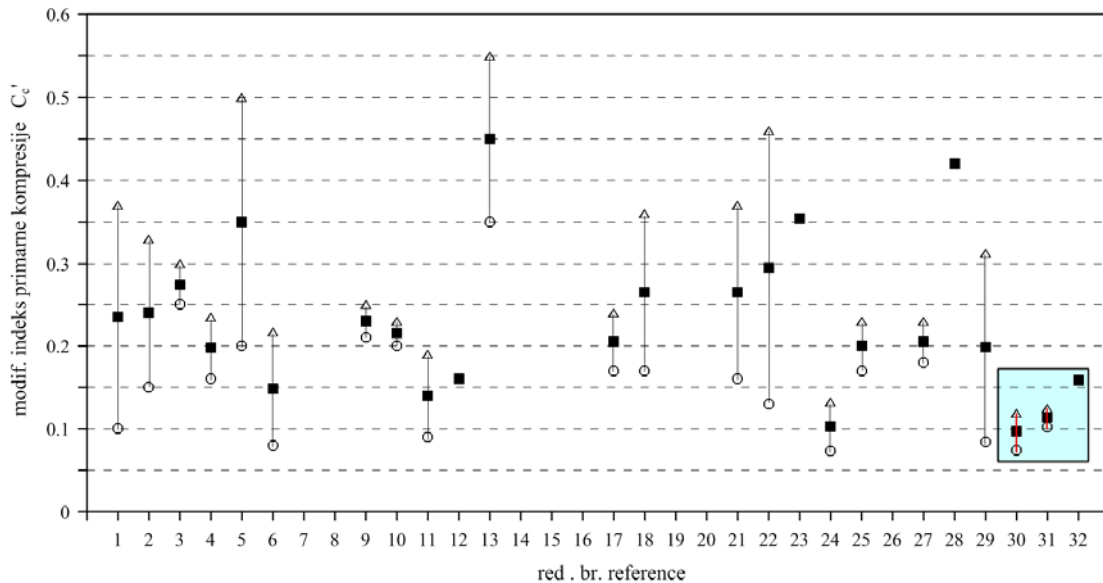
Red. br.	Referenca	C_c	C_c'	C_α	C_α'	Napomena
1a	Sowers, 1973	0.3-1.1	0.1-0.37	0.06-0.18	0.02-0.06	za $e_0 = 2$
2a	Zoino, 1974		0.15-0.33		0.013-0.03	
3a	Converse, 1975		0.25-0.3		0.07	
4a	Rao et al., 1977		0.16-0.235		0.012-0.046	
5a	Landva et al., 1984		0.2-0.5		0.0005-0.029	
6a	Oweis and Khera, 1986		0.08-0.217		0.02-0.072	
7a	Bjarngard and Edgers, 1990				0.004-0.04	
8a	Fassett et al., 1994				<0.1	
9a	Wall and Zeiss, 1995		0.21-0.25		0.033-0.056	
10a	Gabr and Valero, 1995	0.4-0.9	0.2-0.23	0.03-0.09	0.015-0.023	$e_0 = 1-3$ starost otpada od 15 – 30 god.
11a	Boutwell and Fiore, 1995		0.09-0.19		0.006-0.012	
12a	Stulgis, 1995		0.16		0.02	
13a	GeoSyntec, 1996		0.35-0.55	0.1-0.18		pov. analize na deponijama u USA
14a	Green and Jamenjad, 1997				0.01-0.08	
15a	Oweis and Khera, 1998				0.001-0.04	
16b	Sharma et al., 1999			0.02-0.07		
17a	Landva et al., 2000		0.17-0.24		0.01-0.016	$\gamma = 7.6-10.4$ kN/m ³
18a	Qiau et al., 2001		0.17- 0.36		0.01-0.1	
19b	Machado et al., 2002	0.52-0.92	0.21	0.021- 0.044	0.012-0.016	$\sigma'_v = 60-640$ kPa
20b	Park et al., 2002				0.014-0.063	sveži otpad
21a	Hossain et al., 2003		0.16-0.37	0.07-0.22	0.015-0.030	$e_0 = 2-2.8$
22a	Liu Rong et al., 2003		0.13-0.46			$e_0 = 3.5-5.0$
23a	Chen and Ke, 2003		0.354			$e_0 = 3.8$
24b	Marques et al., 2003		0.073-0.132			terenska osmatranja
25b	Anderson et al., 2004		0.17-0.23		0.024-0.030	terenska osmatranja
26b	Lewis et al., 2004				0.014-0.045	meh. tretiran (din. zbijan; usitnjen)
27c	Vilar and Carvalho, 2004	0.52-0.92	0.18-0.23	0.021-0.044	0.012-0.016	starost otpada oko 15 god
28c	Singh, 2008		0.42		0.0005-0.15	$\sigma'_v = 22-180$ kPa
29a	Chen et al., 2009	0.23-1.42	0.084-0.313			$e_0 = 1.1-4.2$
30	Rakić, 2013	0.19-0.35	0.074-0.119	$(C_\alpha)_{min}$ 0.001-0.024 $(C_\alpha)_{max}$ 0.024-0.107	$(C_\alpha')_{min}$ 0.0011-0.0089 $(C_\alpha')_{max}$ 0.0086-0.0509	starost oko 15 god $e_0 = 1.56-1.94$
31	Rakić, 2013	0.27-0.38	0.102-0.125	$(C_\alpha)_{min}$ 0.003-0.025 $(C_\alpha)_{max}$ 0.011-0.093	$(C_\alpha')_{min}$ 0.0012-0.0082 $(C_\alpha')_{max}$ 0.0038-0.0302	starost oko 40 god $e_0 = 1.61-2.06$
32	Rakić, 2013	0.425	0.159	$(C_\alpha)_{min}$ 0.018-0.027 $(C_\alpha)_{max}$ 0.047-0.061	$(C_\alpha')_{min}$ 0.0068-0.0102 $(C_\alpha')_{max}$ 0.0174-0.0228	Izmešani otpad $e_0 = 1.68$

a – podaci su prezentovani od strane Chen i dr. 2009

b – podaci su prezentovani od strane Sharma i dr. 2007

c – podaci su prezentovani od strane Singh-a., 2008

Prema podacima prikazanim u Tabeli 8.5, može se uočiti da se vrednosti modifikovanog indeksa primarne kompresije (C_c'), koje su dobijene laboratorijskim ispitivanjima za potrebe ove doktorske disertacije, kreću u domenu najnižih vrednosti koje su prikazane u literaturi. Radi preglednosti i lakšeg poređenja, na Slici 8.22 su prikazani rezultati iz Tabele 8.5, koji se odnose na modifikovani indeks primarne kompresije.

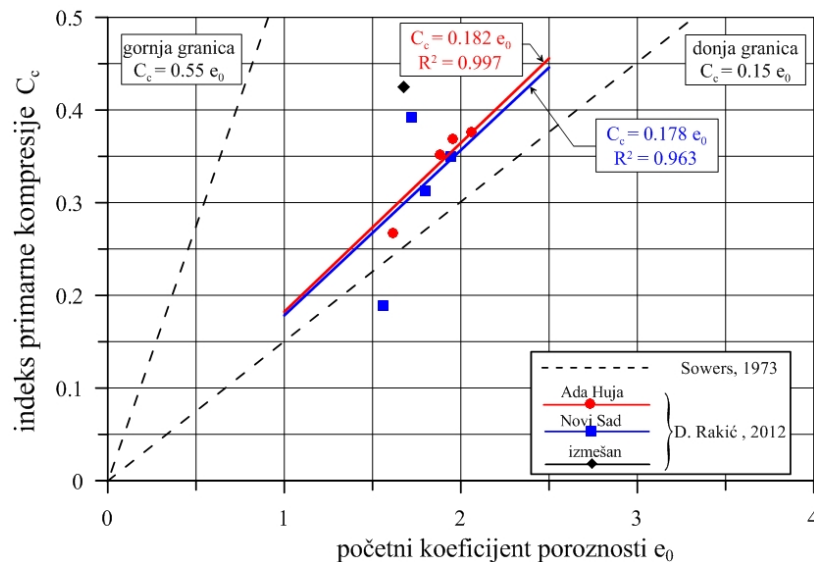


Slika 8.22. Uporedni prikaz modifikovanog indeksa primarne kompresije

Korelacione zavisnosti, koje se odnose na indekse primarne kompresije, vrlo retko se mogu naći u literaturi. Najčešće primenjivana zavisnost jeste ona koju je predložio Sowers (1973), a odnosi se na vezu indeksa primarne kompresije i početnog koeficijenta poroznosti. Na Slici 8.23, prikazani su kako rezultati koji su dobijeni istraživanjima za potrebe ove disertacije, kao i rezultati Sowersa. Vidi se da se ovde dobijene vrednosti indeksa primarne kompresije dobro uklapaju u interval graničnih vrednosti koji je predložio Sowers. Za uspostavljenu zavisnost između indeksa primarne kompresije i početnog koeficijenta poroznosti, može se reći da približno odgovara donjoj granici sa vrednostima od $C_c = 0.178 e_0$ do $C_c = 0.182 e_0$. Ove vrednosti navode na opšti zaključak da ispitivani otpad sadrži manje organskih materija (videti Sliku 7.4). Pored toga, s obzirom da su uspostavljene zavisnosti, bez obzira na lokaciju uzetih uzoraka, vrlo slične, može se zaključiti da starost otpada pa i njegov sastav, nemaju veliki uticaj na indeks sekundarne kompresije. Iz tog razloga se za komunalni otpad u Srbiji može

preporučiti sledeća zavisnost indeksa primarne kompresije i početnog koeficijenta poroznosti.

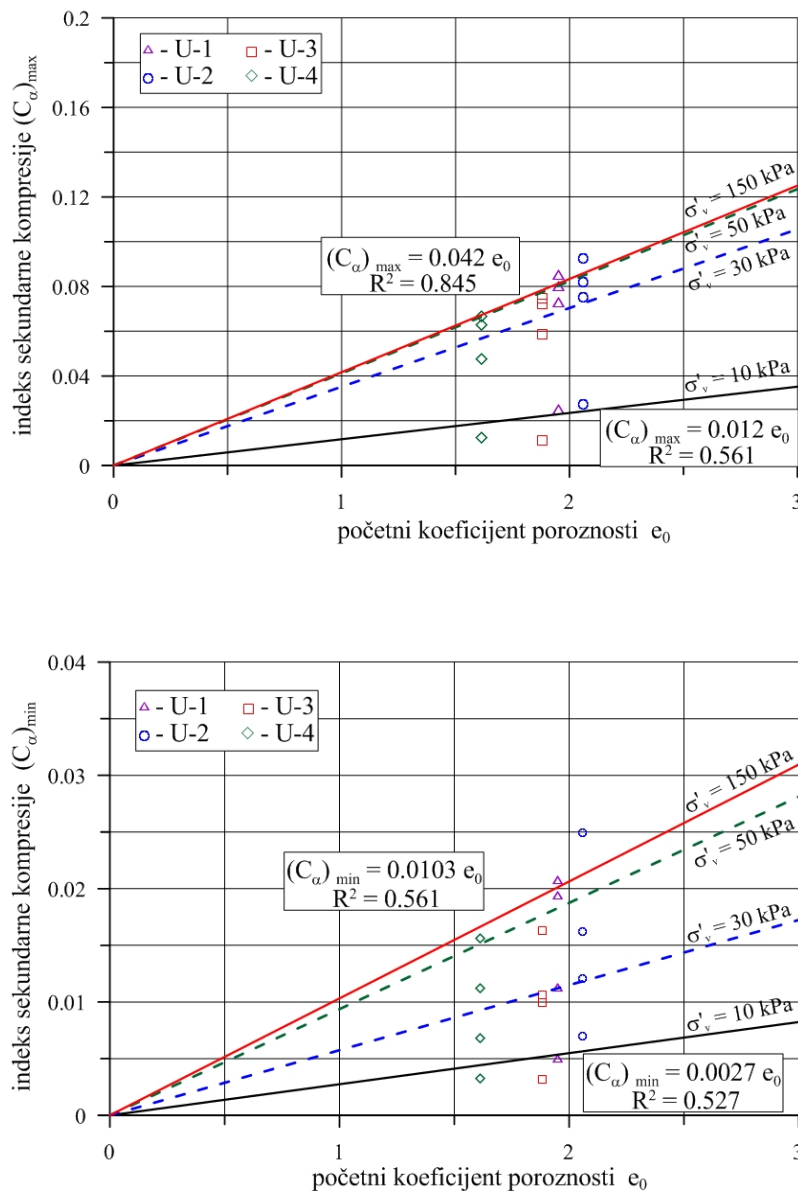
$$C_c = 0.18 \cdot e_0 \quad (8.8)$$



Slika 8.23. Zavisnost indeksa primarne kompresije i početnog koeficijenta poroznosti

8.2.2. Zavisnost indeksa i modifikovanog indeksa sekundarne kompresije (C_{α} , C_{α}') od koeficijenta poroznosti

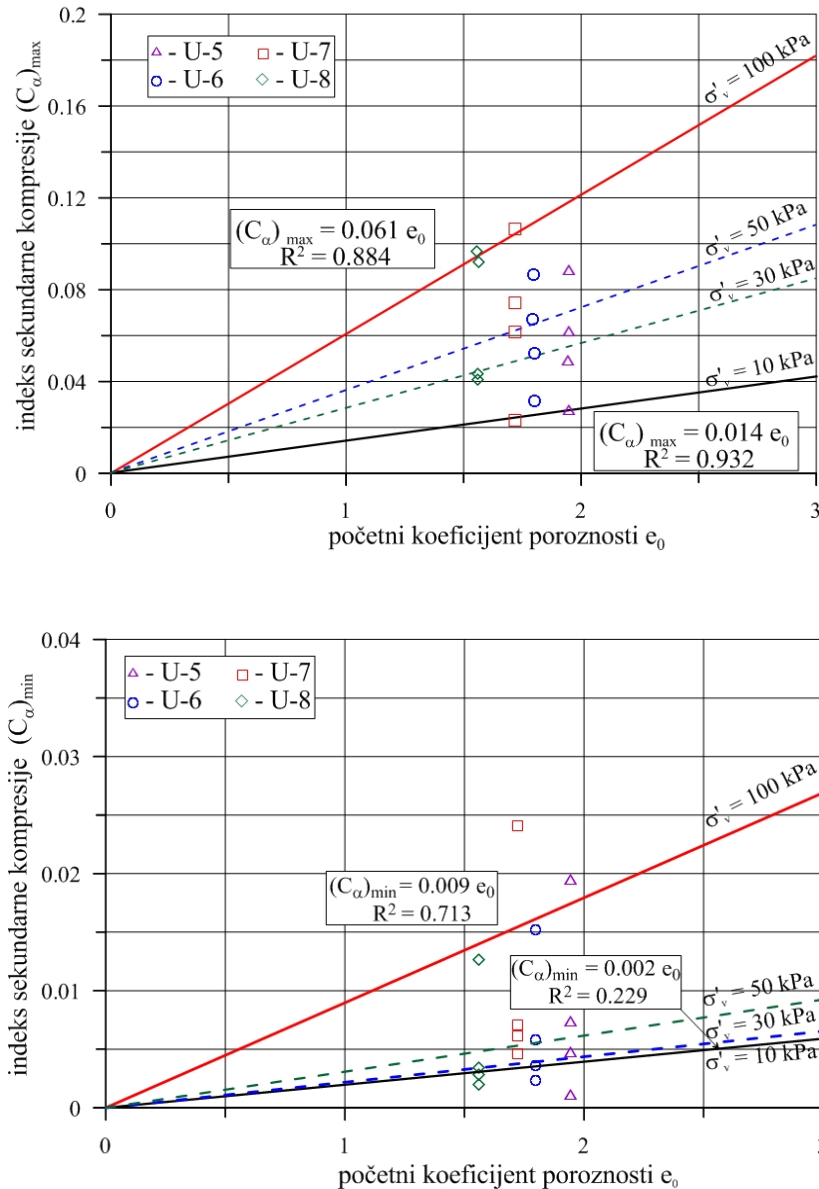
Kao što se može zaključiti iz Tabele 8.4, u literaturi se najčešće daju numeričke vrednosti koje se odnose na indeks ili modifikovani indeks sekundarne kompresije, koji je dobijen iz strmijeg dela krive vreme - sleganje, koji u suštini predstavlja njihove maksimalne vrednosti. Poret toga, vrlo retko se navodi njihova zavisnost od vertikalnih efektivnih napona. S obzirom da su u disertaciji, određivane vrednosti maksimalnog ali i minimalnog indeksa sekundarne kompresije i to za sve primenjene efektivne napone, na Slikama 8.24, 8.25 i 8.26 je prikazana za sve tri serije ispitanih uzoraka, njihova zavisnost od početnog koeficijenta poroznosti. Opšti je zaključak da maksimalni i minimalni indeksi sekundarne kompresije imaju tendenciju povećanja sa porastom vertikalnih napona.



Slika 8.24. Zavisnost maksimalnog i minimalnog indeksa sekundarne kompresije od početnog koeficijenta poroznosti - uzorci serije A

Kada je u pitanju maksimalni indeks sekundarne kompresije, vrednosti za stariji otpad (uzorci serije A), u zavisnosti od vertikalnih napona, kreću se u intervalu $(C_\alpha)_{\max} = 0.012e_0 - 0.042e_0$, dok je za minimalni indeks vrednosti ovaj interval $(C_\alpha)_{\min} = 0.0027e_0 - 0.0103e_0$.

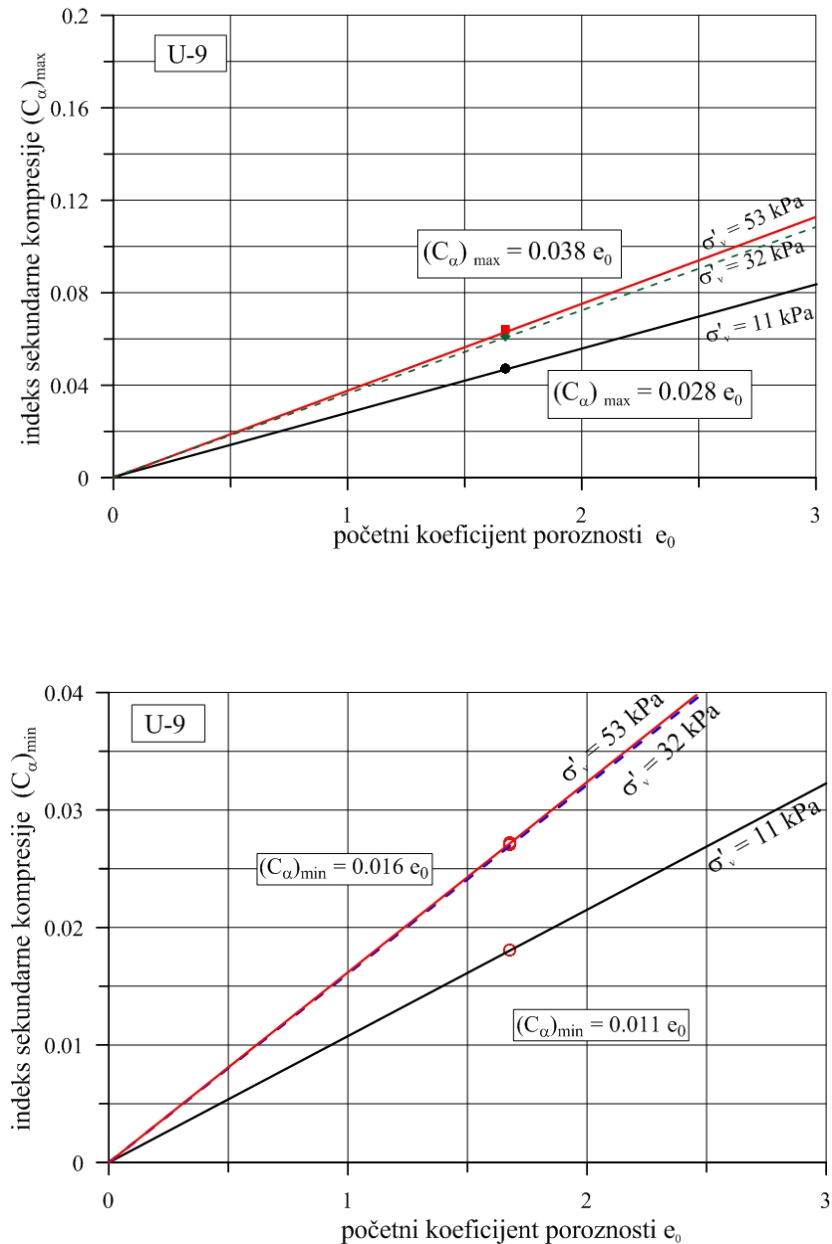
Za otpad srednje starosti (uzorci serije B), dobijene su slične vrednosti koje su za maksimalni indeks sekundarne kompresije u intervalu $(C_{\alpha})_{\max} = 0.014e_0 - 0.061e_0$, a za minimalni indeks sekundarne kompresije interval je $(C_{\alpha})_{\min} = 0.002e_0 - 0.009e_0$.



Slika 8.25. Zavisnost maksimalnog i minimalnog indeksa sekundarne kompresije od početnog koeficijenta poroznosti- uzorci serije B

Za mešani otpad su dobijene nešto veće vrednosti za minimalni indeks sekundarne kompresije tj. $(C_{\alpha})_{\min} = 0.011e_0 - 0.016e_0$, uz napomenu da je ova zavisnost uspostavljena samo za jedan uzorak. Za maksimalni indeks sekundarne kompresije

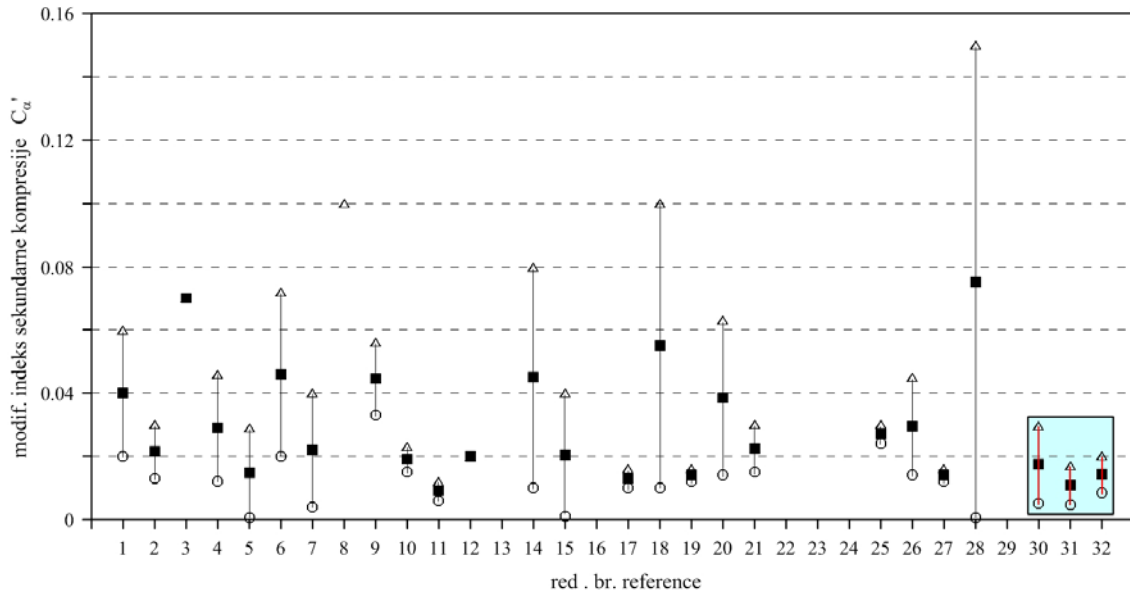
može se reći da predstavlja osrednjene vrednosti uzoraka serija A i B, jer se kreće u intervalu $(C_{\alpha})_{\max} = 0.028e_0 - 0.038e_0$.



Slika 8.26. Zavisnost maksimalnog i minimalnog indeksa sekundarne kompresije od početnog koeficijenta poroznosti- uzorak serije C

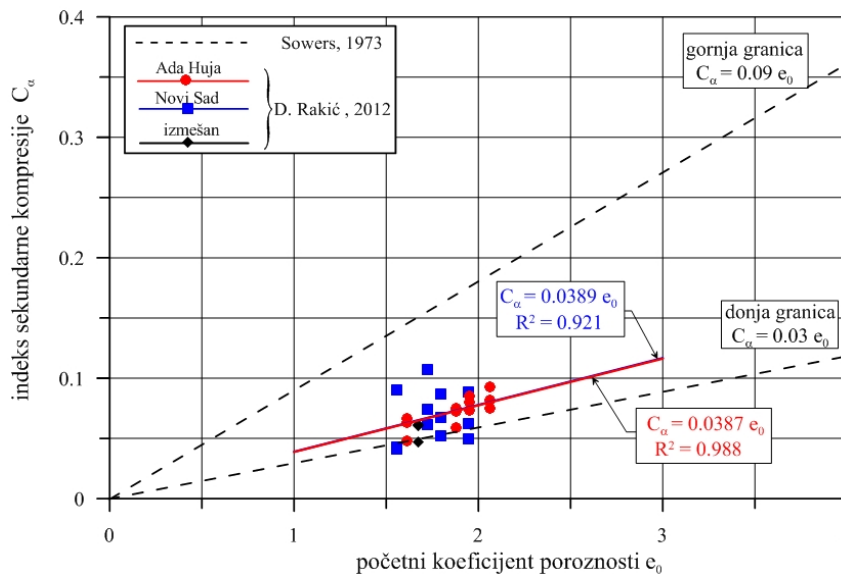
Podatke prikazane u Tabeli 8.4, iskoristio sam da bi na Slici 8.27, na isti način kao što je to urađeno za modificovani indeks primarne kompresije, zbirno prikazao i vrednosti maksimalnog modificovanog indeksa sekundarne kompresije.

I za ovaj parametar se može se reći da se njihove vrednosti dosta razlikuju i da inostrani autori daju dosta široke intervale. Međutim, za razliku od indeksa primarne kompresije, vrednosti maksimalnog indeksa sekundarne kompresije, uglavnom odgovaraju domenu srednjih vrednosti prikazanih u literaturi.



Slika 8.27. Uporedni prikaz modifikovanog indeksa sekundarne kompresije

Na Slici 8.28 zbirno su prikazane vrednosti maksimalnog indeksa sekundarne kompresije, koje su dobijene laboratorijskim ispitivanjima, za sve ispitane uzorke.



Slika 8.28. Zavisnost maksimalnog indeksa sekundarne kompresije i početnog koeficijenta poroznosti

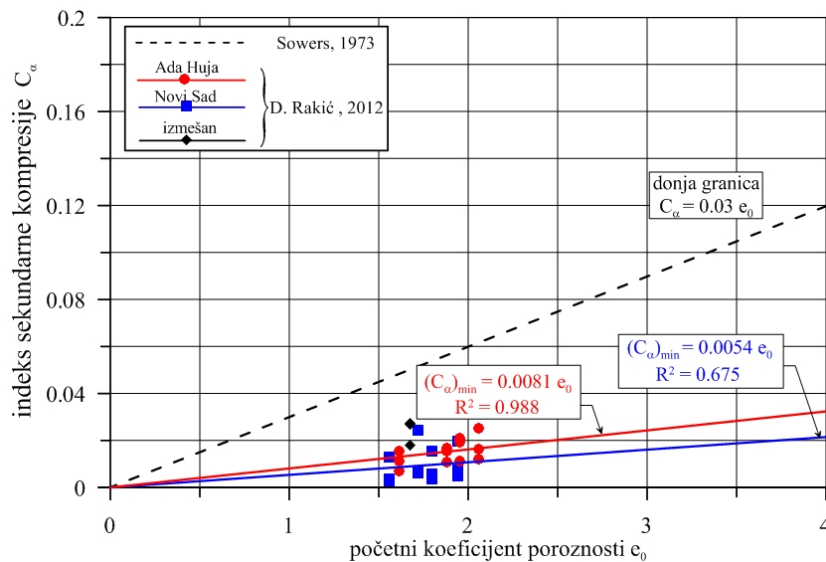
Može se videti da se vrednosti dobro uklapaju u interval koji je predložio Sowers. Kao i u prethodnom slučaju, korelaciona zavisnost između maksimalnog indeksa sekundarne kompresije i početnog koeficijenta poroznosti, približno odgovara donjoj predloženoj granici, sa vrednostima $C_\alpha = 0.0387e_0$, odnosno, $C_\alpha = 0.0389e_0$.

Ove vrednosti navode na opšti zaključak da su uslovi za dalje razlaganje otpada i njegovu dekompoziciju, uglavnom nepovoljni (videti Sliku 7.7). Pored toga, može se zaključiti da, zbog približno sličnog sastava ispitivanog komunalnog otpada (sastav analiziranih lokacija prikazan je u Poglavlju 4), njegova starost nije imala veliki uticaj na vrednosti indeksa sekundarne kompresije, jer je i za otpad sa deponije Ada Huja i deponije u Novom Sadu uspostavljena skoro identična korelaciona zavisnost.

Iz tog razloga je za komunalni otpad u Srbiji, preporučena sledeća zavisnost za maksimalni indeks sekundarne kompresije (Rakić i dr. 2011b)

$$(C_\alpha)_{\max} = 0.0388 \cdot e_0 \quad (8.9)$$

Slična naliza urađena je i za minimalni indeks sekundarne kompresije (Slika 8.29).



Slika 8.29. Zavisnost minimalnog indeksa sekundarne kompresije i početnog koeficijenta poroznosti

Za razliku od maksimalnog indeksa sekundarne kompresije, ovde je korelaciona zavisnost bila uslovljena starošću otpada. Međutim, radi pojednostavljena i u ovom

slučaju je za komunalni otpad u Srbiji, preporučena osrednjena vrednost za minimalni indeks sekundarne kompresije (Rakić i dr. 2011b)

$$(C_{\alpha})_{\min} = 0.0068 \cdot e_0 \quad (8.10)$$

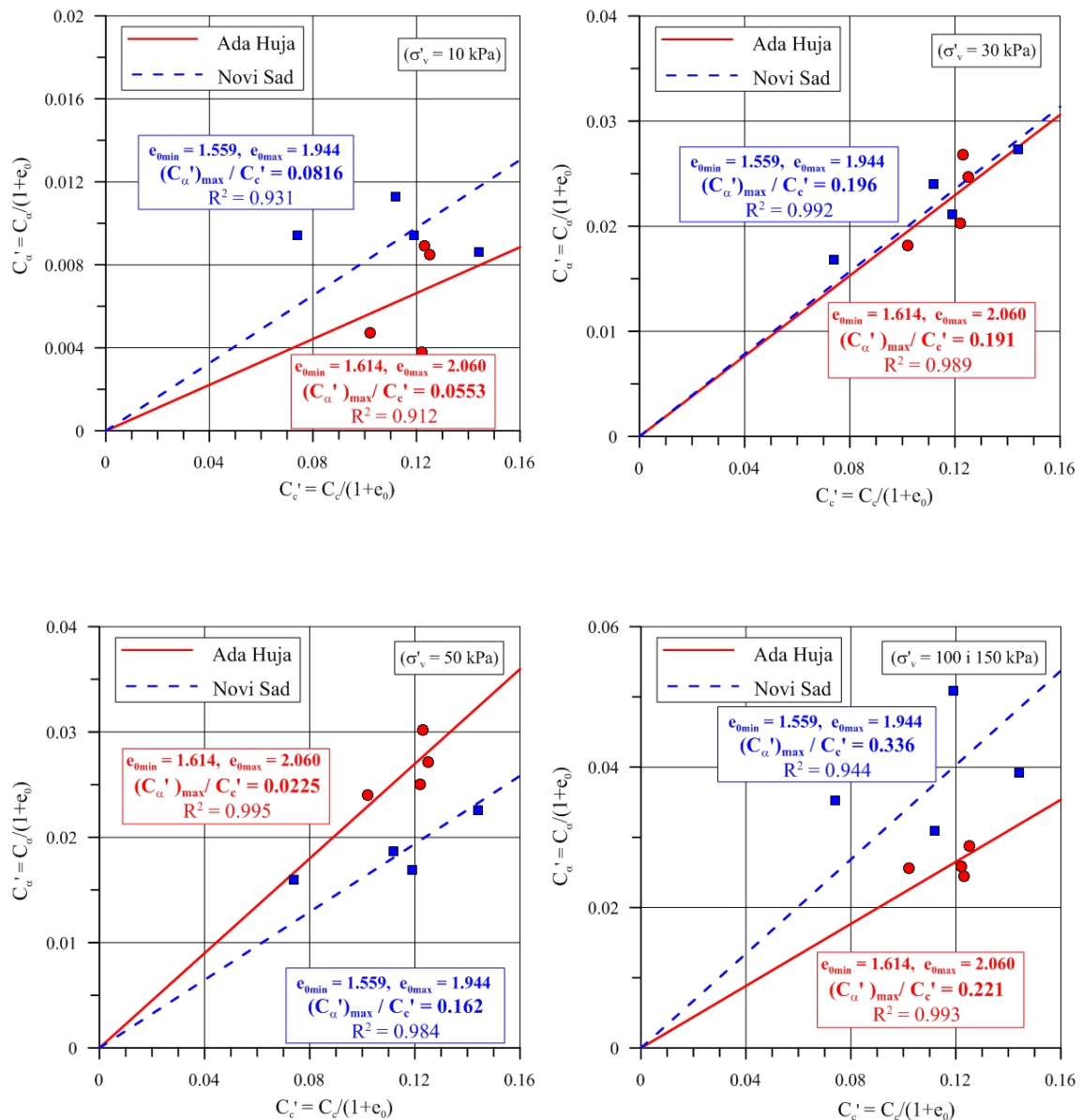
8.2.3. Odnos modifikovanih indeksa sekundarne i primarne kompresije

Određivanje parametara stišljivosti komunalnog otpada zahteva dugotrajna laboratorijska ispitivanja. Već je ranije napomenuto da su, u toku izrade ove disertacije vršena edometarska ispitivanja koja su trajala od 74 do 161 dana. S obzirom da primarna kompresija kod komunalnog otpada traje znatno kraće, u odnosu na sekundarnu (u ovom radu je usvojeno vreme primarne kompresije od oko 15 min), uspostavljanjem zavisnosti između ova dva parametra, moglo bi se značajno da skрати vreme ispitivanja.

Već je prikazano (Poglavlje 7) da su za sve ispitane uzorke, a u zavisnosti od vrednosti normalnih napona, sračunati minimalni $(C_{\alpha}')_{\min}$ i maksimalni $(C_{\alpha}')_{\max}$ modifikovani indeksi sekundarne kompresije. Kako su i za sve ispitane uzorke određene i vrednosti modifikovanog indeksa primarne kompresije (C_c'), na Slikama 8.30 i 8.31 prikazani su njihovi međusobni odnosi.

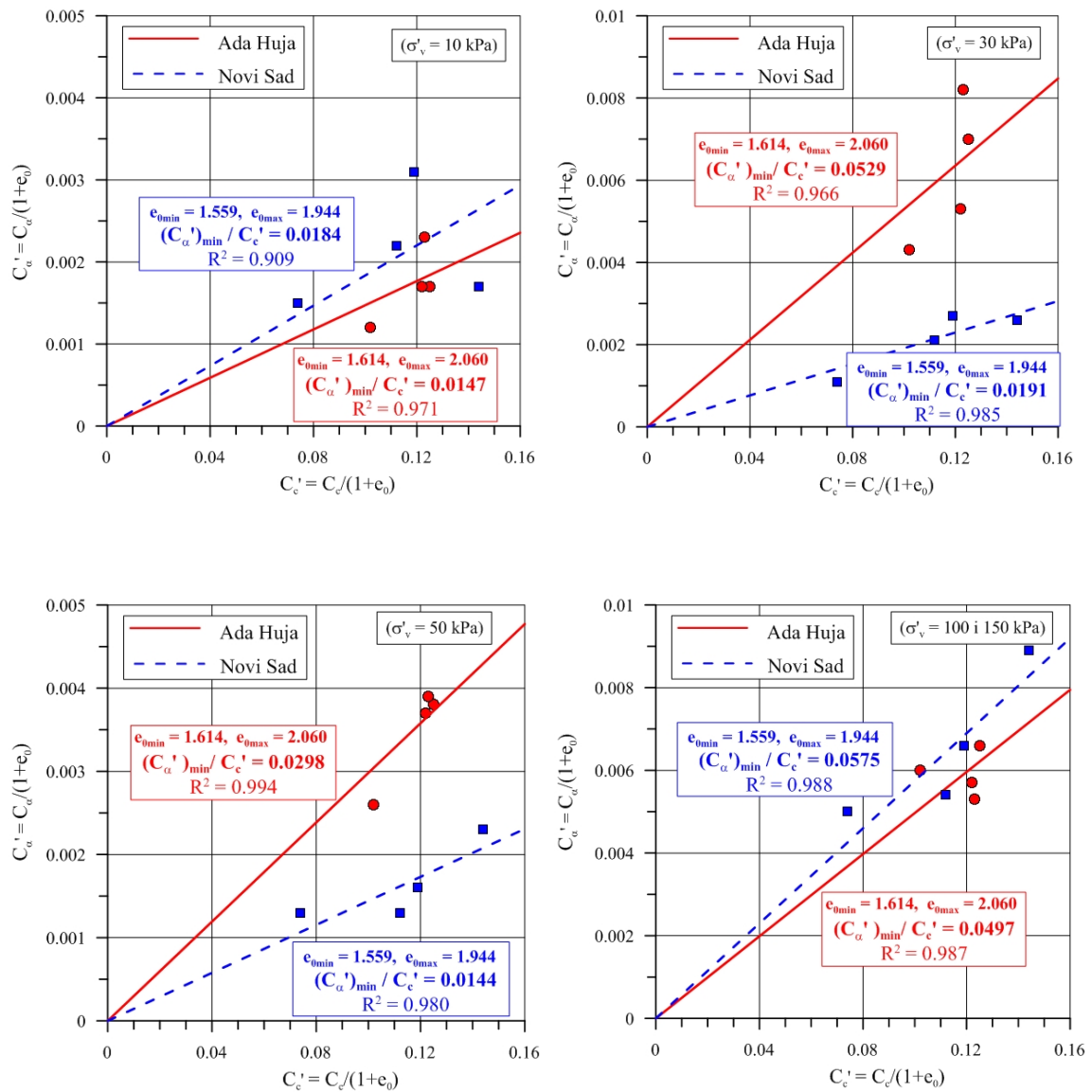
Kada su u pitanju maksimalni odnosi modifikovanog indeksa sekundarne i primarne kompresije, opšti je zaključak da on raste sa porastom vertikalnih napona. Pri donošenju ovog zaključka zanemario sam vrednost koja je dobijena za normalni efektivni napon $\sigma'_v = 50$ kPa i za deponiju Ada Huja i za deponiju u Novom Sadu.

Do sličnog zaključka se može doći i kada se analiziraju vrednosti za minimalne odnose modifikovanog indeksa sekundarne i primarne kompresije. U ovom slučaju, za otpad sa deponije Ada Huja, trebalo bi zanemariti vrednost dobijenu za normalni efektivni napon $\sigma'_v = 30$ kPa, a za otpad sa deponije u Novom Sadu, vrednost dobijenu za normalni efektivni napon $\sigma'_v = 50$ kPa.



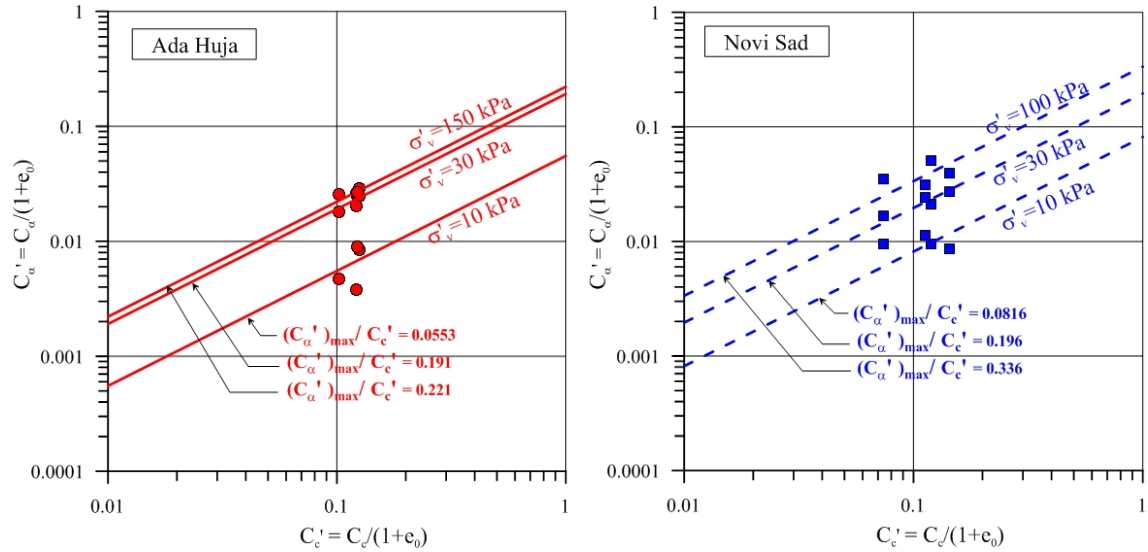
Slika 8.30. Odnos maksimalnog modifikovanog indeksa sekundarne kompresije i modifikovanog indeksa primarne kompresije

Nekoliko inostranih autora (Mesri i Castro, 1987; Mesri i dr. 1997) analiziralo je odnos indeksa sekundarne i primarne kompresije za različite vrste geomaterijala, ali ne i za komunalni otpad. Oni su zaključili da kod materijala kod kojih preovlađuje vlaknasta struktura (npr. treset) ovaj odnos daje najveće vrednosti, koje se kreću oko 0.07. Najmanja vrednost odnosa sekundarne i primarne kompresije, dobijena je za zrnaste materijale i kreće se oko 0.01.

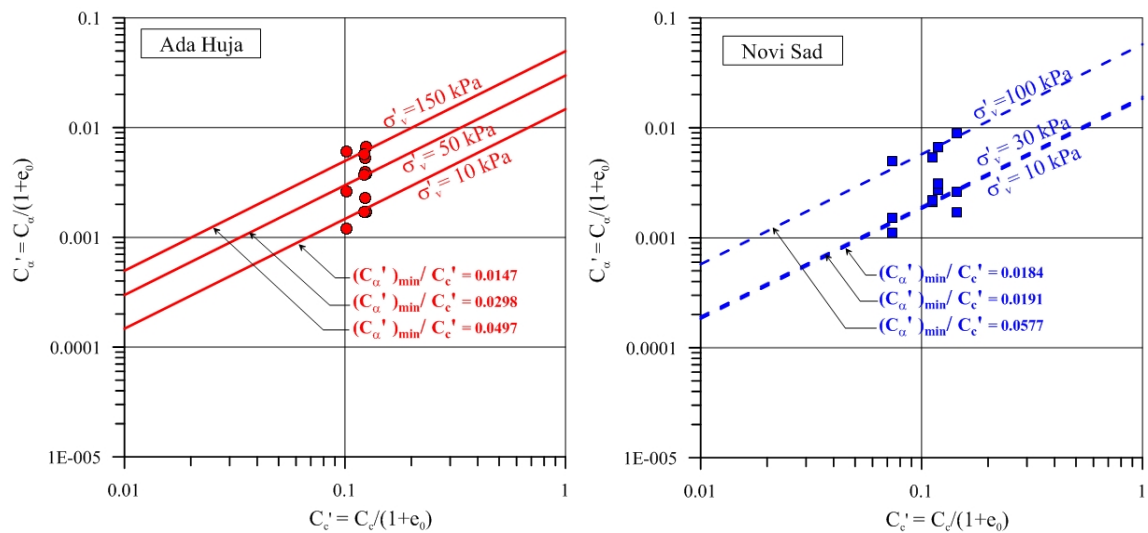


Slika 8.31. Odnos minimalnog modifikovanog indeksa sekundarne kompresije i modifikovanog indeksa primarne kompresije

Na Slikama 8.32 i 8.33, prikazani su ovi odnosi, uz napomenu da su zbog preglednosti rezultata oni odnos prikazani na logaritamskim dijagramima. U oba slučaja, dobijene vrednosti za pomenute normalne napone $\sigma'_v = 30$ kPa, odnosno $\sigma'_v = 50$ kPa, su izostavljene pa je uspostavljena zakonitost po kojoj sa porastom vertikalnih napona raste i odnos između modifikovanih indeksa sekundarne i primarne kompresije.



Slika 8.32. Uticaj normalnih napona na odnos maksimalnih modifikovanih indeksa sekundarne i primarne kompresije



Slika 8.33. Uticaj normalnih napona na odnos minimalnih modifikovanih indeksa sekundarne i primarne kompresije

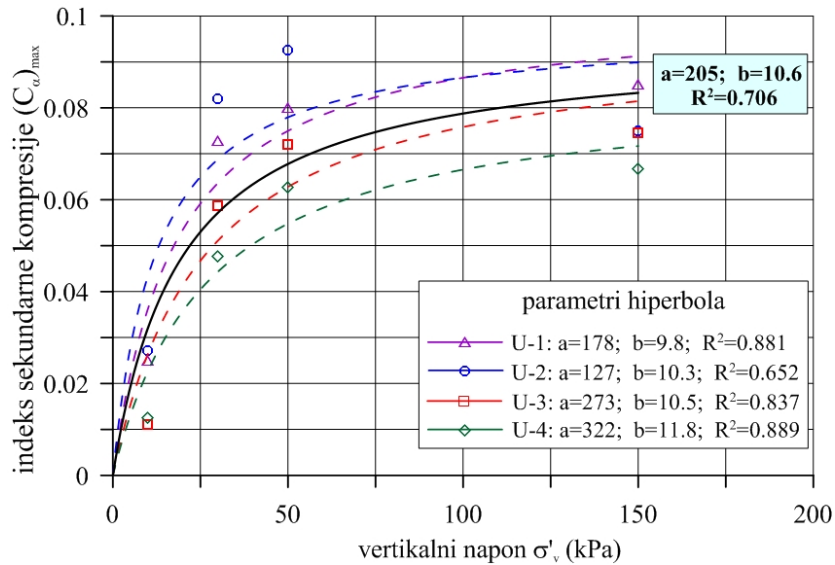
8.2.4. Zavisnost indeksa sekundarne kompresije od vertikalnih efektivnih napona

Dobijeni rezultati ukazuju na to da se sa povećanjem vertikalnog efektivnog napona povećavaju i vrednosti $(C_\alpha)_{\max}$ i $(C_\alpha)_{\min}$. Ova zavisnost se može analitički predstaviti pravouglom hiperbolom na sledeći način

$$(C_\alpha)_{\max, \min} = \frac{\sigma'_v}{a + b \cdot \sigma'_v} \quad (8.11)$$

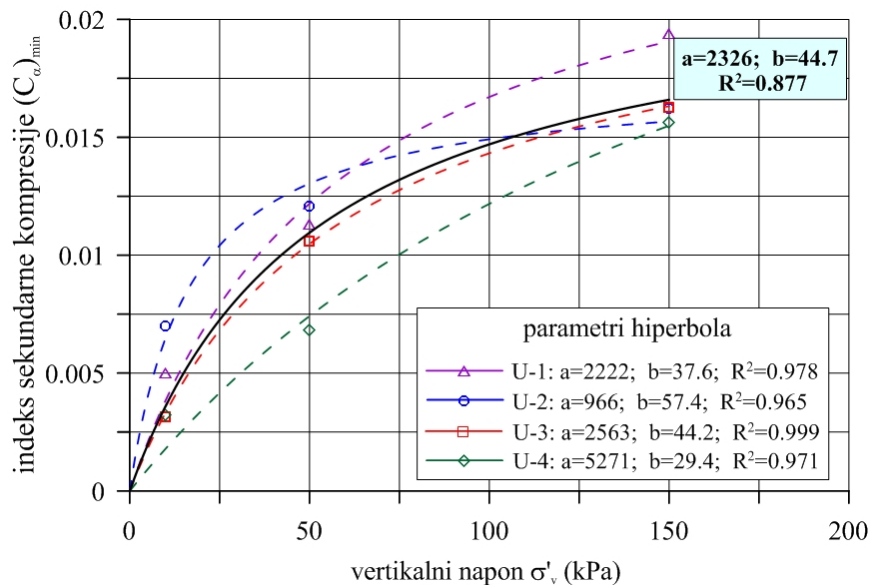
gde su a i b konstante

Na Slici 8.34, za uzorke koji karakterišu stariji otpada (Ada Huja, serija A), prikazana je hiperbolička zavisnost maksimalnog indeksa sekundarne kompresije i vertikalnog napona.



Slika 8.34. Analitička aproksimacija zavisnosti maksimalnog indeksa sekundarne kompresije od vertikalnog napona – serija A

Na Slici 8.35 prikazana je, za uzorke iz serije A, ova hiperbolička zavisnost za minimalni indeks sekundarne kompresije.



Slika 8.35. Analitička aproksimacija zavisnosti minimalnog indeksa sekundarne kompresije od vertikalnog napona – serija A

Na Slikama 8.34 i 8.35 su prikazani parametri hiperbola, za sve ispitane uzorke i može se videti da se vrednost parametra a kod maksimalnog indeksa sekundarne kompresije kreće u granicama $a = 127 - 322$, a parametra b u granicama $b = 9.8 - 11.8$. Za minimalni indeks sekundarne kompresije zanemario sam vrednosti za drugi stupanj opterećenja ($\sigma'_v = 30$ kPa) a dobijene vrednosti parametara a i b se kreću u znatno širim granicama i to $a = 966 - 5271$, odnosno $b = 29.4 - 57.4$.

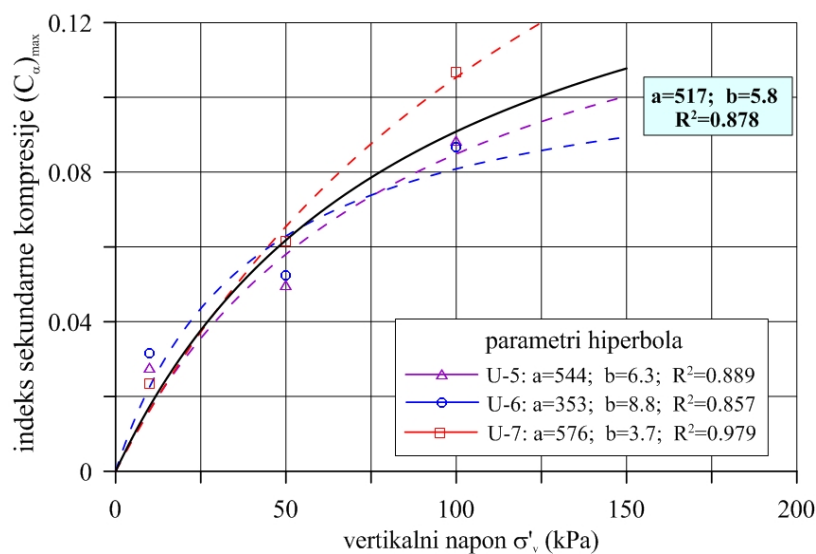
Iskoristio sam podatke, za sve uzorke iz ove serije, da bi prikazao i uopštene analitičke aproksimacije za stariji otpad. Za maksimalni indeks sekundarne kompresije zavisnost se daje u vidu sledećeg izraza

$$(C_\alpha)_{\max} = \frac{\sigma'_v}{205 + 10.6 \cdot \sigma'_v} \quad (8.12)$$

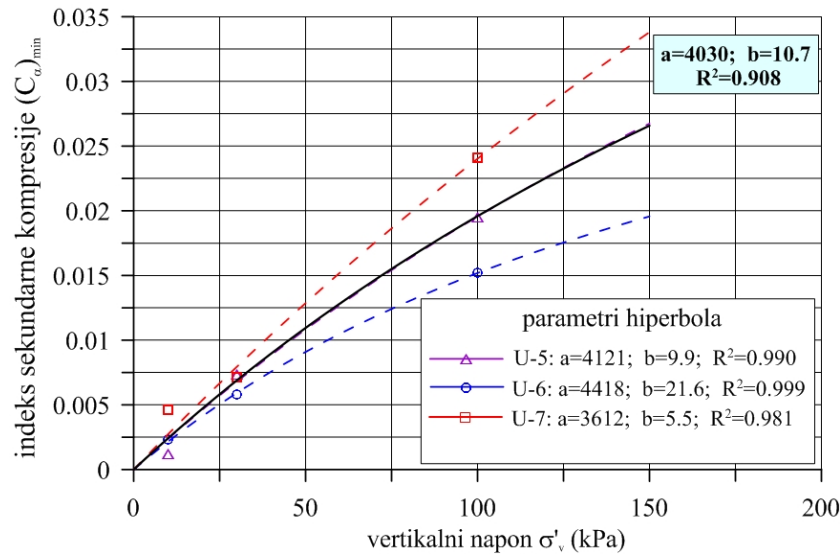
odnosno za minimalni indeks sekundarne kompresije

$$(C_\alpha)_{\min} = \frac{\sigma'_v}{2326 + 44.7 \cdot \sigma'_v} \quad (8.13)$$

Ista postupak sam sproveo i za uzorke iz serije B. Na Slici 8.36 i 8.37 prikazana je hiperbolička zavisnost maksimalnog i minimalnog indeksa sekundarne kompresije i vertikalnog napona.



Slika 8.36. Analitička aproksimacija zavisnosti maksimalnog indeksa sekundarne kompresije od vertikalnog napona – serija B



Slika 8.37. Analitička aproksimacija zavisnosti minimalnog indeksa sekundarne kompresije od vertikalnog napona – serija B

Za definisanje maksimalnog indeksa sekundarne kompresije, zanemarene su vrednosti dobijene za drugi stupanj opterećenja ($\sigma'_v = 30$ kPa), dok su za minimalni indeks sekundarne kompresije, zanemarene vrednosti za treći stupanj opterećenja ($\sigma'_v = 50$ kPa). Pored toga, nisu uključeni ni rezultati za uzorak U-8.

Za ovu seriju uzoraka, vrednosti parametra hiperbole za maksimalni indeks sekundarne kompresije kreću se u granicama $a = 353 - 576$, a parametra b u granicama $b = 3.7 - 8.8$.

Za minimalni indeks sekundarne kompresije vrednosti parametra a kreću se u granicama $a = 3612 - 4418$, a parametra b u granicama $b = 5.5 - 21.6$.

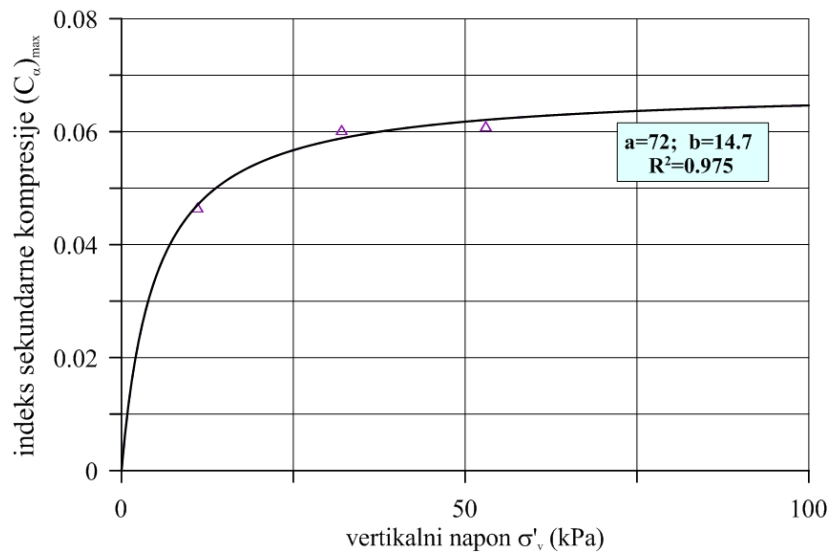
Uopštene analitičke aproksimacije, koje bi karakterisale otpad srednje starosti, mogu se dati sledećim jednačinama za maksimalni indeks sekundarne kompresije

$$(C_\alpha)_{max} = \frac{\sigma'_v}{517 + 5.8 \cdot \sigma'_v} \quad (8.14)$$

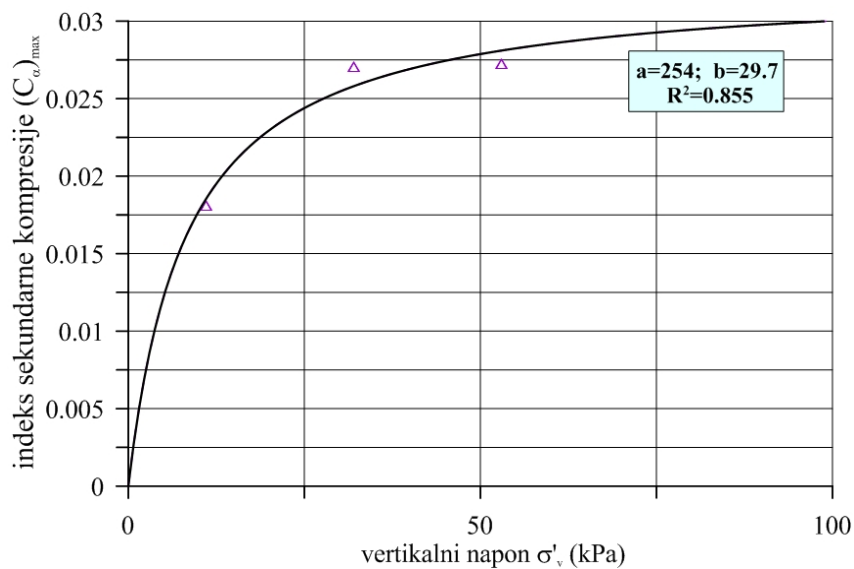
i za minimalni indeks sekundarne kompresije

$$(C_{\alpha})_{\min} = \frac{\sigma'_v}{4030 + 10.7 \cdot \sigma'_v} \quad (8.15)$$

Kada je u pitanju uzorak serije C, koji je formiran mešanjem otpada sa obe deponije, uspostavljene su sasvim zadovoljavajuće aproksimacije i za maksimalni i minimalni indeks sekundarne kompresije (Slike 8.38 i 8.39). Ipak treba napomenuti da se ovde radi samo o jednom uzorku i da je maksimalna vrednost vertikalnog napona iznosila 53 kPa (uzorak je ispitan u velikom edometarskom aparatu).



Slika 8.38. Analitička aproksimacija zavisnosti maksimalnog indeksa sekundarne kompresije od vertikalnog napona – serija C



Slika 8.39. Analitička aproksimacija zavisnosti minimalnog indeksa sekundarne kompresije od vertikalnog napona – serija C

Bez obzira na to i za ovaj uzorak, prikazane su uopštene analitičke aproksimacije, koje su date sledećim jednačinama:

za maksimalni indeks sekundarne kompresije

$$(C_{\alpha})_{\max} = \frac{\sigma'_v}{72 + 14.7 \cdot \sigma'_v} \quad (8.16)$$

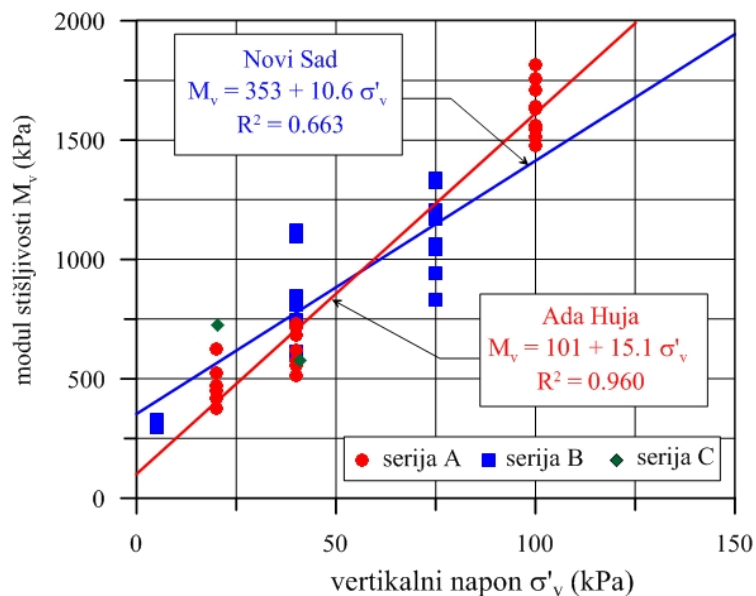
za minimalni indeks sekundarne kompresije

$$(C_{\alpha})_{\min} = \frac{\sigma'_v}{254 + 29.7 \cdot \sigma'_v} \quad (8.17)$$

Na kraju treba reći da Hossain (2002), poistovećuje minimalni koeficijent sekundarne kompresije sa puzanjem, dok strmiji deo, tj. maksimalni koeficijent, vezuje za početak biorazgradnje.

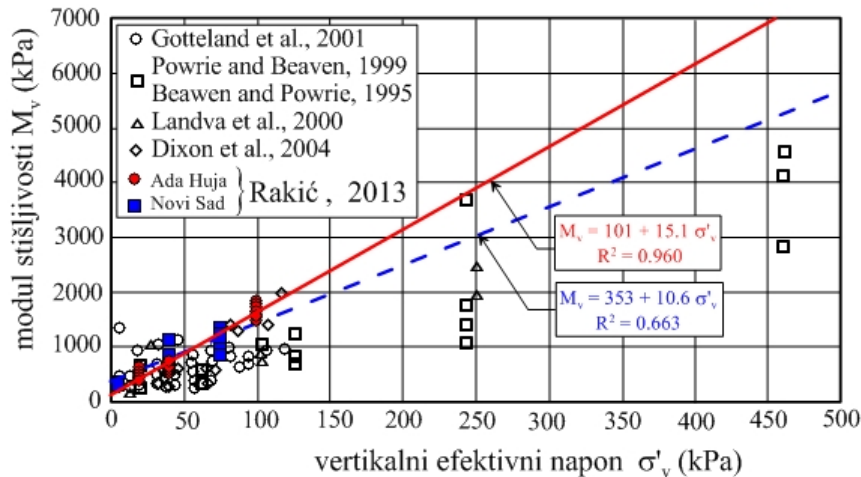
8.2.5. Verifikacija modula stišljivosti (M_v)

Na Slici 8.40 su zbirno prikazani u obliku linearne funkcije srednjih vrednosti razmatranih opsega vertikalnih efektivnih napona, rezultati modula stišljivosti, koji su dati u Poglavlju 7.



Slika 8.40. Zbirni prikaz linearne zavisnosti modula stišljivosti od srednjih vrednosti razmatranih opsega vertikalnih efektivnih napona

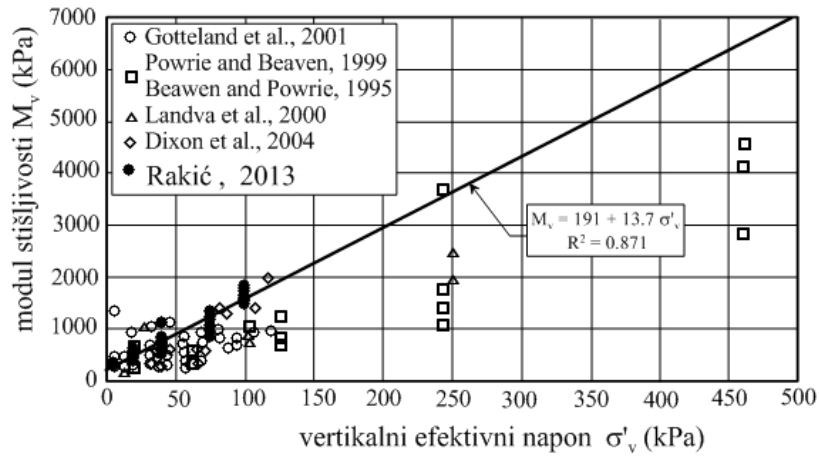
Za verifikaciju vrednosti modula stišljivosti, iskoristio sam zbirni dijagram koji su prikazali Dixon i dr. (2004).



Slika 8.41. Prosečne vrednosti modula stišljivosti u zavisnosti od lokacije komunalnog otpada

Poređenjem sa rezultatima drugih autora (Slika 8.41), može se zaključiti da postoji dobro slaganje za niže vrednosti efektivnih napona. Međutim, za vertikalne efektivne napone veće od 200 kPa, ovakva zavisnost daje veće vrednosti modula stišljivosti od onih koje su dobijene ispitivanjima. To ukazuje na činjenicu da ova veza nije linearna. Međutim, ako se ima u vidu da komunalne deponije u Srbiji retko prelaze visinu od 20 m, odnosno da su vertikalni efektivni naponi manji od 200 kPa, može se reći da je uspostavljena zavisnost odgovarajuća za postojeće deponije u Srbiji. Osim toga, može se videti da je modul stišljivosti starijeg otpada (deponija Ada Huja), u zoni većih vrednosti vertikalnog efektivnog napona, veći u odnosu na mlađi otpad sa deponije u Novom Sadu, dok je u zoni nižih napona (do 50 kPa), slučaj obrnut. Ovo navodi na opšti zaključak da degradacija i raspadanje komunalnog otpada, utiču na vrednosti modula stišljivosti.

Na Slici 8.42, zbirno su prikazane vrednosti modula stišljivosti, za sve ispitane uzorke, uz napomenu da su pojedine ekstremne vrednosti zanemarene.



Slika 8.42. Predložena korelaciona zavisnost modula stišljivosti od vertikalnog efektivnog napona

Na osnovu toga, uspostavljen je opšti oblik zavisnosti modula stišljivosti od vertikalnog efektivnog napona. Ova zavisnost karakteriše komunalni otpad sa deponija u Srbiji i može se prikazati sledećom linearnom jednačinom

$$M_v = 191 + 13.7 \cdot \sigma'_v \quad (8.18)$$

8.3. ZAKLJUČAK

Verifikaciju dobijenih rezultata mehaničkih karakteristika komunalnog otpada (parametara čvrstoće smicanja i deformabilnosti), izvršio sam na osnovu poređenja sa rezultatima koji su prikazani u literaturi.

Parametri čvrstoće smicanja, određeni su na uzorcima različite zbijenosti, pa je čvrstoća smicanja posebno definisana za manje zbijen (5 uzoraka), a posebno za zbijeniji komunalni otpad (4 uzorka). Uzorci serije D nisu analizirani u okviru ovog poglavlja, jer su oni formirani na poseban način. Verifikacija je urađena za pravolinijski Kulon-Mor-Tercagijev oblik, kao i za krivolinijske oblike jednačine čvrstoće smicanja logaritamskog i hiperboličkog oblika.

Za obe grupe uzoraka dobijene su prosečne vrednosti parametara čvrstoće smicanja za pravolinijski Kulon-Mor-Tercagijev oblik jednačine, i to:

- za manje zbijeni komunalni otpad: $c'_{\text{mob}} = 17 \text{ kPa}$, $\varphi'_{\text{mob}} = 35^{\circ}$;
- za zbijeniji komunalni otpad: $c'_{\text{mob}} = 22 \text{ kPa}$, $\varphi'_{\text{mob}} = 40^{\circ}$.

Ove pravolinijske anvelope loma su upoređene sa predlozima drugih autora koji imaju široku primenu u svetu. Zaključeno je da se čvrstoća smicanja za manje zbijeni komunalni otpad (najbolje odgovara literaturnim podacima) nalazi između donjih i gornjih granica, čime je dokazano relativno dobro slaganje sa literaturnim podacima. Na osnovu dobijenih parametara čvrstoće smicanja za zbijeniji otpad, izvršio sam proširenje predloženog opsega od strane Sanchez-Alciturri i dr. (1993), odnosno, Gabr i Valero (1995), a pored toga, predložio sam i donju granicu. Zaključeno je da za oba analizirana slučaja, maksimalnu čvrstoću smicanja predodređuju uzorci serije B (formirani od otpada sa komunalne deponije u Novom Sadu), čime je potvrđena opšta pretpostavka da sa degradacijom komunalnog otpada, opada i čvrstoća smicanja.

Za krivolinijske oblike jednačine čvrstoće smicanja komunalnog otpada, dobijeni su sledeći parametri:

- jednačina logaritamskog oblika:
 - manje zbijen: $c'_{\text{mob}} = 10 \text{ kPa}$; $\varphi'_0 = 38^0$; $\Delta\varphi' = 11^0$
 - zbijeniji: $c'_{\text{mob}} = 10 \text{ kPa}$; $\varphi'_0 = 43^0$; $\Delta\varphi' = 12^0$
- jednačina hiperboličkog oblika:
 - manje zbijen: $c'_{\text{mob}}=10 \text{ kPa}$; $\varphi'_b=32.9^0$; $\Delta\varphi'=19.5^0$; $p_N=29.8 \text{ kPa}$
 - zbijeniji: $c'_{\text{mob}}=10 \text{ kPa}$; $\varphi'_b=34.6^0$; $\Delta\varphi'=22.2^0$; $p_N=60.3\text{kPa}$

Krivolinijske anvelope loma, uporedio sam sa jednačinom logaritamskog oblika koju je predložio Zekkos (2005), analizirajući svoje i rezultate drugih istraživača. Kada je u pitanju krivolinijska anvelopa loma logaritamskog oblika, pokazano je dobro slaganje u opsegu primenjenih normalnih efektivnih napona $\sigma'_n = 25 - 100 \text{ kPa}$, dok je za normalne efektivne napone $\sigma'_n > 100 \text{ kPa}$, izražena tendencija odstupanja i dobijanja manjih vrednosti ugla unutrašnjeg trenja, odnosno, dolazi do smanjenja čvrstoće smicanja. Predloženi hiperbolički oblik krivolinijske anvelope loma, pokazao je dobro slaganje za nešto veći opseg normalnih napona $\sigma'_n = 20 - 150 \text{ kPa}$. Pored toga, on je jasno ukazao i na to da, u odnosu na anvelope logaritamskog oblika, postoji znatno bolje slaganje sa pravolinijskom Kulon-Mor-Tercagijevom anvelopom. Ovo se odnosi na znatno veći opseg normalnih napona.

Dobijene zavisnosti, bilo da je u pitanju pravolinijska (Kulon-Mor-Tercagijev) ili krivolinijske (logaritamskog ili hiperboličkog oblika), daju prihvatljive rezultate čvrstoće smicanja i mogu se koristiti u analizama stabilnosti kosina komunalnih deponija u Srbiji čija visina ne prelazi 10-15 m, tj. pri normalnim efektivnim naponima $\sigma'_n < 150 \text{ kPa}$. Za komunalne deponije većih visina, preporučena je krivolinijska anvelopa loma hiperboličkog oblika, koja daje nešto manje vrednosti čvrstoće smicanja u odnosu na uobičajenu pravolinijsku anvelopu loma. Ako se uzme u obzir da su na osnovu podataka terenskih istraživanja i rezultata povratnih analiza, po pravilu dobijane manje vrednosti čvrstoće smicanja, onda svakako postoji opravdanje za dalje korišćenje preporučene hiperboličke krivolinijske jednačine čvrstoće smicanja komunalnog otpada.

Verifikacija parametara deformabilnosti (stišljivosti), urađena je za: indeks i modifikovani indeks primarne kompresije (C_c , C'_c), indeks i modifikovani indeks sekundarne kompresije (C_α , C'_α) i modul stišljivosti (M_v).

Za verifikaciju indeksa primarne kompresije, iskorišćena je najčešće primenjavana zavisnost koju je predložio Sowers (1973), a odnosi se na vezu indeksa primarne kompresije i početnog koeficijenta poroiznosti. Za komunalni otpad sa deponija u Srbiji, preporučena je zavisnost $C_c = 0.18 e_0$, koja se uklapa u predloženi interval Sowersa i približno odgovara donjoj granici ($C_c = 0.15 e_0$). Na osnovu toga može se zaključiti da ispitivani otpad sadrži manje organskih materija, a s obzirom da su uspostavljene slične zavisnosti bez obzira na lokaciju ispitanog otpada, zaključeno je, takođe, da starost otpada nema veliki uticaj na indeks primarne kompresije.

Na isti način je urađena verifikacija i za indeks sekundarne kompresije, s tim što je u ovom slučaju uspostavljena zavisnost za maksimalni i minimalni indeks sekundarne kompresije. Kada je u pitanju maksimalni indeks sekundarne kompresije, preporučena je zavisnost $(C_\alpha)_{\max} = 0.0388 e_0$, koja se takođe dobro uklapa u interval koji je predložio Sowers i približno odgovara donjoj predloženoj granici ($C_\alpha = 0.03 e_0$), prema kojoj su uslovi za dalje razlaganje otpada i njegovu dekompoziciju, uglavnom nepovoljni. Može se zaključiti da zbog približno sličnog sastava ispitanog komunalnog otpada, starost nije imala veliki uticaj na vrednosti indeksa sekundarne kompresije. Preporučena je i zavisnost za minimalni indeks sekundarne kompresije $(C_\alpha)_{\min} = 0.0068 e_0$, ali kako se u literaturi prikazuje samo jedna vrednost, koja u stvari predstavlja maksimalni indeks sekundarne kompresije, poređenje nije vršeno. Za ovaj parametar je zaključeno da je korelaciona zavisnost uslovljena i starošću otpada.

Prvi put je, za komunalni otpad, uspostavljena i veza između indeksa primarne i sekundarne kompresije. Utvrđeno je da sa porastom vertikalnih napona raste i odnos između modifikovanih indeksa sekundarne i primarne kompresije. Ovako uspostavljenom vezom, orijentaciono bi se mogla dobiti vrednost indeksa sekundarne kompresije za znatno kraće vreme trajanja opita nego što je to sada bio slučaj.

Rezultati laboratorijskih ispitivanja pokazuju opšti trend porasta vrednosti $(C_\alpha)_{\max}$ i $(C_\alpha)_{\min}$ sa povećanjem vertikalnog efektivnog napona. Stoga, primena samo jedne vrednosti, može za posledicu da ima nerealan proračun sleganja deponije. S obzirom da ovaj trend porasta maksimalnog indeksa sekundarne kompresije i vertikalnog

efektivnog napona, ne odgovara linearnom obliku, uspostavljena je uopštena analitička aproksimacija u vidu pravouglo hiperbole. Ovo sam uradio, posebno za maksimalni a posebno za minimalni indeks sekundarne kompresije, i to za sve tri serije ispitivanih uzoraka: stariji otpad – Ada Huja, mlađi otpad – Novi Sad i izmešani otpad sa obe deponije. Povećanje indeksa sekundarne kompresije, kao rezultat degradacije komunalnog otpada, konstatovali su i Manassero et al. (1997), osmatrajući sleganje deponija u Španiji i Grčkoj. Međutim, treba reći da ova zapažanja ne odgovaraju i rezultatima Wall i Zeiss (1995), kao i Landva i dr. (1984), koji smatraju da nema znatne razlike između indeksa sekundarne kompresije kod otpada starijih i mlađih deponija.

Vrednosti modula stišljivosti prikazane su u obliku linearne funkcije srednjih vrednosti razmatranih opsega vertikalnih efektivnih napona. Ovo sam uradio, posebno za obe analizirane deponije, ali i zbirno za sve ispitane uzorke koji bi mogli da karakterišu komunalni otpad sa deponija u Srbiji. Za verifikaciju je iskorišćen dijagram koji su prikazali Dixon i dr. (2004), a pokazano je da postoji dobro slaganje kada su u pitanju vrednosti efektivnih napona, $\sigma'_v < 200$ kPa. Opšti je zaključak da je modul stišljivosti starijeg otpada, u zoni većih vrednosti vertikalnog efektivnog napona, veći u odnosu na mlađi otpad, ali je u zoni nižih napona (do 50 kPa), slučaj obrnut. Sve ovo ukazuje na to da degradacija i raspadanje komunalnog otpada, imaju značajan uticaj i na vrednosti modula stišljivosti.

POGLAVLJE 9

REZULTATI ISTRAŽIVANJA U ANALIZI SLEGANJA DEPONIJIA KOMUNALNOG OTPADA

Praksa izgradnje komunalnih deponija široko je rasprostranjena u svetu, pa su i istraživači zainteresovani za unapređenje načina za efikasno odlaganje otpada. Zato, analiza sleganja komunalnog otpada ima sve veći značaj, zbog potrebe da se prouči njegovo dugoročno ponašanje, radi projektovanja novih i praćenja tj., opšteg održavanja postojećih deponija. Sleganje deponije odvija se u dugom vremenskom procesu, a konačni rezultat može biti znatno smanjenje visine deponije, koje po nekad dostiže vrednost i do 40 % u odnosu na njenu početnu visinu. Sa jedne strane to je povoljno, jer na taj način raste kapacitet deponije, međutim, sa druge strane velika i neravnomerna sleganja mogu da prouzrokuju mnoge probleme na samoj deponiji kao što su: pukotine na završnim prekrivkama, oštećenje sistema za odvod gasova i filtrata, kidanje i cepanje zaštitnih sistema u podlozi i na površini i sl. Pored toga, nejednako sleganje može da izazove i značajne promene na površini terena zatvorene deponije, stvaranjem lokalnih depresija u kojima se sakuplja površinska voda. Ovako sakupljena voda, pored mogućnosti da se infiltrira i poveća količinu filtrata u deponiju, predstavlja i dodatno opterećenje. Dixon i dr. (2005) navode da sleganje otpada može da utiče i na sisteme obloge bočnih kosina. Naime, stišljivost otpada i procesi raspadanja, dovode do velikih sleganja unutar deponije a time, i do znatnog pomeranja otpada uz bočne zaštitne sisteme, što za posledicu može da ima rušenje čitave deponije (deformacije sa kidanjem geomembrane i sl.). Pored toga, može da dovede do neželjenog ispuštanja gasova iz deponije u atmosferu, a oštećenjem sistema za njihovo prikupljanje u biorektorskim deponijama, znatno se umanjuju količine gasa koji se koristi za proizvodnju energije (Singh i dr., 2007). Zato, sleganje deponije posle njenog zatvaranja, smatra se najvećim geotehničkim problemom, naročito kod biorektorskih deponija (McDougall, 2008).

9.1. MEHANIZAM SLEGANJA DEPONIJA KOMUNALNOG OTPADA

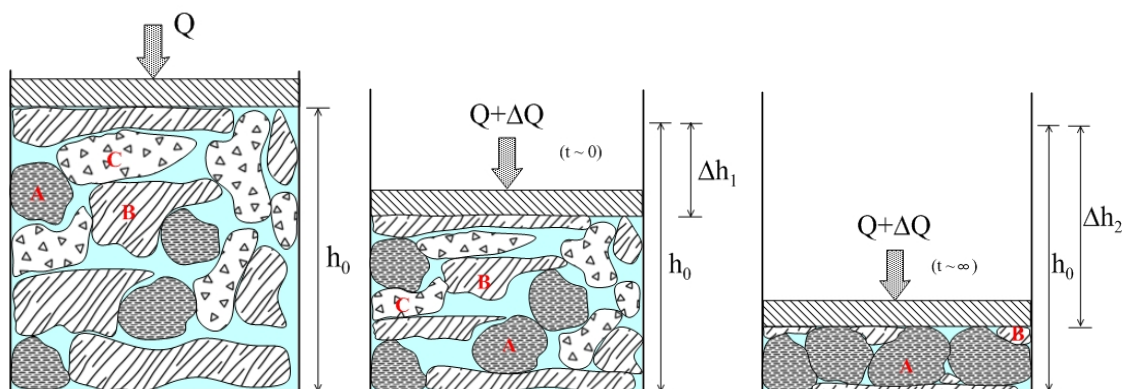
9.1.1. Opšte o sleganju komunalnog otpada

Slično kao i tlo, i za komunalni otpad se može reći da je to višefazna sredina koja se, s obzirom na agregatno stanje, sastoji od čvrste, tečne i gasovite faze. Međutim, postoje i neke bitne razlike između komunalnog otpada i tla. Kada je u pitanju čvrsta faza, sa geotehničkog aspekta posmatranja, mogu se izdvojiti tri vrste materijala i to: A – stabilni tj. inertni, B - vrlo deformabilni i C - skloni biodegradaciji. U grupu A spadaju materijali kao što su staklo, različiti metali, čvrsti materijali koji nastaju zbog rušenja objekata (građevinski šut) i drugi materijali čije se mehaničko ponašanje može poistovetiti sa prirodnim krupnozrnim i izuzetno heterogenim tлом. Grupu B čine tkanine, papir, karton, tanja plastika i drugi listićasti fragmenti koji se sležu i pod manjim opterećenjem. U grupu C spadaju organski materijali koji su skloni izrazitim fizičko-hemijskim promenama u relativno kratkom vremenu. Razlaganje ovih materijala značajno utiče na ukupno mehaničko ponašanje deponije, jer izaziva smanjenje zapremine i značajnu proizvodnju gasa.

Tečna i gasovita faza značajno doprinose ukupnoj složenosti strukture otpada. Generalno se može reći da je otpad nezasićen a da gasovitu fazu čini postojeći gas koji je prisutan na deponiji (uključujući i zarobljeni gas u pojedinim komponentama otpada – limenke, plastična ambalaža i sl.), kao i gas koji nastaje usled raspadanja biorazgradivih materijala.

Ako se analizira otpad prosečnog sastava, u odnosu na ukupnu zapreminu, u početnoj fazi odlaganja preovlađuju visoko deformabilni i razgradivi materijali. Zbog toga stabilni - inertni materijali, ostvaruju kontakte u znatno manjem broju tačaka (Slika 9.1a). Kasnije, u relativno kratkom vremenu, dešavaju se značajne zapreminske promene na račun sleganja vrlo deformabilnih elemenata (Slika 9.1b). Na početku ove faze, pomeranje stabilnih, inertnih elemenata je veliko, jer oni imaju tendenciju da postepeno zauzmu konačni položaj. Međutim, njihove međusobne kontakte i dalje sprečavaju vrlo deformabilni i organski materijali. Iz tih razloga deformacije su spore,

traju dosta dugo i zavise od transformacije organskih materija. Završetak procesa dovodi do direktnog kontakta između stabilnih - inertnih materijala (Slika 9.1c).



Slika 9.1. Šematski prikaz različitih faza deformacije komunalnog otpada (A-inertni materijali; B-vrlo deformabilni; C-skloni biodegradacije)

Može se videti, da najveći uticaj na sleganje ima znatan gubitak mase otpada. To je posledica degradacije i smanjenja zapremine kao i rušenje strukture usled razgradnje, kako makro tako i mikro komponenta otpada (McDougall i Pyrah, 2004; Stoltz i Gourc, 2008).

Zbog ovako složenog faznog sastava ali i izražene vremenske promene stišljivosti i različitog potencijala raspadanja pojedinih sastojaka otpada, sleganje komunalnog otpada je dosta složeno. Ono se u početku izučavalo kao i sleganje tla. Holtz i Kovacs (1981) smatraju da se ukupno sleganje otpada sastoji od tri komponente: inicijalnog sleganja, konsolidacionog sleganja i sekundarne kompresije:

$$\Delta s_u = \Delta s_i + \Delta s_c + \Delta s_\alpha \quad (9.1)$$

gde je:

Δs_u – ukupno sleganje

Δs_i – inicijalno (trenutno) sleganje

Δs_c – primarno (pripisuje se konsolidacionom sleganju)

Δs_α – sekundarna kompresija ili puzanje

Sleganje otpada slično je sleganju treseta, gde se nakon relativno brzog inicijalnog i konsolidacionog, najveći deo sleganja obavi u toku dugotrajne sekundarne kompresije. Zato se vrlo često, upravo zbog brzine odvijanja, u okviru konsolidacionog uključuje i inicijalno sleganje, pa se ove dve komponente objedinjuju i čine takozvanu primarnu fazu sleganja.

Inicijalno sleganje je praktično trenutno, i može se definisati kao sleganje koje se javlja odmah nakon odlaganja otpada na deponiju (povezuje se i sa sabijanjem otpada i neposrednim smanjenjem pornog prostora). Primarno sleganje se opisuje kao konsolidaciono, uglavnom zbog procesa dreniranja vode i gasa iz pornog prostora. Preovladava mišljenje da se ono obavi u roku od 30 dana, računajući od trenutka postavljanja završnog prekrivnog sloja. Međutim, postoje i mišljenja prema kojima se konsolidaciono sleganje ne vezuje samo za proces dreniranja vode i gasa iz komunalnog otpada. Naime, prema uobičajenoj praksi upravljanja komunalnim deponijama, koja podrazumeva i postavljanje zaštitnih izolacionih sistema, sprečava se ulazak vode u telo deponije, pa se otpad ne može smatrati zasićenom sredinom, što realno i nije. Takođe, za vodopropustljivost komunalnog otpada, može se reći da je istog reda veličine kao i vodopropustljivost peska i šljunka, tako da ne postoji mogućnost stvaranja pornog nadpritiska usled dopunskih opterećenja, jer se voda lako drenira u okolnu masu otpada (jedino u nekim slučajevima, kada relativno brzo započne degradacija otpada, postoji mogućnost generisanja pornog nadpritiska usled stvaranja deponijskog gasa).

Ako se u obzir uzme da spoljno opterećenje izaziva trenutnu konsolidaciju otpada u deponiji, po čemu se ovaj proces bitno razlikuje od konsolidacionog sleganja sitnozrnog tla (Jessberger i dr. 1993; Beaven i dr. 1995), onda ima osnova da se inicijalno i konsolidaciono sleganje objedine i analiziraju kao primarno sleganje. Na osnovu toga, ukupno sleganje otpada (Δs_u) se računa kao zbir primarnog selganja (Δs_c) koje se pripisuje fizičkoj kompresiji pojedinih komponenti i konsolidacionom sleganju i sekundarnog sleganja - kompresije (Δs_α), koja uključuje sve prikrivene uticaje kao i one koji su povezani sa degradacijom. Ove dve komponente su od najvećeg značaja kada je u pitanju analiza dugotrajnog sleganja komunalnog otpada, tj.

$$\Delta s_u = \Delta s_c + \Delta s_\alpha \quad (9.2)$$

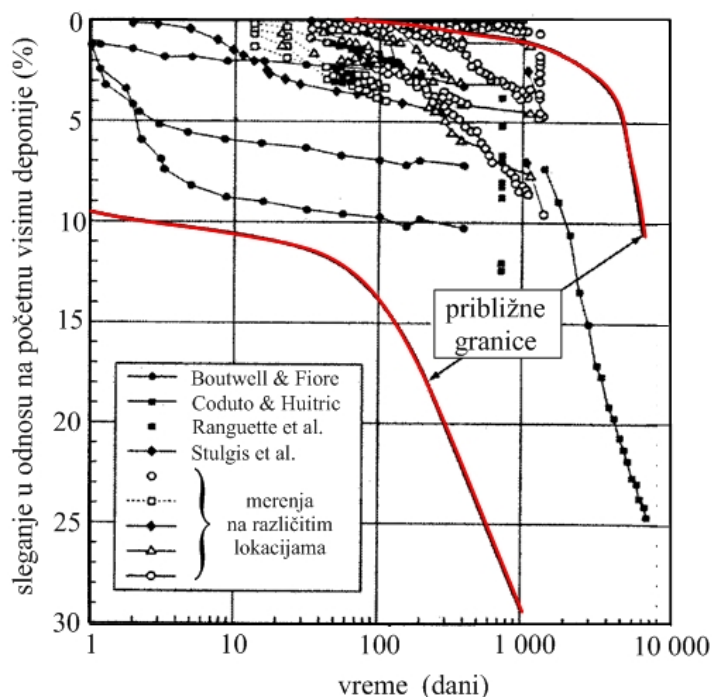
Mnogi autori (Jessberger i Kockel, 1993; Beaven i Powrie, 1995; Watts i dr., 2002, i dr.) su proučavali primarno sleganje otpada. Njihov opšti zaključak je da je ono relativno kratko u poređenju sa primarnim sleganjem tla i da značajno zavisi od sastava, starosti i efekta zbijanja komunalnog otpada. Neki autori (Charles i Burland, 1982; Coumoulos i Koryalos, 1999; El-Fadel i dr., 1999), konstatovali su da se tokom 1 – 2 meseca nakon zatvaranja deponije, obavi značajno sleganje. Razlog za to je brza disipacija filtrata i gasa kroz porni prostor, zbog velike vodopropustljivosti otpada, što se može okarakterisati kao „primarna kompresija“. Slično zapažanje imali su i Bowders i dr., (2000), prema kojima se primarna kompresija deponije komunalnog otpada od sopstvene težine ili od dopunskih opterećenja, takođe odvija brzo i uglavnom prestaje nakon 10 - 90 dana.

Sekundarno sleganje otpada je jednim delom mehanički proces, ali je i rezultat degradacionog procesa koji traje dosta dugo. (Coduto i Huitric, 1990). U stvari, sekundarno sleganje ne zavisi od opterećenja, već je uslovljeno biodegradacionim efektima, kao i puzanjem. Međutim, ova dva procesa se ne mogu striktno razdvojiti, tako da je teško utvrditi koji od njih preovlađuje. McDougall i dr., (2004) su pretpostavili da se oni odvijaju istovremeno, s obzirom da zbog degradacije i raspadanja dolazi i do postepenog slabljenja strukture otpada i njenog rušenja, koje se može pripisati mehaničkom procesu puzanja. Ova faza sleganja traje dosta dugo, pa je u njoj i sleganje deponije znatno. U principu, pretpostavlja se da sleganje koje nastaje zbog sekundarne kompresije, iznosi od 30 do 40 % ukupnog sleganja komunalne deponije, a odigrava se u dugom vremenskom periodu i nakon njenog zatvaranja. Ovde treba reći da je na početku izučavanja sleganja komunalnog otpada, preovladavalo mišljenje (Sowers, 1973) koje podrazumeva regulaciju faktora sredine, kako bi se usporilo raspadanje i na taj način ublažilo preterano sekundarno sleganje. Međutim, to je u suprotnosti sa savremenim trendom izgradnje bioreaktorskih deponija, gde se koriste mnogobrojne tehnike koje upravo omogućuju ubrzano raspadanje otpada radi stvaranja deponijskog gasa i njegovog daljeg iskorišćavanja.

Charles i Burland (1982) smatraju da se u uslovima stalnog opterećenja, odvijaju znatne deformacije otpada. To se često naziva sleganje usled „puzanja“. Kod mnogih

komunalnih deponija, konstatovano je da sleganje usled puzanja, u funkciji logaritma vremena, pokazuje linearnu zavisnost.

Edil i dr. (1990) konstatuju da na sleganje komunalnog otpada, utiče veći broj međusobno zavisnih faktora kao što su: početna zapreminska težina otpada i koeficijent poroznosti, sadržaj otpadnih materijala sklonih raspadanju i truljenju, visina deponije, vremenske promene naponskog stanja (istorija napona), česte promene nivoa filtrata u otpadu i faktori okruženja (kao što su vlažnost, temperatura, prisutni ili razvijeni gasovi unutar deponije i sl.). Oni takođe naglašavaju da je sleganje deponije otpada nepravilno. U toku prvih mesec – dva dana nakon izgradnje, obavi se veći deo sleganja, a nakon toga dolazi do prilično velike sekundarne kompresije. Veličina sleganja se smanjuje sa vremenom i sa porastom dubine u odnosu na površinu deponije. Sleganje otpada od sopstvene težine iznosi od 5 % do preko 30 % u odnosu na prvobitnu visinu, pri čemu se najveći deo sleganja obavi u toku prve godine (Slika 9.2).



Slika 9.2. Rezultati merenja sleganja na različitim deponijama (Spikula, 1997)

Prema Fassett-u i dr. (1994), sleganje komunalnog otpada proučava se još od 40-tih godina prošlog veka. Tadašnja istraživanja svodila su se na opis ponašanja i pogodnost

zatvorenih deponija za njihovo dalje korišćenje. Opšti zaključci u izveštajima iz tog vremena su sledeći: da se sleganje otpada dešava brzo, da zbijanje otpada smanjuje ukupno sleganje i da se sleganje otpada u deponiji smanjuje sa njegovim starenjem tj., da su sleganja dubljih slojeva otpada manja. Autori navode da je najvažniji uzrok sekundarnog sleganja, smanjenje zapremine zbog razlaganja organskih materija.

Gotteland i dr. (1995) navode da ukupno sleganje (primarno i sekundarno), može da dostigne 25 % početne visine deponije. Green i Jamnejad (1997) navode da sleganje deponije zavisi od sastava otpada, brzine odlaganja, zapremine, dubine, starosti, primenjene mehanizacije za zbijanje itd. Autori su na osnovu izvršenih laboratorijskih ispitivanja zaključili da kada se otpad izloži statičkom opterećenju, preko 70 % ukupnog sleganja obavi se odmah, a preostalih 30 % nakon dužeg vremena. Veličina sleganja otpada zavisi od debljine sloja otpada, veličine opterećenja i sastava otpada. Sleganja od konstantnog povećanja opterećenja, u početku je brže a kasnije, sa porastom ukupnog opterećenja i zapreminske težine otpada, brzina sleganja se smanjuje.

Prema Powrie i dr. (1998), postoji dosta nejasnoća kada se radi o sekundarnom sleganju otpada, što je razumljivo kada se zna da različiti faktori utiču na veličinu sekundarnog sleganja. Tu se pre svega misli na:

- sastav otpada, s obzirom da je otpad sa većom količinom razgradljivih materija, podložniji dugoročnom sleganju nego otpad od pretežno inertnih materijala;
- suhu zapreminsku težinu otpada (razgradljive čestice u masi zbijenog otpada, postepeno smanjuju zapreminu pa sleganje traje duže);
- dubinu (za komunalni otpad sa većih dubina, potencijalni gubitak zapremine ili mase zbog raspadanja, približno je proporcionalan njegovoj prvobitnoj zapremini ili masi, tako da slojevi otpada sa većih dubina, ispoljavaju manja sleganja).

De Poli i dr. (1999) naglašavaju da deformacije na komunalnim deponijama imaju dve glavne posledice: kratkotrajno – trenutno sleganje stišljivih komponenata i dugotrajnu razgradnju organskih materija sa emisijom biogasa. Prva posledica se javlja posle dva meseca do godinu dana i uglavnom se dovodi u vezu sa zbijanjem otpada u toku

odlaganja kao i sa težinom novih slojeva otpada. Razgradnja organskih materija smanjuje ukupnu masu otpada za 1/3, u periodu od 15-20 godina.

Bowders i dr. (2000), sekundarnu kompresiju dovode u vezu sa procesom biološkog raspadanja, tzv. "biokonsolidacijom", koja traje godinama i zavisi od sastava komunalnog otpada na deponiji. Jedan deo organskih materija se usled raspadanja pretvara u gas, čime se smanjuje zapremina čvrstih čestica koja direktno utiče na veličinu i stepen sekundarnog sleganja.

McDougall i Pyrah (2001) sekundarno sleganje opisuju kao kombinaciju mehaničkog puzanja, fizičko-hemijskih promena i biodegradacije. Mehaničko puzanje se relativno dobro modelira preko tzv. „log-time“ metoda, dok fizičko-hemijske promene najvećim delom zavise od vremena.

Na osnovu literaturnih podataka, Barriera i dr. (2001) izdvajaju šest najbitnijih faktora koji utiču na sleganje uređenih deponija komunalnog otpada i to: karakteristike podloge ispod tela deponije, način i redosled formiranja deponije, starost otpada, sastav otpada, zbijenost i brzina raspadanja. Međutim, autori su primetili da se na osnovu sprovedenih analiza, ne mogu da definišu korelacije između sleganja, zbijanja i raspadanja otpada. Oni takođe smatraju da se sleganje otpada odvija kroz tri glavne faze: početnu, primarnu i sekundarnu. Početno sleganje izaziva direktna primena spoljašnjeg opterećenja i ono se uglavnom dovodi u vezu sa neposrednim zbijanjem i smanjenjem zapremine pora i čestica pod opterećenjem (za ovu fazu se često kaže da je trenutna). Autori navode da velika heterogenost otpada i različiti litološki sastav terena ispod deponije, kao i određeni radovi na samoj deponiji, veoma otežavaju prognoziranje sleganja.

Jessberger (2001) konstatuje da se mehanizmi unutar otpada, najpouzdanije mogu analizirati izradom modela primenjujući osnovne principe i praksu mehanike tla. On navodi da su na osnovu obavljenih merenja na jednoj deponiji u SAD, konstatovane različite veličine sleganja, jer se sleganje centralnih delova deponije razlikovalo za 15 – 20 % u odnosu na sleganje u blizini njenih bočnih strana. Pored toga Jessberger smatra

da se sleganje smanjuje sa porastom dubine u odnosu na površinu deponije. Na osnovu toga, on zaključuje da je konačno sleganje otpada nepravilno i da zavisi od:

- konsolidacije - odnosi se na sleganje koje je posledica dreniranja sveže odloženog materijala uz promenu efektivnih napona,
- skupljanja – gde se organske materije u kontaktu sa vodom postepeno razlažu i pretvaraju u ugljen dioksid i metan, što ima za posledicu odgovarajuće smanjenje zapremine deponije i
- zbijanja - reorijentacija čvrstih čestica i formiranje gušćeg rasporeda zbog postepenog gubitka krtosti od puženja pod opterećenjem ili od razlaganja (čvrste čestice otpada mogu u početku da prave „mostove“ preko pora koji se kasnije ruše, što se smatra potencijano najznačajnijom karakteristikom sekundarnog sleganja komunalnih deponija).

9.1.2. Faze i mehanizam sleganja komunalnog otpada

Autori su kroz različite faze analizirali uticaj vremena na sleganje deponije komunalnog otpada. Tako su Gasparini i dr. (1995) na osnovu teorijskih ispitivanja stišljivosti, utvrdili tri faze sleganja otpada:

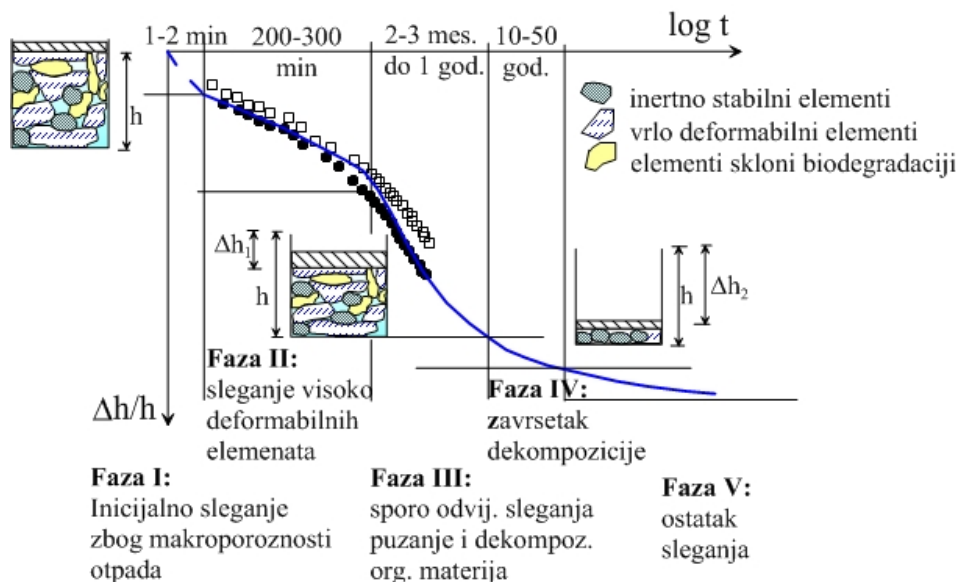
- početno sleganje kombinovano sa brзом primenom spoljašnjeg opterećenja
- smanjenje pornog prostora kombinovano sa gubitkom dela filtrata i
- konačno sleganje stabilnog dela deponije na kraju procesa raspadanja

Sleganje komunalnog otpada u fazama sa izraženim sekundarnim sleganjem koje pored mehaničke, uključuje i biološku kompresiju otpada, prikazali su Grisolia i Napoleoni (1995). Oni su izdvojili pet faza sleganja (Slika 9.3):

- I faza - inicijalna-primarna koja je posledica makroporoznosti otpada i sleganja usled njegove sopstvene mase i preraspodele deformabilnih materijala
- II faza - obuhvata preostalo-rezidualno primarno sleganje iz prve faze a uključuje i sleganje visokodeformabilnih komponenti otpada
- III faza - predstavlja izraženo sekundarno sleganje usled pužanja i reorijentacije neorganskih komponenata kao i razgradnje i dekompozicije biološki razgradivih komponenata

IV faza - predstavlja završetak sekundarnog sleganja, kada se znatno usporava i konačno završava dekompozicija organskih materija i

V faza - predstavlja ostatak sleganja koje je posledica kompresije i reorijentacije neorganskih-inertnih komponenata tokom dužeg vremena.

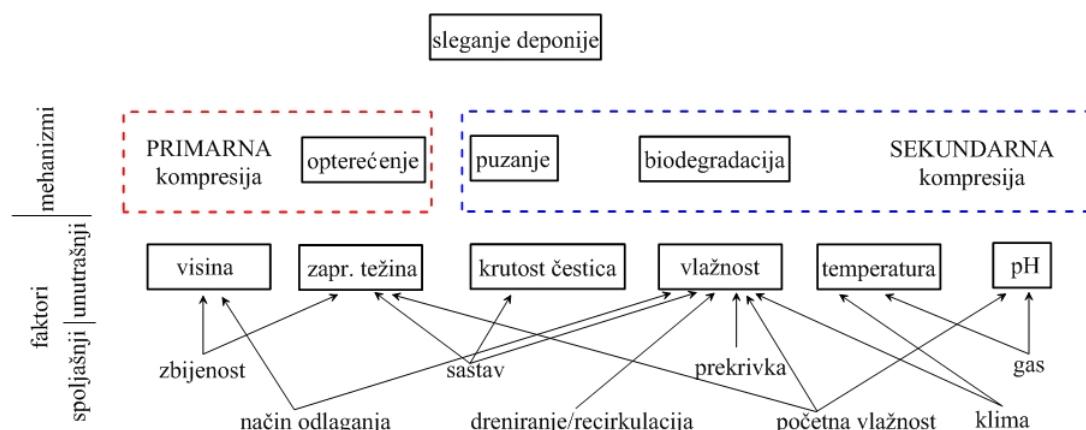


Slika 9.3. Kvalitativni model mehanizma sleganja komunalnog otpada (Grisolia i Napoleoni, 1995)

Bowders i dr. (2000) prave razliku između sleganja koje izaziva opterećenje otpada i izraženog vremenskog sleganja koje je karakteristično za deponije. Oni navode brojne i složene faktore koji imaju značajnu ulogu na sleganje otpada, kao što su: izrazita heterogenost otpada, deformabilnost pojedinačnih čestica, velike pore u tek odloženom otpadu, biološka degradacija i dr. Ponašanje komunalnog otpada u toku sleganja, autori su, takođe, opisali kroz pet faza:

- početna faza podrazumeva fizičku kompresiju i puzanje zbog mehaničkog izobličavanja, savijanja, lomljenja i reorijentacije pojedinih čestica otpada
- sleganje zbog migracije malih čestica u pore između većih čestica
- viskozno ponašanje i konsolidacija čitave mase otpada i pojedinih čestica
- sleganje zbog raspadanja usled biološke degradacije organskih sastojaka i
- urušavanje čestica zbog fizičko-hemijskih promena kao što su korozija, oksidacija i raspadanje neorganskih komponenata

Uopšteno se može reći da se mehanizam sleganja deponije komunalnog otpada sastoji od primarne i sekundarne kompresije, s tim da sekundarna kompresija obuhvata puzanje i raspadanje otpada. Zato, kada se sleganje analizira, može se reći da se ono odvija kroz tri osnovne faze: prvu - početnu (mehaničko sleganje usled opterećenja), drugu - puzanje i treću – biodegradacija otpada (Slika 9.4).



Slika 9.4. Mehanizmi i najbitniji faktori koji utiču na sleganje deponija (Hunte i dr., 2011)

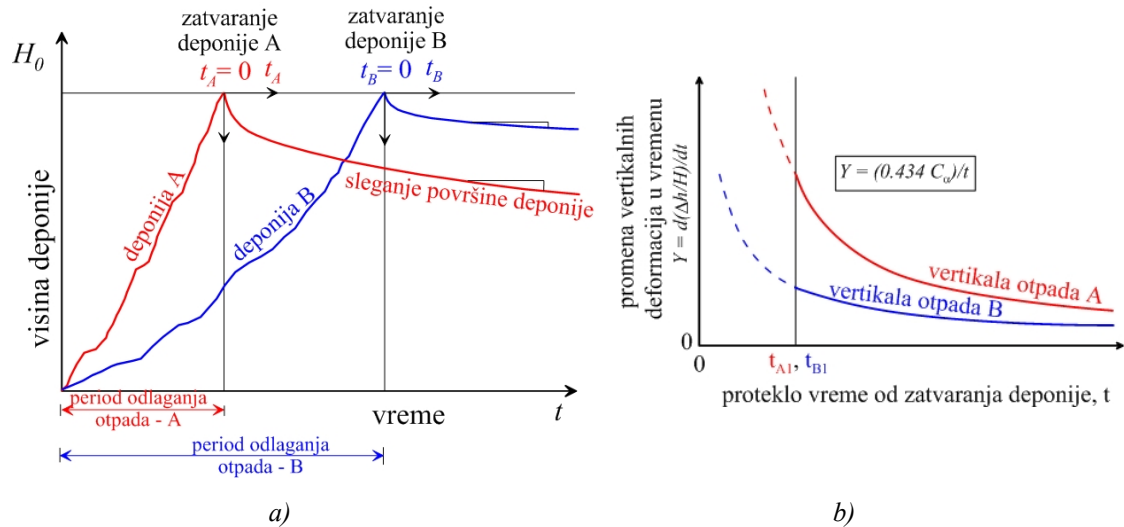
Sowers (1973) je uključio i četvrtu fazu kojom se sleganje dovodi u vezu sa fizičko-hemijskim promenama unutar deponije. Liu i dr. (2006) predlažu mehanizam koji uključuje pet faza koje obuhvataju: trenutno mehaničko zbijanje, sekundarno kontinualno mehaničko zbijanje, uticaje puzanja, primarno raspadanje i izobličavanje ostataka sa stalnim organskim raspadanjem.

Prva faza, predstavljena je mehaničkim zbijanjem otpada i to odmah nakon primene spoljašnjeg opterećenja (sopstvene težine, primena kompaktora i dr.). Ona obično traje prvih nekoliko dana nakon odlaganja i zavisi je od prakse na deponiji. To je jedina faza u kojoj sleganje otpada zavisi od napona. U okviru ove faze sleganje nastaje zbog kompresije pora ispunjenih vazduhom i kompresije rastresitih komponenti otpada. Sleganje u ovoj fazi odigrava se na račun mehaničkog izobličavanja (savijanje, lomljenje i sl.) i promene orijentacije čvrstih čestica otpada (guranje, mešanje različitih materijala), koje je slično zbijanju organskog tla u prirodi (Sowers, 1973; Bjarngard i Edgers, 1990). Većina autora smatra da se sleganje, koje se pripisuje mehaničkom zbijanju materijala na deponiji, smanjuje sa vremenom (Dixon i Jones, 2005).

Druga faza sleganja komunalne deponije obuhvata uklizavanje i puzanje tj. kretanje sitnijih čestica u porni prostor između krupnijih. Pore mogu da potiču od početnog odlaganja odnosno orijentacije ili da budu posledica fizičko-hemijskih ili bioloških promena unutar mase otpada (El-Fadel i Al-Rashed, 1998). Savremeni postupci odlaganja komunalnog otpada na deponije, podrazumevaju i određene postupke predobrade kao što su separacija i izdvajanje krupnijih „šupljih“ fragmenata (limenke, plastična ambalaža) zbog čega su kod projektovanja savremenih deponija reorijentacija i uklizavanje čestica manje značajni od puzanja.

Ostale faze sleganja, isključivo su uslovljene vremenom i posledica su raspadanja komunalnog otpada, zbog fizičko-hemijskih promena (korozija, oksidacija, sagorevanje), koje uslovljava i druge faze sleganja. Raspadanje ili biološka razgradnja, obuhvata fermentaciju i truljenje i igra važnu ulogu u veličini dugoročnog sleganja, koja prema nekim procenama iznosi između 18 % i 24 % ukupne debljine komunalnog otpada (Coduto i Huitric, 1990). Sleganje od raspadanja se obično deli na dve faze, aerobno i anaerobno raspadanje (Tchobanoglous i dr., 1993). Raspadanje počinje kad je masa otpada u aerobnom stanju. Po završetku bioloških reakcija, troši se i dostupni kiseonik tako da počinju da prevlađuju organizmi koji su odgovorni za anaerobno razlaganje i oni utiču na dalje sleganje otpada od raspadanja (Edgers i dr., 1992; El-Fadel i Al-Rashed, 1998). Tokom obe faze biološkog raspadanja u znatnoj meri je prisutno i pretvaranje čvrste materije u gasove i tečnost, što menja poroznost otpada i može značajno da doprinese njegovom rastresanju i puzanju. Zato, deponije koje funkcionišu kao „bioreaktori“ pokazuju znatno veća sekundarna sleganja nego tradicionalne sanitarne deponije. U vezi sa tim, treba reći da je nekoliko autora vršilo eksperimentalna istraživanja u cilju definisanja uticaja degradacije komunalnog otpada na karakteristike stišljivosti (Wall i Zeiss, 1995; Hossain, 2002).

Brzina sleganja komunalnog otpada na deponiji je povezana sa dužinom izvođenja, tj. vremenom punjenja (Coumoulos i Koryalos, 1997). Tako da brže popunjavanje deponije, kasnije dovodi i do većeg sleganja, u odnosu na deponiju čije se popunjavanje odvija u dužem vremenskom periodu (Slika 9.5).



Slika 9.5. a) Krive vremenskog sleganja istog komunalnog otpada sa različitim periodima građenja, b) Izražene promene vertikalnih deformacija za isto vreme od zatvaranja posmatranih deponija A i B (Counoulos i Koryalos, 1997)

9.2. MODELI SLEGANJA KOMUNALNOG OTPADA

U cilju prognoze sleganja komunalnog otpada, a za potrebe praćenja i održavanja postojećih deponija, više autora (Sowers, 1973; Murphy i Gilbert, 1985; Morris i Woods, 1990; Coduto i Huitric, 1990; Gasparini i dr., 1995; Wall i Zeiss, 1995; Boutwell i Fiore, 1995; Van Impe i Bouazza, 1996; Liu i dr., 2006 i dr.), opisivalo je mehanizme prema kojima su formirani različiti modeli sleganja. Oni se mogu svrstati u četiri osnovne grupe i to:

- modeli zasnovani na tradicionalnoj Tercagijevoj teoriji konsolidacije tla koja uključuje sekundarnu kompresiju, a koristi geomehaničke karakteristike otpada (Sowers, 1973; Rao i dr., 1977; Morris i Woods, 1990; Oweis i Khera, 1998;);
- empirijski modeli, zasnovani na podacima terenskih i laboratorijskih ispitivanja, sa primenom teorije brzine procesa sleganja (Yen i Scanion, 1975; Edil i dr., 1990; Deutsch i dr., 1994; Ling i dr., 1998);
- reološki modeli za tla, primenjeni na komunalni otpad (Gibson i Lo, 1961; Zimmerman, 1972) i
- modeli sleganja koji uključuju biodegradaciju otpada (El-Fadel i dr., 1989; Edgers i dr., 1992; Soler i dr., 1995; Park i Lee, 1997).

Pored toga, predlagani su i složeni modeli koji u stvari predstavljaju kombinaciju pomenutih grupa modela. Tako, Marques i dr., (2003) predlažu složeni model sleganja komunalnog otpada koji uključuje: uticaj trenutnog mehaničkog delovanja (sopstvena težina slojeva), „puzanje“, promenu rasporeda čestica otpada za vreme odigravanja fizičko-hemijskih promena (vreme raspadanja) i biološko sleganje koje izaziva povećanje zapremine pora zbog delimičnog pretvaranja čvrste faze u gasovito stanje.

Pomenute grupe modela uglavnom su bazirane na rezultatima laboratorijskih ispitivanja komunalnog otpada ili na terenskim merenjima na samim deponijama. U većini slučajeva, modeli su primenjivani pri analizi sleganja specifičnih mešavina otpada, ali se postavlja pitanje njihovog uspešnog korišćenja, naročito kada se analizira sleganje deponije sa drugačijim sastavom otpada.

9.2.1. Modeli zasnovani na teoriji konsolidacije

Najčešće primenjivani model iz ove grupe je Sowers-ov model (1973). Prema ovom modelu, sleganje komunalnog otpada odvija se u dve osnovne faze: u početku se poistovećuje sa primarnom kompresijom koja se dešava u fazi odlaganja, a kasnije, nakon određenog vremenskog perioda, do izražaja dolazi sekundarna kompresija (slom fragmenata, mehaničko puzanje, biohemijska degradacija).

Vreme primarnog sleganja se po pravilu obavi u toku prva dva do tri meseca nakon odlaganja otpada. Za analizu se koriste metode koje se primenjuju i u mehanici tla, tako da se primarno sleganje određuje kao:

$$\Delta s_c = \frac{C_c \cdot H_0}{1 + e_0} \cdot \log \left(\frac{p'_0 + \Delta \sigma}{p'_0} \right) = C'_c \cdot H_0 \cdot \log \left(\frac{p'_0 + \Delta \sigma}{p'_0} \right) \quad (9.3)$$

gde je:

- H_0 – početna debljina analiziranog sloja otpada
- e_0 – početni koeficijent poroznosti sloja otpada (pre sleganja)
- C_c – indeks primarne kompresije
- C'_c – modifikovani indeks primarne kompresije
- p'_0 – efektivni vertikalni napon od prethodno nanetog opterećenja u sredini sloja koji se sleže
- $\Delta \sigma$ – dopunsko opterećenje od težine otpada u sredini sloja koji se sleže

U to doba tj. sedamdesetih godina prošlog veka, za p'_0 opterećenje uzimana je vrednost naneta mehanizacijom za zbijanje koja je iznosila $p'_0 = 48$ kPa, pa je zbog efekta prekonsolidacije, usled prethodnog zbijanja, smatrano da je otpad neosetljiv na manja opterećenja. U međuvremenu, mehanizacija se razvila, tako da se sada na deponijama koriste kompaktori sa silama većim od 1000 kN, zbog čega je neophodna primena značajno većih vrednosti za p'_0 .

Nakon primarnog, sledi dugotrajno sekundarno sleganje (kompresija) koje se za razliku od tla, odvija zbog hemijske i biološke razgradnje otpada. Sleganje koje nastaje zbog sekundarne kompresije, izražava se sledećom jednačinom:

$$\Delta s_{\alpha} = \frac{C_{\alpha} \cdot H_0}{1 + e_0} \cdot \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (9.4)$$

gde su:

- t_1 i t_2 – vremena (u god.) koja ograničavaju interval za koji se analizira sleganje;
- C_{α} – indeks sekundarne kompresije.

Isti izraz za određivanje sekundarnog sleganja, koristili su i Sharma i dr. (1999).

Na osnovu jednačina (9.3) i (9.4), izračunava se ukupno sleganje

$$\Delta s = \frac{C_c \cdot H_0}{1 + e_0} \cdot \log\left(\frac{p'_0 + \Delta\sigma}{p'_0}\right) + \frac{C_{\alpha} \cdot H_0}{1 + e_0} \cdot \log\left(\frac{t}{t_c}\right) \quad (9.5)$$

odnosno

$$\Delta s = C'_c \cdot H_0 \cdot \log\left(\frac{p'_0 + \Delta\sigma}{p'_0}\right) + C'_{\alpha} \cdot H_0 \cdot \log\left(\frac{t}{t_c}\right) \quad (9.6)$$

gde je:

- C'_{α} – modifikovani indeks sekundarne kompresije
- t_c – vreme završetka primarnog sleganja
- t – analizirano vreme sleganja ($t > t_c$)

Rao i dr. (1977) su predložili model za prognozu ukupnog sleganja otpada u funkciji opterećenja, zanemarujući uticaj vremena na sleganje (Slika 9.6). Iz tog razloga ovaj model nije naročito popularan. Za utvrđivanje ukupnog sleganja, autori su koristili sledeću jednačinu:

$$\Delta s = H_0 \cdot \frac{\frac{\Delta h}{h_i}}{\frac{H_0}{h_i}} \quad (9.7)$$

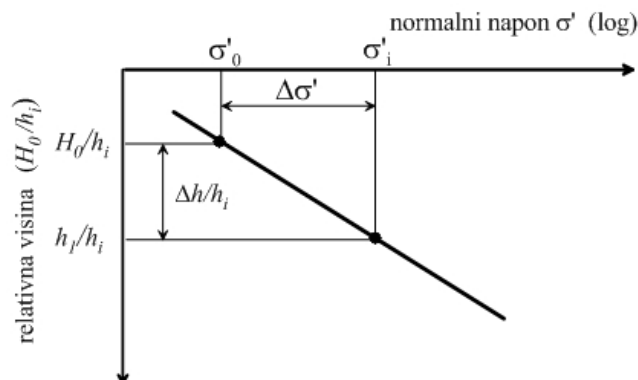
gde je:

Δs - ukupno sleganje

H_0 - početna debljina otpada

H_0/h_i - relativna visina koja odgovara postojećem opterećenju p'_0

$\Delta h/h_i$ - promena relativne visine koja odgovara priraštaju napona $\Delta\sigma$



Slika 9.6. Promena relativne visine u funkciji normalnog napona (Rao i dr., 1977)

Prikazane jednačine koje je predložio Sowers (1973), dodatno su razradili Bjarngard i Edgers (1990) merenjima na deponijama i predložili su sledeći izraz za proračun ukupnog sleganja:

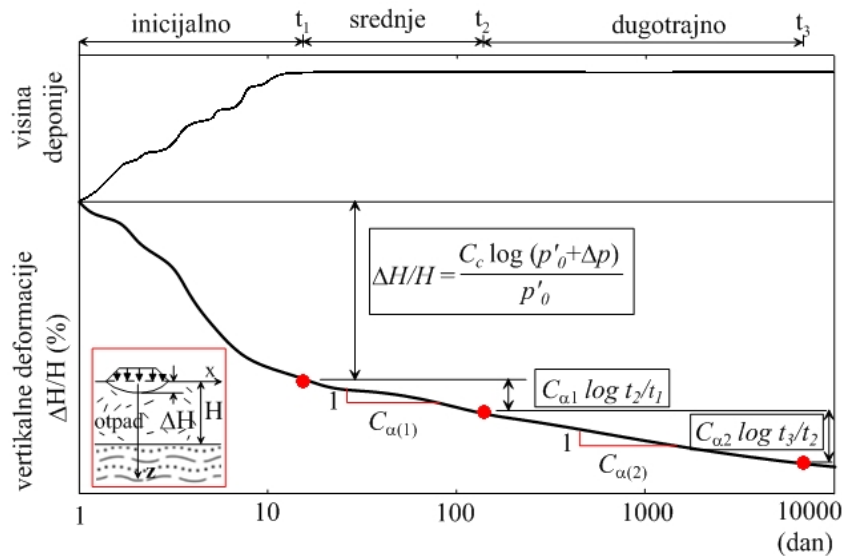
$$\frac{\Delta s}{H_0} = C'_c \cdot \log\left(\frac{p'_0 + \Delta\sigma}{p'_0}\right) + C'_{a1} \cdot \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right) + C'_{a2} \cdot \log\left(\frac{t_3}{t_2}\right) \quad (9.8)$$

gde je:

Δs – sleganje komunalnog otpada

- H_0 – početna debljina analiziranog sloja otpada
- p'_0 – početni prosečni efektivni vertikalni napon
- $\Delta\sigma$ – priraštaj vertikalnog napona od težine otpada
- C'_c – modifikovani indeks primarne kompresije
- $C'_{\alpha 1}$ i $C'_{\alpha 2}$ – modifikovani indeksi sekundarne kompresije (srednji i dugoročni)
- t_1, t_2 i t_3 – vremena (god.) koja ograničavaju intervale za koje se određuje sleganje (početno, srednje i dugotrajno)

Značenje ovih parametara prikazano je na Slici 9.7.



Slika 9.7. Model sleganja komunalnog otpada (Bjarngard i Edgars, 1990)

Sličan model predložili su Fassette i dr. (1994), koji su modifikovane indekse sekundarne kompresije $C'_{\alpha 1}$ i $C'_{\alpha 2}$ izjednačili i zamenili samo sa jednim C'_α tj.

$$\frac{\Delta s}{H_0} = C'_c \cdot \log\left(\frac{p'_0 + \Delta\sigma}{p'_0}\right) + C'_\alpha \cdot \log\left(\frac{t_f}{t_i}\right) \quad (9.9)$$

gde je:

$$t_f = t_3 \text{ iz jednačine 9.8}$$

$$t_i = t_1 \text{ iz jednačine 9.8}$$

$$C'_\alpha = C'_{\alpha 1} = C'_{\alpha 2}$$

Za oba modela neophodno je poznavanje početnog prosečnog vertikalnog napona, što znači da je potrebno poznavanje zapreminske težine otpada u deponiji.

Jedan od načina proračuna sleganja, prikazali su Richard i dr. (2001). Oni su otpad visine H_0 , podelili na nekoliko slojeva visine h_i za koje se predpostavlja da je odlaganje obavljeno u poznatim fazama. Na svaki od ovih slojeva deluje srednje efektivno opterećenje p'_{oi} , koje odgovara težini viših slojeva:

$$p'_{oi} = \frac{\gamma_i \cdot h_i}{2} + \sum_{j=i+1}^n \gamma_j \cdot h_j \quad (9.10)$$

gde je:

n – broj slojeva

i – indeks datog sloja

γ – zapreminska težina sloja otpada (kN/m^3)

h – visina pojedinačnog sloja otpada

Primarno sleganje se računa na osnovu izraza kojeg je predložio Sowers (1973).

Autori su za proračun sekundarnog sleganja predložili sledeći izraz:

$$\Delta s_\alpha = \sum_i \Delta h_i = \int_{\frac{t_1}{2}}^{\frac{t_2}{2}} a - b \cdot \log(t) dt \quad (9.11)$$

gde su a i b parametri u funkciji h_i .

Hossain i Gabr (2005) su predložili model za dugoročno sleganje komunalnog otpada:

$$\frac{\Delta s}{H_0} = C'_{\alpha i} \cdot \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right) + C'_{\beta} \cdot \log\left(\frac{t_3}{t_2}\right) + C'_{\alpha f} \cdot \log\left(\frac{t_4}{t_3}\right) \quad (9.12)$$

gde je:

$C'_{\alpha i}$ – modifikovani indeks sekundarne kompresije koji je u funkciji od nivoa napona i stepena degradacije (~ 0.03)

C'_β – indeks biodegradacije (~ 0.19)

C'_{af} – indeks puzanja

t_1 – vreme završetka primarne kompresije (~ 10 – 15 dana)

t_2 – procenjeno vreme sekundarne kompresije (~ 100 – 2000 dana)

t_3 – vreme završetka biodegradacije (~ 3500 dana)

t_4 – vreme puzanja nakon biodegradacije

Ovaj model razvijen je na osnovu rezultata eksperimentalnih laboratorijskih ispitivanja. Kao što se može videti, u predloženom modelu, veličina sleganja koja je uslovljena promenom naponskog stanja. Za vreme biodegradacije jedan deo mase otpada pretvara se u gas, uz povećanje koeficijenta poroznosti i naknadnog povećanja sleganja otpada. Stepem biodegradacije definisan je preko koeficijenta stvaranja gasa kao i koeficijenata celuloze, hemiceluloze i lignina. Vremena trajanja kompresije t_1 , t_2 , t_3 i t_4 , određena su na osnovu krive proizvedenog gasa i uključena su u razvijeni model.

9.3.2. Empirijski modeli

Specifična svojstva komunalnog otpada koja utiču na sleganje (fizičko-hemijske promene, biohemijska dekompozicija tokom vremena), nisu eksplicitno obuhvaćene prethodnim modelima. Zbog toga su u upotrebi i određeni empirijski modeli izraženi matematičkim relacijama preko: logaritamske, hiperboličke i eksponencijalne funkcije puzanja.

Logaritamska funkcija

Korišćenjem logaritamske funkcije, sleganje se može odrediti preko nekoliko jednačina. Analiziranjem podataka sleganja tri deponije visine oko 30 m u periodu od devet godina, Yen i Scanlon (1975) su predložili logaritamsku funkciju za određivanje sleganja pomoću jednačine:

$$\rho = \frac{ds}{dt} = m' - n' \cdot \log t \quad (9.13)$$

gde su:

ρ – brzina sleganja

m' i n' -empirijske konstante

t - vreme, izraženo razlikom analiziranog vremena i početka osmatranja
($t=t_i-t_0$);

s – procena sleganja za analizirani vremenski interval ($s = s_i - s_0$).

Brzinu sleganja Yen i Scanlon (1975) su izrazili u obliku:

$$m = \frac{1}{H_0} \cdot \frac{ds}{dt} = c - d \cdot \log t \quad (9.14)$$

gde su:

s - sleganje izraženo u metrima

H_0 - početna visina deponije u metrima

t - razmatrano vreme izraženo u mesecima

m - brzina sleganja (1/mesec)

c i d - parametri brzine sleganja (1/mesec)

Sleganje za konkretni vremenski interval $[(t_i+\Delta t)-t_i]$, se određuje integracijom brzine sleganja za razmatrani vremenski period:

$$\begin{aligned} \Delta s &= H_0 \int_{t_1}^{t_1+\Delta t} m \cdot dt = H_0 \int_{t_1}^{t_1+\Delta t} (c - d \cdot \log t) dt = \\ &= H_0 \cdot \left[c \cdot t - \frac{d}{\ln 10} \cdot (t \cdot \ln t - t) \right]_{t_1}^{t_1+\Delta t} \end{aligned} \quad (9.15)$$

tako da razmatrani vremenski period treba da zadovolji uslov:

$$t_1 + \Delta t \leq 10^{c/d} \quad (9.16)$$

Jednačina 9.13 pokazuje vezu između vremena i brzine deformacije, iz koje su Ling i dr. (1998) integracijom direktno odredili sleganje

$$\Delta s = t \cdot [m' - n' \cdot (\log t - 1)] \quad (9.17)$$

Koristeći $\log t$ (Ling i dr. 1998) sleganje se izražava sledećom jednačinom

$$\Delta s = m' + n' \cdot \log t \quad (9.18)$$

gde je:

Δs – sleganje za određeni vremenski interval izraženo u metrima ($\Delta s = s_i - s_0$)
 t - vreme, izraženo razlikom analiziranog i na početku osmatranja ($t = t_i - t_0$)
 m' i n' - empirijske konstante

Ovaj model se često izražava i u sledećem obliku

$$\Delta s = H_0 \cdot \left[\alpha + \beta \cdot \log \left(t - \frac{t_c}{2} \right) \right] \quad (9.19)$$

gde je:

Δs - sleganje

H_0 - početna visina deponije u metrima

α - empirijski parametar ($= 0.00095 H_0 + 0.00969$)

β - empirijski parametar ($= 0.00035 H_0 + 0.00501$)

t – proteklo vreme od početka odlaganja otpada

t_c – vreme izgradnje deponije

Eksponencijalna funkcija puzanja

Ovaj model ima široku primenu u slučajevima puzanja mnogih materijala u građevinarstvu. Edil i dr. (1990) su analizirali brzinu sleganje otpada usled konstantnog opterećenja, preko sledećeg eksponencijalnog modela puzanja

$$\rho = \frac{ds}{dt} = \frac{p}{t^q} \quad (9.20)$$

gde su:

p i q – empirijske konstante koje se definišu preko brzine sleganja u jedinici vremena

ρ - brzina sleganja u jedinici vremena

Pošto logaritamska funkcija (jed. 9.13) i funkcija puzanja izražavaju odnos veličine relativne deformacije i vremena, one se za prognoziranje sleganja mogu integrisati u odnosu na vreme

$$\Delta s = \frac{p}{1-q} \cdot t^{1-q} \quad (9.21)$$

Bazirajući se na ovom izrazu i koristeći eksponent $t^{q'}$, sleganje se može odrediti iz jednačine (Ling i dr., 1998):

$$s = p' \cdot t^{q'} \quad (9.22)$$

gde su:

p' i q' nove, pozitivne empirijske konstante, pri čemu je $p' = p/q'$, a $q' = 1 - q$.

Eksponencijalni model sleganja u zavisnosti od vremena, na drugačiji način, prikazali su El-Fadel i dr. (1999):

$$\Delta s = H_0 \cdot \Delta \sigma \cdot M' \left(\frac{t}{t_r} \right)^{N'} \quad (9.23)$$

gde je:

Δs - sleganje

H_0 - početna visina otpada

$\Delta \sigma$ - pritisak kompresije u zavisnosti od visine otpada, zapreminske težine i spoljnih uticaja

M' - referentna stišljivost za određenu deponiju (1.6×10^{-5} - 5.8×10^{-5} , 1/kPa);

- N' - mera brzine kompresije koja varira u odnosu na starost i uslove odlaganja otpada (0.5-0.67)
- t - vreme od početka odlaganja otpada
- t_r - tipično referentno vreme koje je uključeno kako bi se eliminisala dimenzija vremena (najčešće se usvaja 1 dan)

Za određivanje parametara M' i N' , primenjuju se dijagrami logaritamske zavisnosti relativnih deformacija u funkciji logaritma vremena, na osnovu rezultata laboratorijskih i terenskih ispitivanja.

Hiperbolička funkcija

Hiperbolička funkcija se uspešno koristi u analizi sleganja za različite geotehničke probleme, a posebno kod analize sleganja nasipa na mekoj glini. Ling i dr. (1998) su kombinovali logaritamsku funkciju sa funkcijom puzanja i analizirajući sleganje tri različite deponije, predložili su empirijski izraz za prognoziranje sleganja otpada na komunalnim deponijama u vidu hiperboličke funkcije

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta s(t)}{H_0} \Rightarrow \Delta s = \frac{t}{\frac{1}{\rho_0} + \frac{t}{s_{ult}}} \quad (9.24)$$

gde je

Δs - razlika sleganja za analizirani interval vremena $t_i - t_0$, (tj. $s_i - s_0$)

t - razlika između analiziranog vremena i početka vremena osmatranja (tj. $t_i - t_0$);

ρ_0 - početna brzina sleganja kada je $t = t_0$ (0.001 m/dan);

s_{ult} - konačno sleganje (tj. kad je $t = \infty$).

Obično vrednost sleganja na terenu iznosi između 80 i 95 % od konačnog ukupnog sleganja. Vreme pri kome sleganje dostiže 95 % konačnog sleganja, sračunato je kao $t_f = 19 s_{ult} / \rho_0$ (Ling i dr. 1998).

Hiperbolički model daje bolju prognozu sleganja otpada u odnosu na logaritamske i eksponencijalne modele, koji za dugogodišnje vremenske intervale pokazuju

neograničeni rast sleganja. Ovo je fizički nemoguće, jer se mogu dobiti negativne vrednosti sleganja koje bi ukazale da deponija tone. Iz tog razloga su Ling i dr. (1998), preporučili da se za maksimalnu veličinu sleganja usvoji 40 % od visine deponije tj. debljine otpada. Zato je hiperbolički model koristan u slučajevima kada postoji promena uslova opterećenja, kao što je punjenje deponije. Uobičajeno je da se t_0 odnosi na $t = 0$, tako da hiperbolička funkcija pruža mogućnost i za unošenje bilo kog vremenskog intervala, što je korisno u slučaju promene uslova opterećenja pa se analize mogu i naknadno sprovesti.

Kako je kod upravljanja deponijom za vreme njenog korišćenja kao i nakon zatvaranja, važnija brzina i razvoj dugotrajnih vremenskih sleganja od same veličine, Coumoulos i Koryalos (1997) su predložili jedan drugačiji pristup predviđanja dugotrajnih sleganja otpada od vlastite težine. Osnovna pretpostavka je da se ova sleganja, u relaciji sa logaritmom vremena, mogu predstaviti pravom linijom. U tom slučaju, vertikalna deformacija usled sekundarne kompresije od vlastite težine, može se izraziti jednačinom koja se koristi i u mehanici tla:

$$\frac{\Delta s}{H_0} = C'_\alpha \cdot \log \frac{t}{t_1} \quad (9.25)$$

gde je:

Δs - sleganje u periodu između vremena t i t_1

H_0 - visina otpada

C_α - modifikovani indeks sekundarne kompresije

t i t_1 - vremena na krivoj sekundarnih sleganja nakon zatvaranja deponije

Brzina vertikalnih deformacija je nagib krive izražene prethodnom jednačinom i može se izraziti kao:

$$Y = \frac{d(\Delta s / H_0)}{dt} = \frac{0.434 \cdot C_\alpha}{t_c + \frac{t}{2}} \quad (9.26)$$

gde je:

Y – brzina vertikalnih deformacija izražena u % po mesecu ili % po godini;

C_α – koeficijent sekundarne kompresije

t – proteklo vreme izraženo u mesecima ili godinama

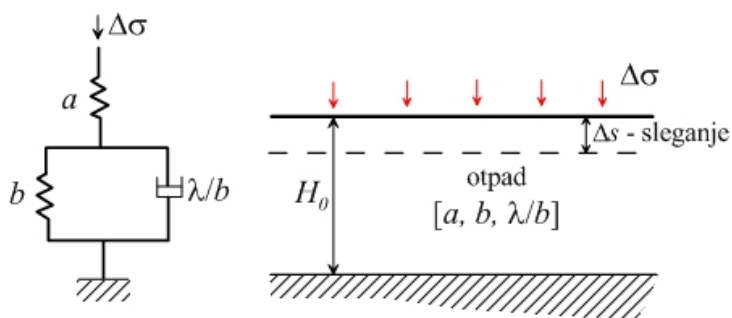
t_c – vreme popunjavanja (obično se usvaja 1 mesec)

Ovde treba napomenuti da brzina vertikalnih deformacija Y zavisi od tačnosti vrednosti C_α za koju su autori predložili širok interval 0.02 – 0.25.

9.3.3. Reološki modeli

Prikazani empirijski modeli kao i modeli koji su zasnovani na teoriji konsolidacije, često se koriste i u praksi su pokazali zadovoljavajuću tačnost. Međutim, njima nisu eksplicitno obuhvaćeni svi mehanizmi koji učestvuju u sleganju komunalnog otpada, pa se zato sve više koriste i reološki modeli.

Reološki model Gibson i Lo (1961) koji je korišćen za prognozu sleganja tla usled dugoročne sekundarne kompresije, korišćen je i za prognozu sleganja treseta. Ovaj model iskoristili su Edil i dr. (1990) za prognozu sleganja otpada na deponiji (Slika 9.8).



Slika 9.8. Reološki model sleganja komunalnog otpada (Edil i dr., 1990)

Vertikalni pritisak ($\Delta\sigma$) predstavlja sopstvenu težinu otpada ili dopunsko opterećenje na deponiji, konstanta a predstavlja primarno sleganje usled nanošenja opterećenja, konstanta b odgovara sekundarnom sleganju usled mehaničkog puzanja, dok je odnos λ/b analogan sporom sekundarnom sleganju izazvanom vremenskom biodekompozicijom komunalnog otpada.

Ovaj reološki model Edil i dr. (1990) su izrazili preko sledećih jednačina

$$\Delta s(t) = H_0 \cdot \varepsilon(t) = H_0 \cdot \Delta\sigma \left\{ a + b \left[1 - e^{-(\lambda/b)t} \right] \right\} \quad (9.27)$$

$$\frac{\Delta s}{H_0} = \Delta\sigma \cdot a + \Delta\sigma \cdot b \left[1 - e^{-(\lambda/b)t} \right] \quad (9.28)$$

gde je:

- Δs - sleganje
- H_0 - početna visina otpada
- ε - relativna deformacija ($\Delta s/H_0$)
- $\Delta\sigma$ - vertikalni pritisak (zavisi od visine otpada, zapreminske težine i dopunskih opterećenja)
- a - parametar primarne kompresije (od 1×10^{-4} – 8×10^{-5} 1/kPa)
- b - parametar sekundarne kompresije (od 2×10^{-3} – 1.6×10^{-2} 1/kPa)
- λ/b - brzina sekundarne kompresije (od 1.4×10^{-4} – 9×10^{-4} 1/dan)
- t - vreme od početka nanošenja opterećenja

Prvi član ($\Delta\sigma a$), predstavlja primarnu kompresiju, dok se drugi član ($\Delta\sigma b$) odnosi na sekundarnu kompresiju (za $t \rightarrow \infty$). Prikazane intervale vrednosti predložili su El-Fadel i dr. (1999).

Za definisanje prvog člana u ovom modelu, usvojene su pretpostavke Terzagijeve teorije konsolidacije. Pored toga, analize su pokazale da promena parametra a sa vremenom, relativno malo odstupa od linearnosti, za razliku od promene parametra λ koji ukazuje na veća odstupanja.

Drugi član u jednačini 9.28, koji se odnosi na sekundarnu kompresiju, može se napisati i u sledećem obliku koji je pogodan za definisanje parametara b i λ/b :

$$\log\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}\right) = \log(\Delta\sigma \cdot \lambda) - 0.434 \cdot t \cdot \frac{\lambda}{b} \quad (9.29)$$

gde je:

- $\delta\varepsilon/\delta t$ - promene deformacije u fazi sekundarne kompresije.

9.3.4. Biološki modeli

Postojeći geotehnički modeli, bez obzira na njihovo stalno usavršavanje, ne uzimaju u obzir dovoljno prisustvo organske frakcije i faktore koji utiču na raspadanje, tako da su i dalje prisutni određeni nedostaci kada se primenjuju na komunalni otpad. Pošto se više od polovine ukupnog sleganja deponije može pripisati sekundarnoj kompresiji, a s obzirom da se sleganje deponije kreće u granicama od 5 % pa do preko 40 % početne visine, može se reći da se radi o značajnom nedostatku. Zato se sve češće vrši poboljšanje postojećih metoda geotehničke analize da bi se tačnije odredilo sleganje deponije usled procesa biodegradacije.

Na osnovu 25 analiziranih slučajeva sleganja deponija, Edgars i dr. (1992) su predložili model sleganja u kojem su uključeni i mikrobiološki procesi unutar tela deponije. Oni su konstatovali da je kod nekoliko deponija, kod kojih je nakon njihovog zatvaranja uspešno modeliran proces sleganja, primenom modela koji je predložio Sowers (1973), posle dužeg vremenskog perioda došlo do značajnijeg porasta deformacija od sopstvene težine, iako deponije nisu bile direktno izložene uticaju kiseonika. Prema ovim autorima, brzi porast mikroorganizama u deponiji izazvao je dodatna sleganja usled biološkog razlaganja komunalnog otpada. Na osnovu tih zapažanja, Edgars i dr. (1992) su predložili model sleganja otpada u koji je uključeno i biološko raspadanje

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + A \cdot e^{\alpha D} \cdot t_1 \cdot \ln\left(\frac{t}{t_1}\right) \quad (9.30)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \frac{A \cdot e^{\alpha D}}{1 - m} \cdot t_1 \cdot \left[\ln\left(\frac{t}{t_1}\right)^{1-m} - 1 \right] \quad (9.31)$$

gde je:

- ε – vertikalna deformacija
- ε_1 – poznata deformacija ostvarena za vreme t_1
- t – proteklo vreme
- D – nivo napona
- A – parametar puzanja koji odražava istoriju napona

- α – parametar puzanja koji ukazuje na efekat uticaja intenziteta napona na stepen puzanja
- m – parametar puzanja kojim se kontrolišu vremenske deformacije

Ove jednačine su prvobitno predložili Singh i Mitchell (1968) za izradu modela deformacije od puzanja tla. Za utvrđivanje vrednosti parametara A i α , autori su predložili ispitivanje dva identična uzorka sa različitim nivoima napona. Međutim, Edgars i dr. (1992) su pokazali da se svi parametri mogu odrediti ispitivanjem jednog uzoraka, na osnovu podataka koji se dobijaju iz dijagrama vreme-sleganje.

Prognoza vertikalnih deformacija usled biološkog raspadanja, bazira se na porastu populacije mikroba u deponiji i izražava se u sledećem obliku

$$\varepsilon_{bio} = B \cdot [e^{\beta(t-t_k)} - 1] \quad (9.32)$$

gde je:

- ε_{bio} – vertikalna deformacija usled biološkog raspadanja
- β – prosečan stepen porasta mikroorganizama u deponiji
- B – faktor razmere sleganja na terenu
- t – proteklo vreme
- t_k – kritično vreme pri kojem se povećavaju deformacije zbog biološke aktivnosti

Jednačina (9.32) je predložena na osnovu sledećih pretpostavki

- efekti raspadanja su manji do kritičnog vremena (t_k) od kojeg počinje porast deformacija
- raspadanje a time i stvaranje gasova karakteriše eksponencijalni porast bakterija i
- deformacije usled raspadanja direktno su proporcionalne broju prisutnih bakterija u deponiji

Wall i Zeiss (1995) su radi utvrđivanja uticaja biodegradacije na sleganje proučavali mogućnost skraćivanja vremena koje je potrebno za biološku stabilizaciju otpada do nerazgradljive materije. Ispitivanja su sprovedena praćenjem procesa raspadanja u 6

ćelija i to: u 3 ćelije se nalazio otpad koji je bio u poodmakloj fazi raspadanja dok je u ostale 3, proces raspadanja bio neaktivan. U svim ćelijama praćeni su: sastav i zapremina gasa, pH filtrata i ukupnog organskog ugljenika, kao i sleganje otpada. Prvobitna, primarna i sekundarna kompresija, raćunate su primenom modela zasnovanog na teoriji konsolidacije (Sowers, 1973). Zapaženo je da u toku prve faze sekundarnog sleganja, raspadanje nije mnogo uticalo na stepen sleganja. Da bi utvrdili uticaj uklanjanja ćvrstih materijala na sleganje, procenat razloženog ugljenika za vreme trajanja ispitivanja od 250 dana, upoređivali su sa stepenom trenutnog i budućeg petogodišnjeg sekundarnog sleganja. Kako je ukupna masa raspadnutog ćvrstog materijala u toku ispitivanja iznosila oko 1 %, a sraćunato sekundarno sleganje u istom periodu iznosilo oko 4 %, zakljućili su da raspadanje nema znatniji uticaj na velićinu sekundarnog sleganja. Kao osnovni razlog za to, naveli su povezivanje komponenti ćvrstog otpada i stvaranje skeleta od krupnijih komponenti, ćime se “maskira“ iznos sleganja usled raspadanja.

Međutim, gubitak mase otpada za 5 – 8 %, zbog stvaranja organskog ugljenika, ukazao je na to da je u poćetku sleganje otpada znatno brže od procesa raspadanja, ali se ono kasnije usporava. Na osnovu toga je zakljućeno da nakon izvesnog vremena, sleganje usled raspadanja postaje sve znaćajnije. Autori su gubitak organske mase zbog stvaranja ugljenika, za period od pet godina, sraćunali koristeći sledeći izraz

$$C_0 - C_t = C_0 - C_0 \cdot e^{-k \cdot t} \quad (9.33)$$

gde je

C_0 - prvobitna masa ugljenika

C_t - masa ugljenika nakon vremena t

k - konstanta.

Park i Lee (1997) su prikazali matematićki model koji ukljućuje i proces raspadanja biorazgradljivog otpada sa geotehnićkog stanovića, ukazujući na celokupno ponaćanje komunalnog otpada prilikom sleganja. Za formiranje modela iskoriććena je teoretska kriva kompresije koju su prikazali Grisolia i Napoleoni (1995). Ona obuhvata

karakteristične deformacije otpada, koje se odvijaju u pet faza (Slika 9.3). Ovaj model dugotrajnog sleganja izražava se na sledeći način

$$\varepsilon(t)_{long-term} = \varepsilon(t)_{mec} + \varepsilon(t)_{dec} \quad (9.34)$$

gde:

$\varepsilon(t)_{mec}$ - mehanička sekundarna kompresija usled reorijentacije i naknadnog zbijanja otpada a

$\varepsilon(t)_{dec}$ - sekundarna kompresija usled procesa raspadanja

Mehanička sekundarna kompresija se određuje iz sledeće jednačine

$$\varepsilon(t)_{mec} = C'_\alpha \cdot \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (9.35)$$

a sekundarna kompresija, koja nastaje zbog vremenskog procesa biorazgradnje čvrstih materija u otpadu, izražava se kao:

$$\varepsilon(t)_{dec} = \varepsilon_{tot-dec} \cdot (1 - e^{-k_t}) \quad (9.36)$$

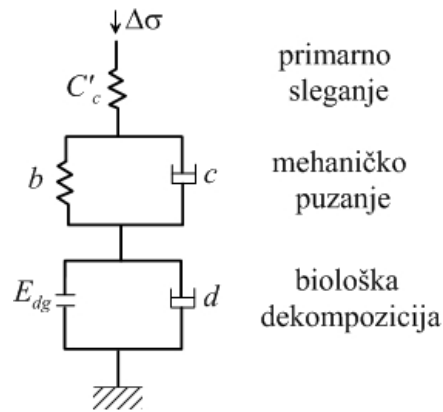
gde je:

C'_α – modifikovani indeks sekundarne kompresije

k_t – konstanta (stepen deformacije na početku raspadanja / vreme - 2.37/god. - 1.35/god.)

$\varepsilon_{tot-dec}$ – ukupan iznos kompresije koji nastaje usled raspadanja biorazgradivog otpada (7.2 – 6.1 %)

Marques (2001) je predložio kompozitni reološki model, korišćenjem postojećih ali delimično modifikovanih jednačina, preko kojih je uključeno i sekundarno sleganje zbog vremenske biorazgradnje (Slika 9.9).



Slika 9.9. Kompozitni model stišljivosti komunalnog otpada (Marques i dr., 2003)

Prema ovom modelu, ukupna deformacija predstavlja zbir tri komponente:

$$\varepsilon = \varepsilon_p + \varepsilon_c + \varepsilon_b \quad (9.37)$$

gde je:

ε_p – trenutno, tj. primarno sleganje

ε_c – sekundarno sleganje zbog mehaničkog puzanja i

ε_b – sekundarno sleganje zbog biološke dekompozicije

Primarno sleganje se određuje po teoriji konsolidacije, kao što je preporučio Sowers (1973):

$$\varepsilon_p = C'_c \cdot \log\left(\frac{p'_0 + \Delta\sigma}{p'_0}\right) \quad (9.38)$$

Sekundarno sleganje, koje je posledica mehaničkog puzanja, određuje se iz delimično modifikovane jednačine za sekundarnu kompresiju glina:

$$\varepsilon_c = \Delta\sigma \cdot b \left[1 - e^{-ct'}\right] \quad (9.39)$$

gde je:

b - koeficijent mehaničkog puzanja

c - konstanta brzine mehaničkog puzanja i

t' - vreme od nanošenja novog opterećenja ($\Delta\sigma$) do vremena za koje se određuje sleganje

Za određivanje vremenskog sleganja usled biološke dekompozicije, iskorišćena je jednačina Park i Lee (1997):

$$\varepsilon_b = E_{dg} [1 - e^{-dt''}] \quad (9.40)$$

gde je:

E_{dg} - ukupna deformacija zbog biodekompozicije

d - konstanta brzine biodekompozicije i

t'' - vreme proteklo od nanošenja sloja otpada u deponiji do vremena za koje se određuje sleganje (ovo je jedina razlika u odnosu na osnovnu jednačine Park i Lee, 1997)

Prema tome, ukupno sleganje se može odrediti iz sledećeg izraza:

$$\frac{\Delta s}{H_0} = C'_c \cdot \log \left(\frac{p'_0 + \Delta \sigma}{p'_0} \right) + \Delta \sigma \cdot b [1 - e^{-ct'}] + E_{dg} [1 - e^{-dt''}] \quad (9.41)$$

Nešto kasnije, Marques i dr. (2003), delimično su modifikovali ovaj model tako što su uključili mogućnost nanošenja pojedinačnih slojeva otpada (Slika 9.10).

Nakon nanošenja svih slojeva otpada, ukupno sleganje (Δs) se za zadato vreme se određuje iz jednačine

$$\Delta s(t) = \sum_{i=1}^N \Delta H_i \cdot [\varepsilon_{pi} + \varepsilon_{ci}(t) + \varepsilon_{bi}(t)] \quad (9.42)$$

gde je:

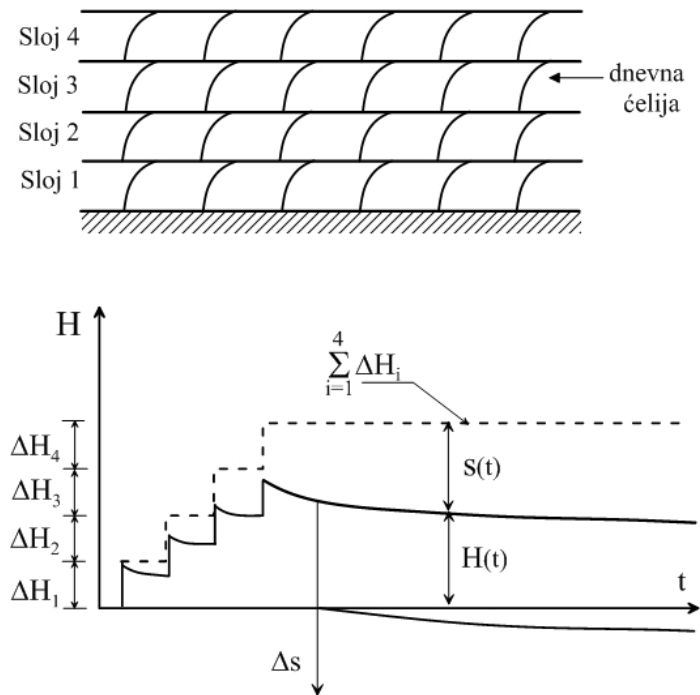
N - broj slojeva u deponiji

ΔH_i - početna debljina zbijenog sloja i

ε_{pi} - deformacija u sloju i usled trenutnog sleganja od opterećenja koje izazivaju gornji slojevi

ε_{ci} - deformacija u vremenu t u sloju i zbog mehaničkog puzanja povezanog sa naprezanjima od sopstvene težine i težine naležućih slojeva i

ε_{bi} - deformacija u vremenu t u sloju i zbog biološke dekompozicije sloja i



Slika 9.10. Proces odlaganja otpada sa prikazom kompozitnog modela (Marques i dr., 2003)

Za svaki sloj pojedinačno, mogu se primeniti sledeće jednačine

$$\varepsilon_{pi} = C'_c \cdot \log \left(\frac{\frac{1}{2} \gamma_i \cdot \Delta H_i + \sum_{j=i+1}^N \Delta \sigma_{ij}}{\frac{1}{2} \gamma_i \cdot \Delta H_i} \right) \quad (9.43)$$

$$\varepsilon_{ci}(t) = b \cdot \left[\frac{1}{2} \gamma_i \cdot \Delta H_i \cdot (1 - e^{-c(t-t_i)}) + t_j \cdot \sum_{j=i+1}^N \Delta \sigma_{ij} \cdot (1 - e^{-c(t-t_j)}) \right] \quad (9.44)$$

$$\varepsilon_{bi}(t) = E_{dg} \cdot (1 - e^{-d(t-t_i)}) \quad (9.45)$$

gde je:

γ_i – zapreminska težina sloja i

$\Delta \sigma_{ij}$ – porast vertikalnog opterećenja u sloju i od sloja j ($j > i$) a

t_i i t_j – vremena u kojima su slojevi i i j nanesen ($t - t_i > 0$ i $t - t_j > 0$)

Može se videti da u prikazanim jednačinama figuriše veliki broj parametara, za čije su određivanje neophodna redovna i obimna praćenja stanja deponije. Autori ovog modela preporučuju da se u nedostatku dovoljnog broja ulaznih podataka, za zadata deponiju, za početak, primene već postojeće veličine određene na drugim deponijama koje bi se postupno korigovale, saglasno izmerenim sleganjima.

Hettiarachchi i dr. (2009) su takođe, razvili model sleganja preko kojeg se ukupno sleganje izražava kao kombinovani proces mehaničke kompresije $(\Delta H)_m$ i biodegradacije $(\Delta H)_b$. Model se izražava u sledećem obliku:

$$(\Delta H)_b = H_i \cdot \left[\frac{M_{si}}{\rho_w} \sum_{j=1}^4 \frac{f_{sj}}{G_{sj}} (1 - e^{-\lambda_j t}) \right] \quad (9.46)$$

$$(\Delta H)_m = H_i \cdot C' \cdot \log \left(\frac{p'_0 + \Delta\sigma'}{p'_0} \right) \quad (9.47)$$

$$H_f = H_i - (\Delta H)_b - (\Delta H)_m \quad (9.48)$$

gde je:

C' – modifikovani indeks primarne kompresije (0.174 – 0.205)

p'_0 – efektivni napon

$\Delta\sigma'$ – razlika između efektivnih napona

f_{sj} – početna čvrsta frakcija za svaku materijalnu grupu otpada (0.15 – 0.35)

ρ_w – zapreminska masa vode

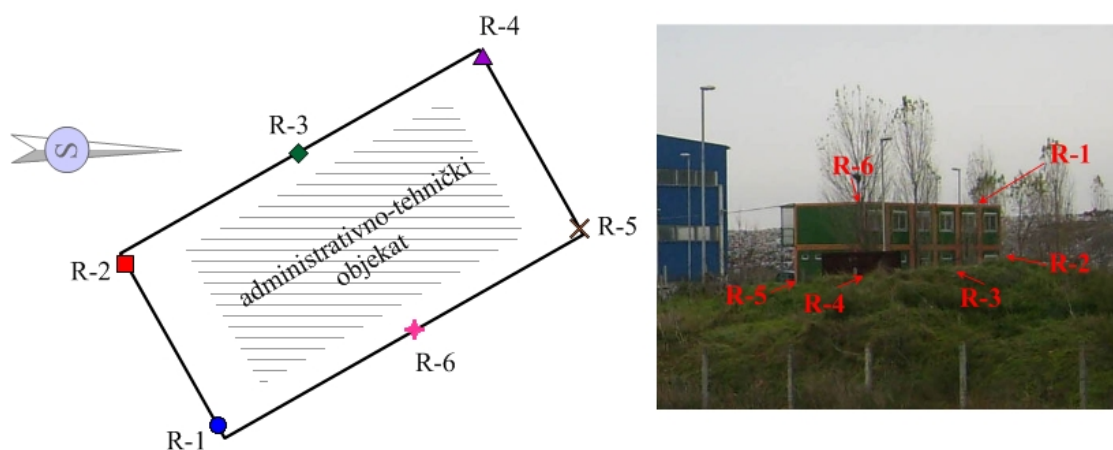
G_{sj} – specifična težina j -te grupe otpada (1 – 3)

λ_j - početna kinetička konstanta za j -tu grupu otpada (0 – 0.001/dan)

9.3. VALIDACIJA PARAMETARA DEFORMABILNOSTI KORIŠĆENJEM RAZLIČITIH MODELA U ANALIZI SLEGANJA KOMUNALNOG OTPADA

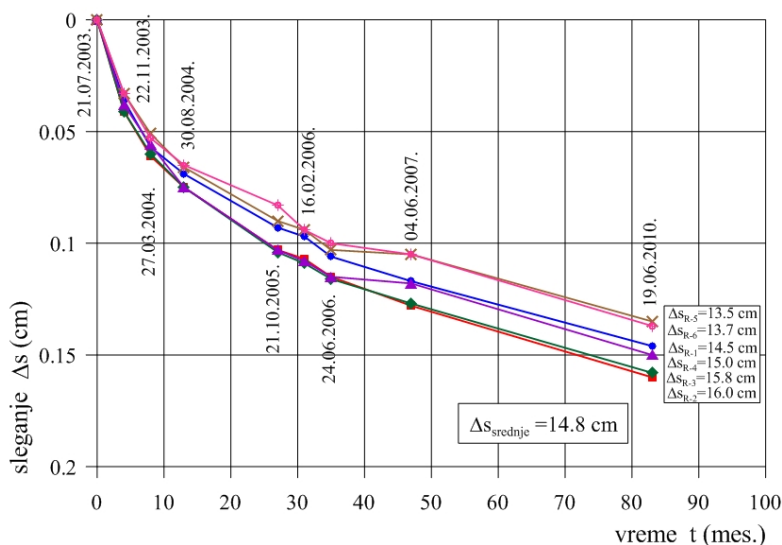
9.3.1. Opšte karakteristike lokacije sa rezultatima geodetskih osmatranja

Validacija laboratorijski određenih vrednosti parametara deformabilnosti komunalnog otpada, obavljena je na osnovu poređenja izmerenih i sračunatih sleganja. Za poređenje su poslužili rezultati sleganja, koji su dobijeni geodetskim osmatranjima repera postavljenim na temeljima administrativno-tehničkog objekta, izgrađenog na prostoru komunalne deponije u Novom Sadu. Na lokaciji osmatranog objekta, odlaganje otpada započelo je 1980 god. a završeno je 1999 god. Sam objekat je izgrađen 2003 god. Odmah nakon izgradnje, postavljeni su geodetski reperi (ukupno šest: R-1 do R-6), koji su permanentno osmatrani od 2003. do 2010 god., od strane nekoliko preduzeća iz Novog Sada: “Geoinženjering“, biro za inženjersku geodeziju (od 21.07.2003. do 30.08.2004.), Geodetski biro “Geosoft“ (od 21.10.2005 do 04.06. 2007) i geodetski biroa “Geometar“ (merenje obavljeno 19.06.2010). Skica objekta sa lokacijama geodetskih repera, prikazana je na Slici 9.11.



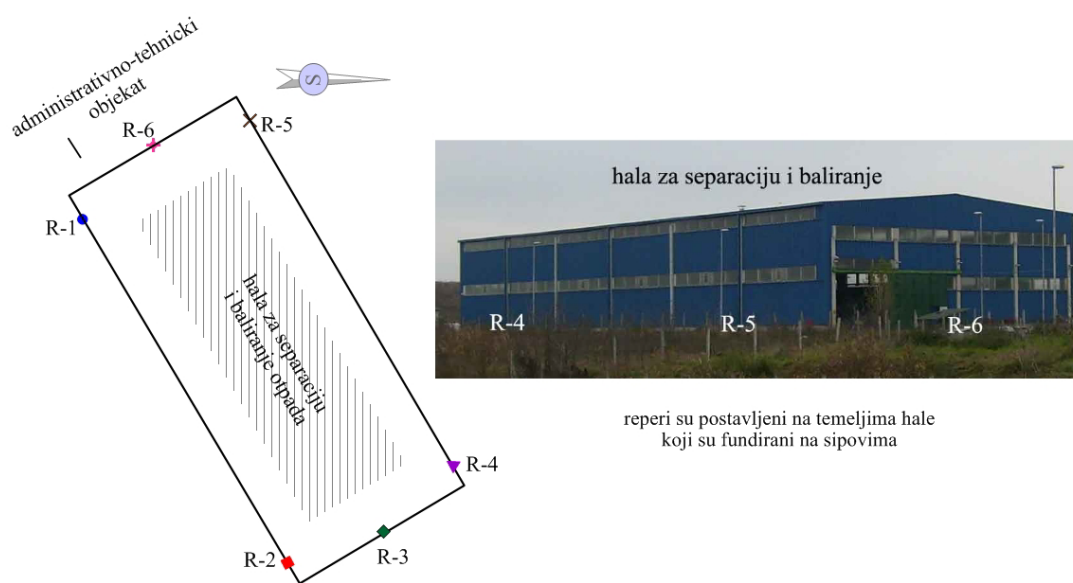
Slika 9.11. Skica objekta sa lokacijama geodetskih repera za kontrolu sleganja

Na Slici 9.12, prikazani su rezultati obavljenih merenja, koji pokazuju manja neravnomerna sleganja sa blagim naginjanjem objekta ka jugozapadu (Rakić i dr. 2011a).



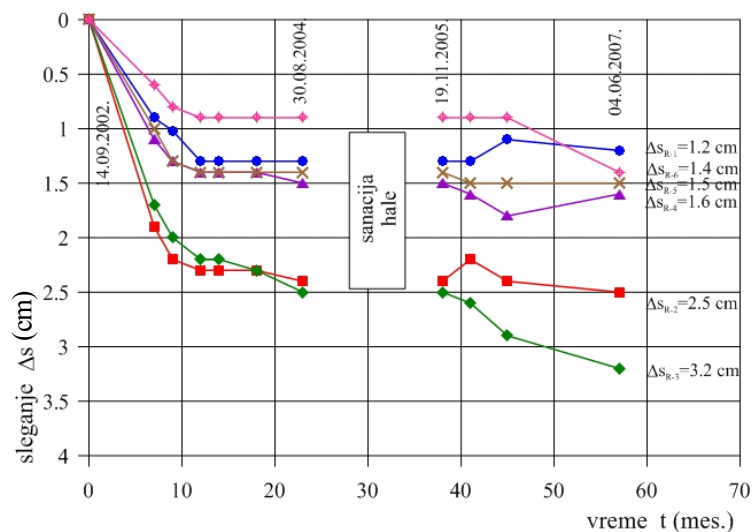
Slika 9.12. Izmerena sleganja na repnim tačkama administrativno-tehničkog objekta

Geodetska osmatranja vršena su i na hali za separaciju i baliranje otpada, koja se nalazi u neposrednoj blizini administrativno-tehničkog objekta (Slika 9.13).



Slika 9.13. Položaj hale sa reperima na kojima su vršena osmatranja

I u ovom slučaju osmatrano je šest repnih tačaka, koje su postavljene na temeljima karakterističnih stubova hale. Rezultati ovih osmatranja prikazani su na Slici 9.14, gde se može videti da su izmerena znatno manja sleganja, kako pre, tako i nakon izvršene sanacije hale. Osnovni razlog za to je što su temelji ove hale fundirani na šipovima dužine od 16 - 18 m, koji su oslonjeni na sive peskove znatno boljih fizičko-mehaničkih karakteristika od onih kod otpada (Rakić i dr. 2011a).



Slika 9.14. Izmerena sleganja na repnim tačkama postavljenim na temeljima hale

Prilikom izgradnje hale, uklonjeni su gornji slojevi komunalnog otpada i zamenjeni su šljunkovitim materijalom, debljine od 1.2 – 1.5 m. Bez obzira na izvršenu zamenu materijala, nakon izgradnje hale došlo je do znatnih deformacija podne ploče i trotoara, što je i uslovalo njenu sanaciju 2005. god. Međutim, sleganja podne ploče i trotoara i nakon izvršene sanacije su nastavljeni, što se jasno može videti na Slici 9.15, i bez geodetskih osmatranja, koja nisu vršena.

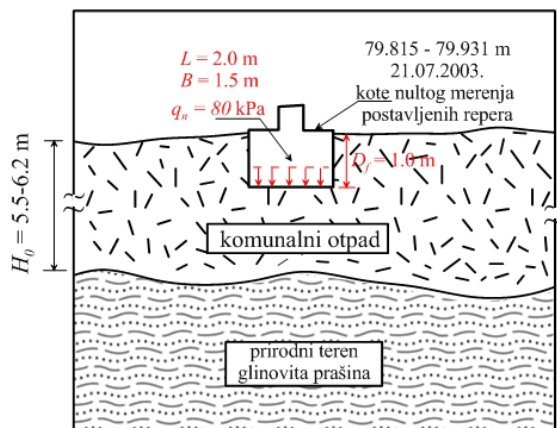


Slika 9.15. Vidljive deformacije na hali usled sleganja komunalnog otpada (snim. 2010 god.)

S obzirom da su za ovu halu, geodetska osmatranja vršena samo na temeljima, koji su fundirani na šipovima, u nastavku je prikazana analiza sleganja administrativno-tehničkog objekta.

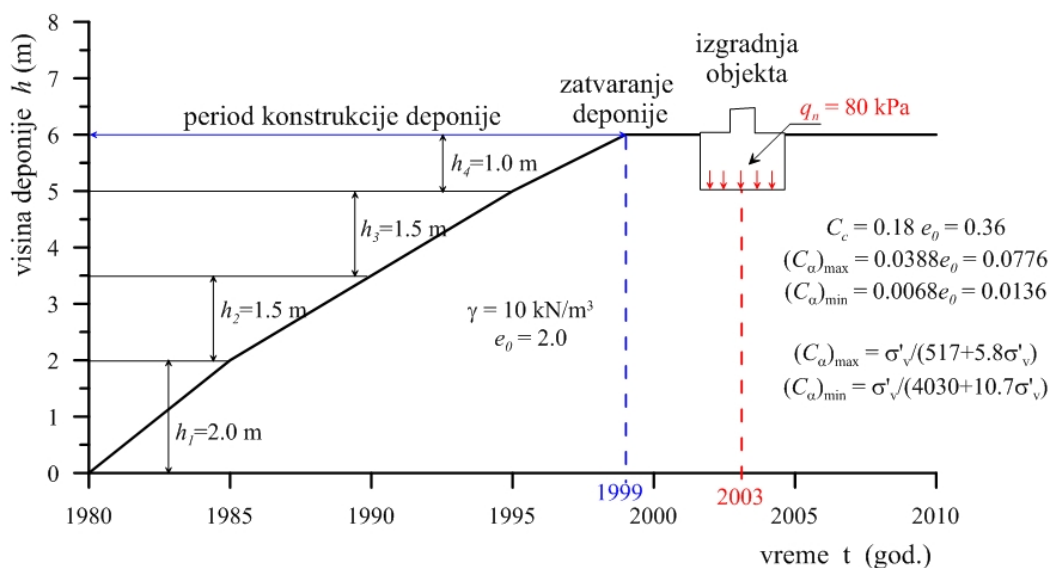
Geotehnička istraživanja terena, obavio je Zavoda za geotehniku iz Subotice, 2002 god. Pored administrativno-tehničkog objekta, istraživanjima je obuhvaćena i hala za separaciju i baliranje otpada koja je sagrađena u neposrednoj blizini. Od geotehničkih istražnih radova, izvedene su tri istražne bušotine i tri opita statičke penetracije, a

laboratorijskim geomehaničkim ispitivanjima, obuhvaćen je samo prirodni teren, bez ispitivanja komunalnog otpada. Istraživanjima je konstatovana debljina otpada od 5.5 do 6.2 m. Geotehnički presek terena u široj zoni objekta, prikazan je u Poglavlju 4, na Slici 4.15, a lokacija objekta, u odnosu na komunalnu deponiju, prikazana je na Slici 4.14. Na osnovu prikazanih rezultata, formiran je opšti geotehnički model terena, koji je iskorišćen za analizu sleganja (Slika 9.16).



Slika 9.16. Opšti geotehnički model terena u zoni objekta

Objekat je montažnog karaktera, sa kontaktnim opterećenjem od oko $\Delta\sigma = 80$ kPa, koje se preko temelja samaca dimenzije 1.5 x 2.0 m, prenosi na teren, tj. komunalni otpad. Dinamika odlaganja otpada, u periodu od 1980. god. pa do zatvaranja lokacije 1999. god., nije poznata, tako da je za potrebe analize sleganja, ona pretpostavljena i prikazana je na Slici 9.17.



Slika 9.17. Usvojeni geotehnički model terena za analizu sleganja

S obzirom da je na analiziranoj lokaciji odlaganje otpada završeno 1999. god., a sam objekat je izgrađen četiri godine kasnije, analiza sleganja sprovedena je u dve faze:

- prva: pre izgradnje objekta (obuhvaćen je period sleganja otpada od početka odlaganja otpada pa do zatvaranja deponije tj. do izgradnje objekta što je i najčešći slučaj kada se analizira sleganje komunalnog otpada), i
- druga: nakon izgradnje objekta (analizirano je sleganje temelja usled dopunskog opterećenja od objekta u fazi primarne kompresije kao i nastavak sleganja otpada usled sekundarne kompresije)

Pored toga, analiza sleganja je sprovedena i za slučaj da na komunalnom otpadu nije izgrađen administrativno-tehnički objekat.

Na ovaj način dobijene su vrednosti ukupnog sleganja komunalnog otpada, pre i nakon izgradnje objekta. Poređenja sa izmerenim sleganjima, obuhvatila su samo period nakon izgradnje objekta.

Analiza sleganja je urađena primenom parametara deformabilnosti, za koje su uspostavljene određene zavisnosti na osnovu rezultata laboratorijskih ispitivanja, koja su obavljena u toku izrade ove doktorske disertacije a prikazane su u Poglavlju 8. Za modele u kojima figurišu parametri koji nisu obuhvaćeni istraživanjima (empirijski, reološki i biološki modeli), vrednosti su usvojene na osnovu preporuka autora modela. Analiza sleganja je urađena korišćenjem odabranih modela iz svih opisanih grupa, tj. koristio sam:

- modele koji su zasnovani na teoriji konsolidacije i to: model Sowers-a, (1973) i model Bjarngard i Edgers-a, (1990)
- empirijske modele: logaritamska funkcija Yen i Scanlon (1975), eksponencijalna funkcija El-Fadel i dr. (1999), i hiperbolička funkcija Ling i dr. (1998)
- reološki model: Edil i dr. (1990)
- biološki model: Park i Lee (1997)

9.3.2. Modeli zasnovani na teoriji konsolidacije

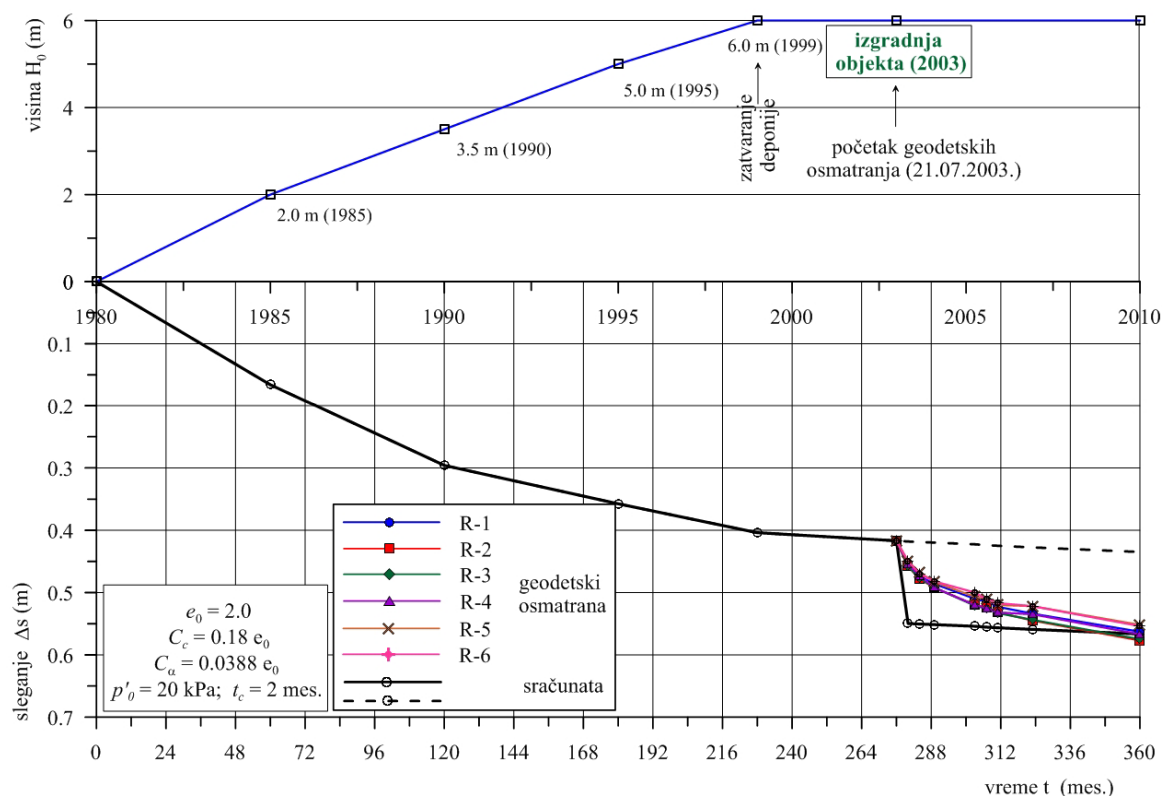
9.3.2.1. Model Sowers-a

Analizu sleganja sam izvršio korišćenjem parametara prikazanih u Tabeli 9.1, gde su korišćeni određeni fizički pokazatelji koji se odnose na gradsku deponiju Novog Sada, a prikazani su u Poglavlju 3.

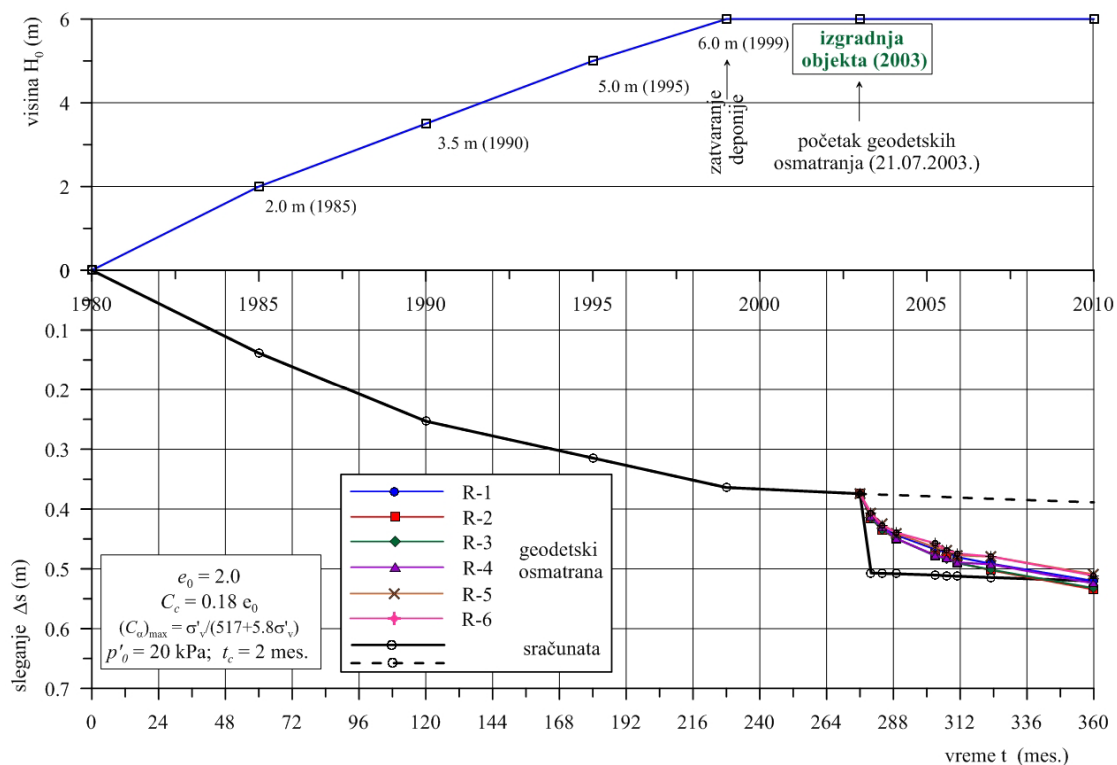
Tabela 9.1. Korišćeni parametri za model Sowers-a

e_0	$C_c = 0.18 e_0$	$C_\alpha = 0.0388 e_0$	$C_\alpha = \sigma'_v / (517 + 5.8 \sigma'_v)$	p'_0 (kPa)	t_c (mes.)
2.0	0.360	0.0776	0.0174 - 0.0619	20	2

U zavisnosti od načina definisanja indeksa sekundarne kompresije, rezultati su prikazani na Slikama 9.18. i 9.19.



Slika 9.18. Poređenje sračunatih i izmerenih vrednosti sleganja - zavisnost C_α od e_0



Slika 9.19. Poređenje sračunatih i izmerenih vrednosti sleganja – zavisnost C_{α} od σ'_v

Bez obzira što su korišćene dve različite zavisnosti za definisanje indeksa sekundarne kompresije, sračunata sleganja koja se obave pre izgradnje objekta, pokazala su zadovoljavajuće sleganje jer je razlika u sleganju iznosila $\Delta s' = 4.6$ cm. Sleganje koje je posledica izgradnje objekta, tretirano je kao trenutna konsolidacija otpada u deponiji tj., inicijalno i konsolidaciono sleganje je objedinjeno i analizirano je kao primarno sleganje. Analiza je pokazala da je izgradnja objekta izazvala dodatno sleganje komunalnog otpada $\Delta s = 13.16$ cm. Može se reći da su odstupanja zanemarljiva s obzirom da su izmerena sleganja iznosila od $\Delta s_{osm} = 13.5$ cm do $\Delta s_{osm} = 16.0$ cm.

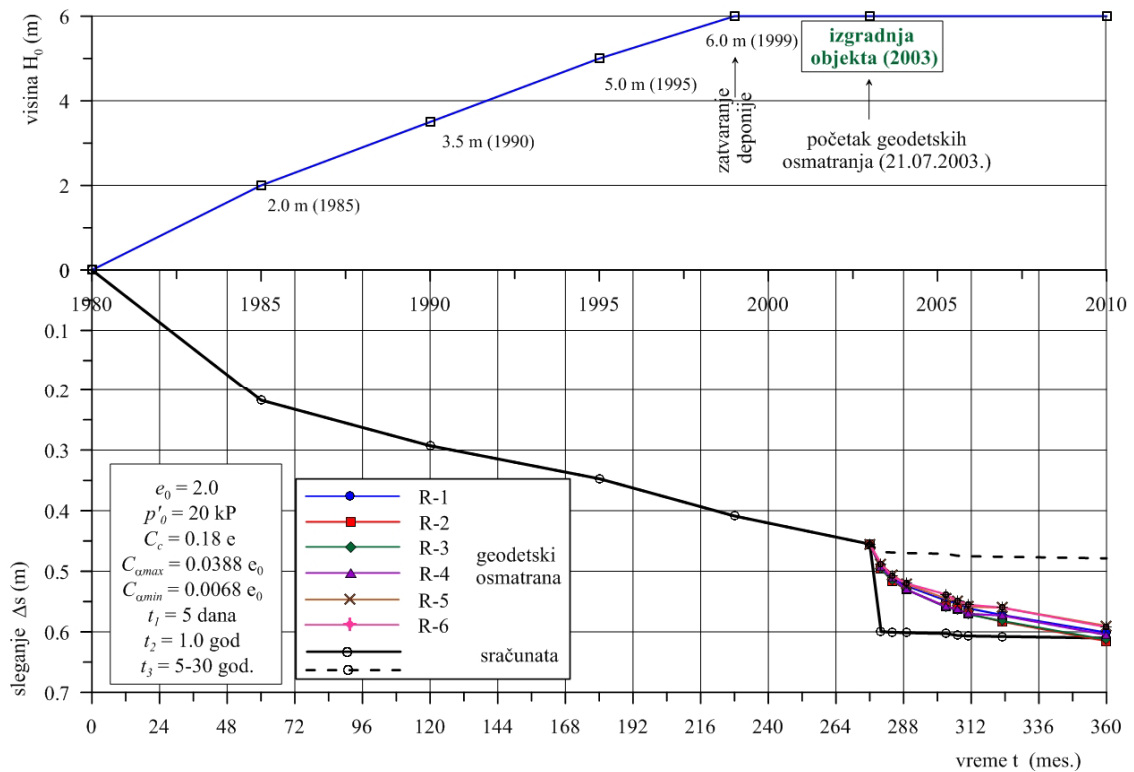
9.3.2.2. Model Bjarngard i Edgers-a

Analizu sam uradio sa parametrima prikazanim u Tabeli 9.2.

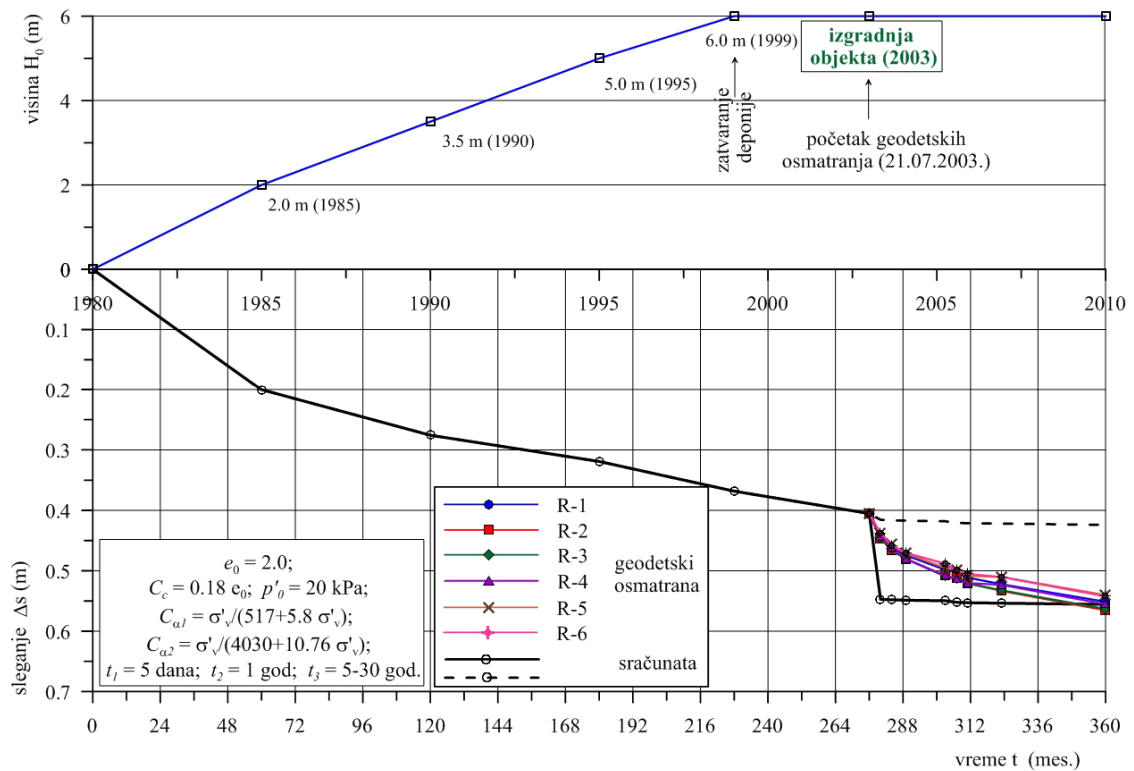
Tabela 9.2. Korišćeni parametri za model Bjarngard i Edgers-a

e_0	$C_c = 0.18 e_0$	$C_{\alpha 1} = 0.0068 e_0$	$C_{\alpha 2} = 0.0388 e_0$	p'_0 (kPa)	t_1 (dan)	t_2 (god.)
2.0	0.360	0.0136	0.0776	20	5	5
e_0	$C_c = 0.18 e_0$	$C_{\alpha 1} = \sigma'_v / (517 + 5.8 \sigma'_v)$	$C_{\alpha 2} = \sigma'_v / (4030 + 10.8 \sigma'_v)$			
2.0	0.360	0.0302	0.0638			

U zavisnosti od načina definisanja indeksa sekundarne kompresije, rezultati su prikazani na Slikama 9.20. i 9.21.



Slika 9.20. Poređenje sračunatih i izmerenih vrednosti sleganja – zavisnost C_a od e_0



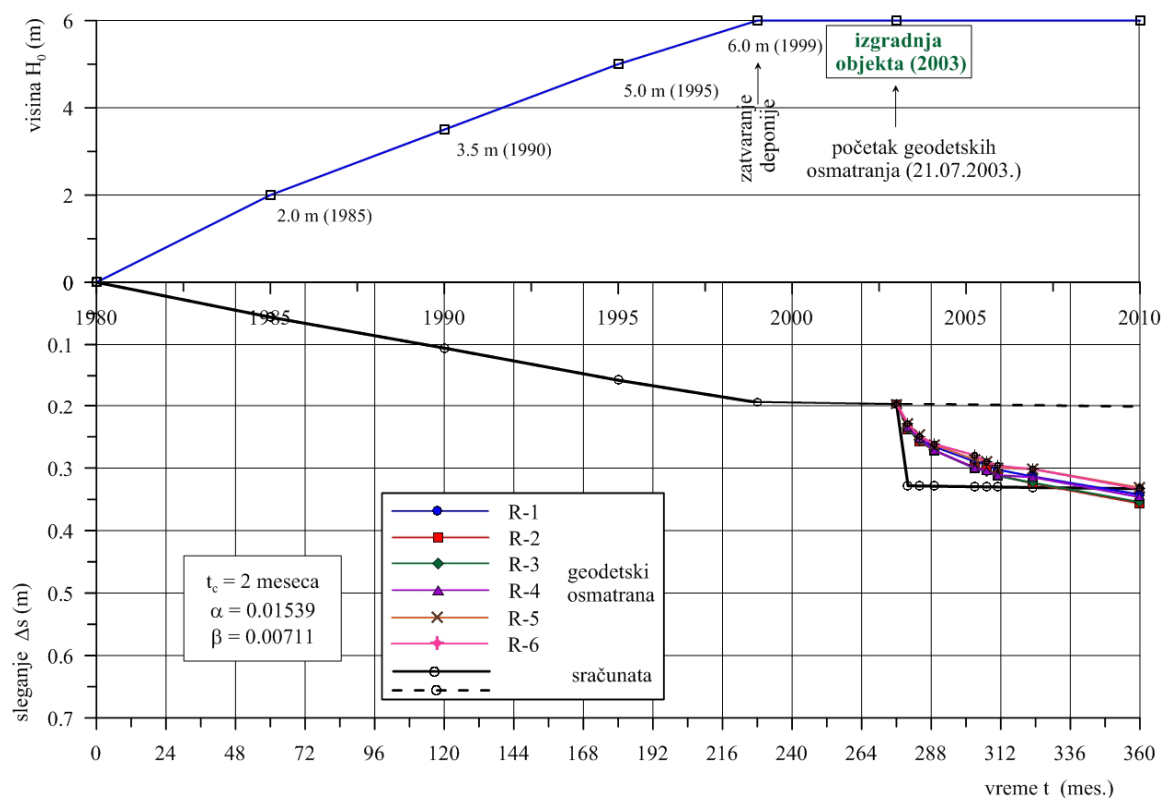
Slika 9.21. Poređenje sračunatih i izmerenih vrednosti sleganja – zavisnost C_a od σ'_v

Primenom ovog modela, može se zaključiti da su sleganja u prvoj fazi neznatno povećana u odnosu na sleganja sračunata primenom modela koji je predložio Sowers. U ovom slučaju, razlika u sleganju zbog primene različite zavisnosti za definisanje indeksa sekundarne kompresije, iznosila je 5.0 cm.

9.3.3. Empirijski modeli

9.3.3.1. Logaritamska funkcija (Yen i Scanlon, 1975)

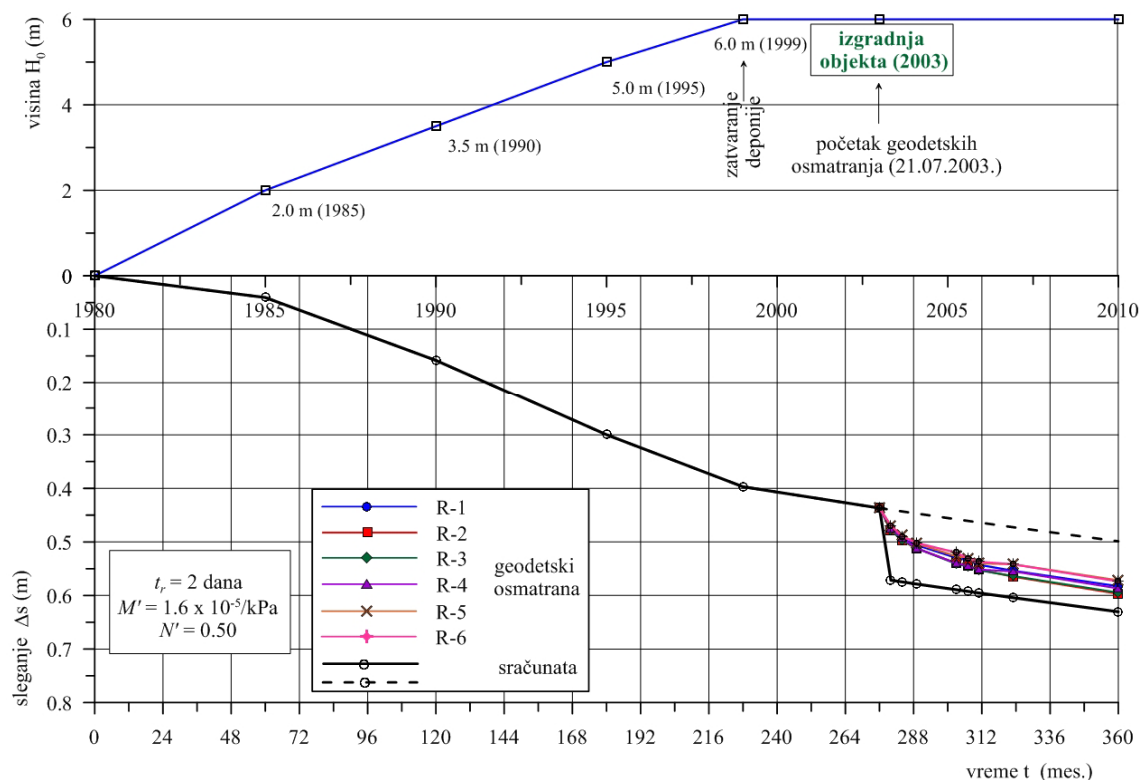
Analizu sleganja sam uradio sa parametrima koje je predložio autor modela, a prikazani su zajedno sa rezultatima sleganja na Slici 9.22.



Slika 9.22. Poređenje sračunatih i izmerenih vrednosti sleganja – logaritamska funkcija

9.3.3.2. Eksponencijalna funkcija puzanja (El-Fadel i dr., 1999)

I u ovom slučaju sam analizu sleganja uradio koristeći parametre koje su predložili autori modela, a prikazani su zajedno sa rezultatima sleganja na Slici 9.23.



Slika 9.23. Poređenje sračunatih i izmerenih vrednosti sleganja – eksponencijalna funkcija

9.3.3.3. Hiperbolička funkcija (Ling i dr., 1998)

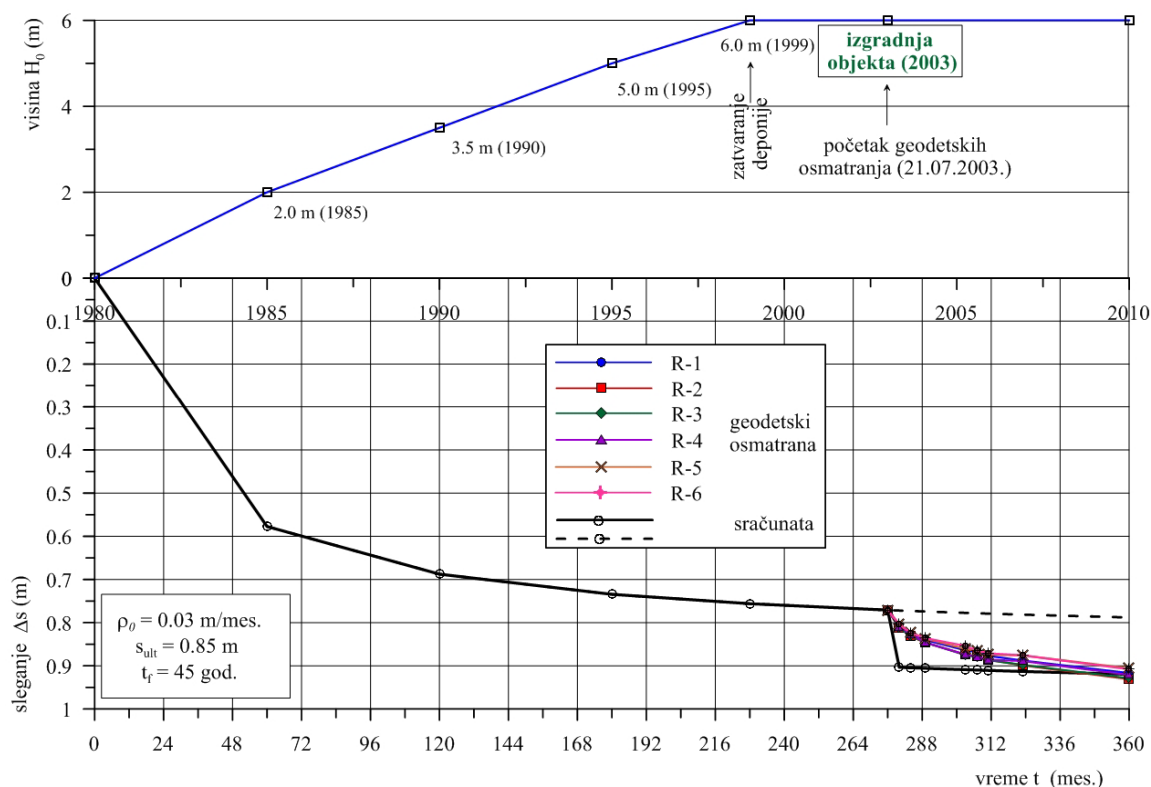
Kao i u prethodnim slučajevima, analizu sleganja sam uradio koristeći parametre koje su predložili autori modela, a prikazani su zajedno sa rezultatima sleganja na Slici 9.24. Za vreme pri kome sleganje dostiže 95 % konačnog sleganja, usvojio sam $t_f = 45$ god, pa sam na osnovu predloga autora odredio vrednost za $s_{ult} = 0.85$ m, što približno odgovara 15 % početne visine deponije (autori su predložili max 40 %).

9.3.3.4. Komentar korišćenja empirijskih modela

Primenom empirijskih modela, sa parametrima koje su predložili njihovi autori, dobijene su dosta različite vrednosti sleganja. Tako je u zavisnosti od modela, razlika sračunatih sleganja u prvoj fazi iznosila i do $\Delta s' = 57.44$ cm. dok su razlike u sekundarnim sleganjima, izazvanim izgradnjom objekta, takođe dosta različite, i kretale su se od $\Delta s_{sec} = 1.21$ cm do $\Delta s_{sec} = 5.71$ cm. Na osnovu toga, može se zaključiti da su empirijski parametri, predloženi od strane autora modela, karakteristični za određenu

lokaciju. To navodi na zaključak da se oni ne mogu uopšteno definisati, već se moraju pažljivo primenjivati i usvajati na osnovu određenih ispitivanja. Zato je za korišćenje ovih modela, od osnovnog značaja poznavanje sastava i fizičkih karakteristika komunalnog otpada (zapreminske težine, vlažnosti, koeficijenta poroznosti), dimenzija deponije, uslova u samoj deponiji (temperature, prisustvo kiseonika) i sl.

Najznačajnije odstupanje sračunatih sleganja dobijeno je korišćenjem logaritamske funkcije u odnosu na hiperboličku. Najbolje sleganje sa rezultatima sračunatih korišćenjem modela zasnovanih na teoriji konsolidacije, pokazala je eksponencijalna funkcija.



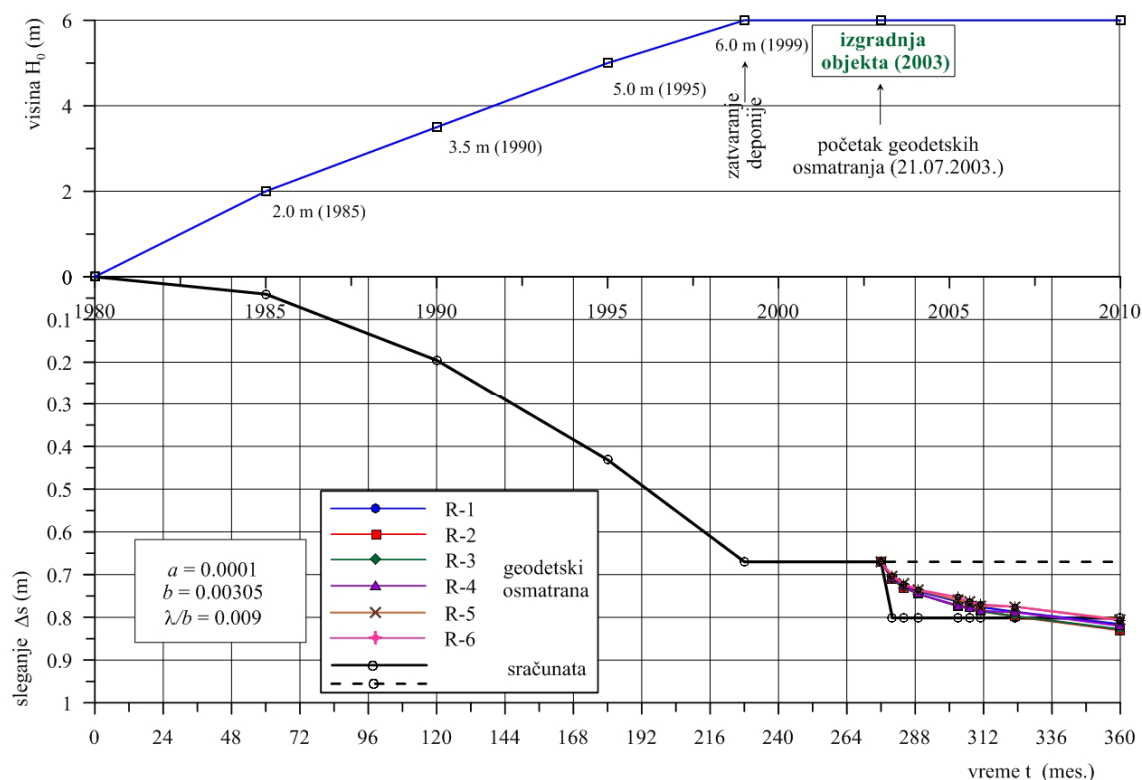
Slika 9.24. Poređenje sračunatih i izmerenih vrednosti sleganja – hiperbolička funkcija

9.3.4. Reološki model

Analizu sam uradio koristeći opšti model Gibson i Lo (1961) koji je za potrebe sleganja komunalnog otpada, delimično unapređen od strane Edil i dr. (1990). U ovom slučaju,

za analizu sleganja koristio sam parametre koje su predložili El-Fadel i dr. (2008), analizirajući sleganje komunalnog opita u okviru 6 ćelija dimenzija 25 x 25 m (korišćeni su parametri za prvu ćeliju). Rezultati analize sleganja prikazani su na Slici 9.25.

Primenom ovog reološkog modela, sa parametrima koje su preuzeti iz literature, dobijene su veće vrednosti sleganja, u fazi pre izgradnje objekta.

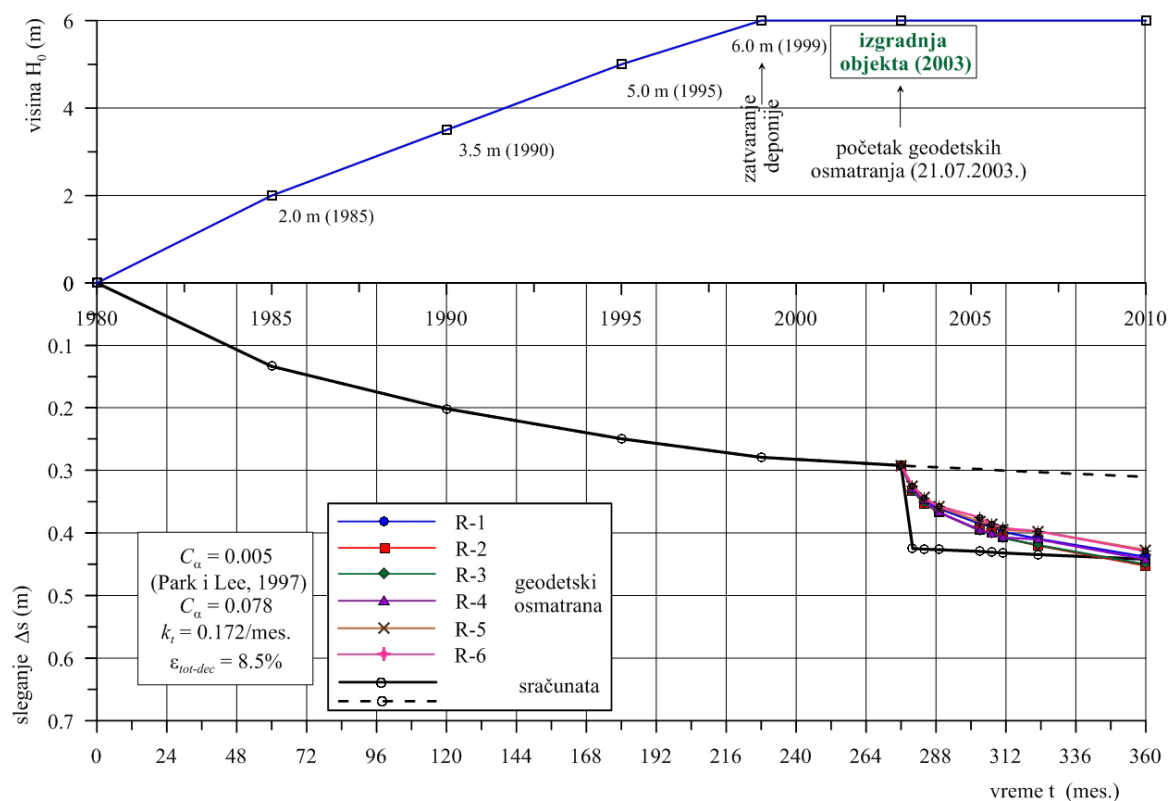


Slika 9.25. Poređenje sračunatih i izmerenih vrednosti sleganja – reološki model

9.3.5. Biološki model

Analizu sleganja sam uradio koristeći model Park i Lee (1997). Ovim modelom, ukupno sleganje se računa kao zbir sleganja usled mehaničke sekundarne kompresije i sleganja koja proističu iz procesa raspadanja. S obzirom da se, za sračunavanje sleganja u fazi mehaničke kompresije, koristi indeks sekundarne kompresije, u ovom slučaju sam koristio vrednosti koje su dobijene ovim istraživanjima. Može se reći da su one znatno veće od vrednosti koje su predložili autori ($C_\alpha = 0.05$). Za sračunavanje sleganja usled

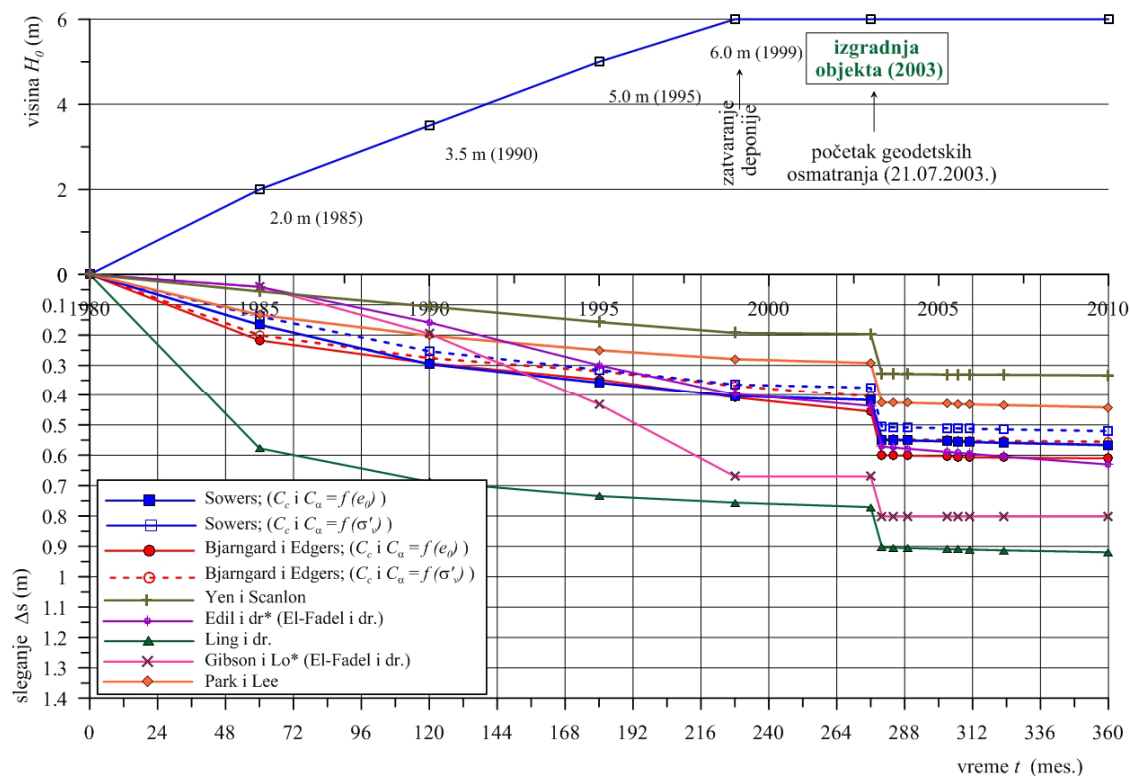
raspadanja, koristio sam parametre koje su predložili autori modela. Rezultati analize sleganja prikazani su na Slici 9.26.



Slika 9.26. Poređenje sračunatih i izmerenih vrednosti sleganja – reološki model

9.3.6. Analiza dobijenih rezultata

Na Slici 9.27, zbirno su prikazani dijagrami sračunatih vrednosti sleganja, primenom korišćenih modela. Primećuju se značajne razlike sračunatih sleganja, kako za vremenski interval pre izgradnje objekta ($\Delta s'$) tako i nakon njegove izgradnje ($\Delta s''$). Najveća odstupanja, u odnosu na osrednjene vrednosti sračunatih sleganja od $\Delta s'_{\text{sred}} \approx 44.5$ cm, odnosno $\Delta s''_{\text{sred}} \approx 60$ cm, dobijena su korišćenjem empirijskih modela (logaritamskog i hiperboličkog tipa) kao i primenom reološkog modela Gibson i Lo-a. Treba naglasiti, da sam u ovim modelima, sleganja računao sa usvojenim parametrima, na osnovu predloga njihovih autora. Sasvim zadovoljavajuće sleganje izračunatih sa izmerenim sleganjima, dobijeno je korišćenjem modela u kojima figurišu parametri koji su dobijeni laboratorijskim ispitivanjima komunalnog otpada sa analizirane lokacije.



Slika 9.27. Zbirni prikaz sračunatih sleganja korišćenjem različitih modela

Uporedni prikaz sračunatih sleganja, primenom različitih modela, dat je i u Tabeli 9.3. Posebno su prikazane vrednosti sleganja pre ($\Delta s'$), a posebno nakon izgradnje objekta ($\Delta s''$).

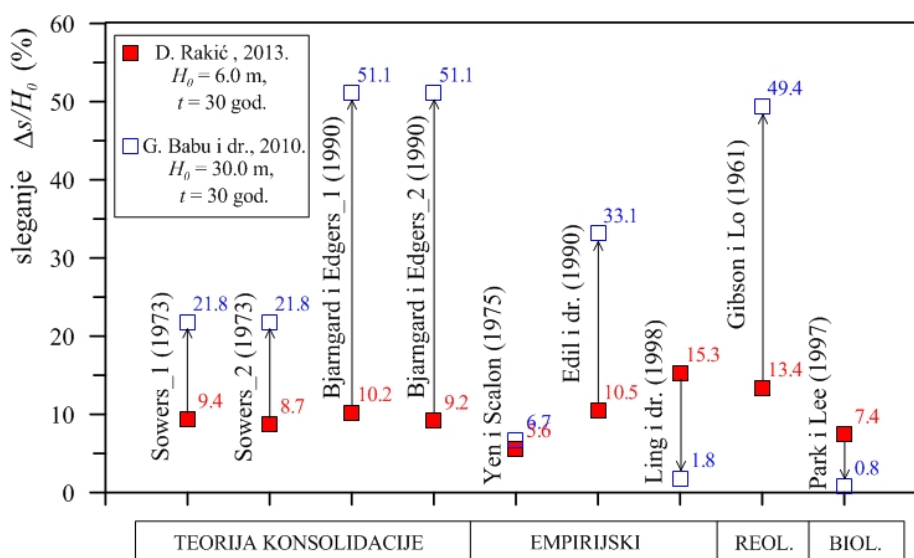
Tabela 9.3. Sračunata sleganja i procentualni iznos deformacija u odnosu na početnu visinu

Modeli sleganja		Sračunata sleganja (cm)				Izmerena sleganja od objekta Δs_{osm} (cm)
		sleganje ($\Delta s'$)		ukupno sleganje ($\Delta s''$)		
Teorija konsolidacije	Sowers, 1973	41.68	6.9%	56.65	9.4%	13.5- 16.0
		37.43	6.2%	52.03	8.7%	
	Bjarngard i Edgers, 1990	45.51	7.6%	61.02	10.2%	
		40.52	6.7%	55.13	9.2%	
Empirijski	Logaritamska funkcija (Yen i Scalon, 1975)	19.64	3.3%	33.3	5.6%	
	Eksp. funkcija puzanja (Edil i dr., 1990)*	43.67	7.3%	63.04	10.5%	
	Hiperbolička funkcija (Ling i dr., 1998)	77.08	12.8%	91.95	15.3%	
Reološki	Gibson i Lo (1961)*	66.99	11.2%	80.17	13.4%	
Biološki	Park i Lee, (1997)	29.23	4.9%	44.20	7.4%	

* - U proračunima su korišteni parametri koje su predložili El-Fadel i dr. (1999).

Osim toga, sleganje je izraženo i procentualno u odnosu na početnu visinu otpada, $H_0 = 6.0$ m.

Velika neslaganja prilikom proračuna sleganja komunalnog otpada, korišćenjem različitih modela, prikazali su i Babu i dr. (2010). Oni su analizu uradili na usvojenom modelu jedne tipične deponije komunalnog otpada. Visina deponije iznosila je 30 m, a analize su sprovedene za vremenski period od 30 godina. Pri tome je usvojen scenario nanošenja komunalnog otpada u jednakim slojevima od po 3 m, sa prosečnom zapreminskom težinom otpada od $\gamma = 7.5$ kN/m³. Proračun sleganja izvršen je korišćenjem 15 različitih modela (obuhvaćene su sve četiri grupe), uključujući i predloženi model autora, kojim je uključeno i sleganje usled biodegradacije. Prilikom proračuna korišćeni su parametri koji su predloženi od autora modela. Sračunate vrednosti sleganja, kretale su se od svega $s_{min} = 0.242$ m, korišćenjem biološkog modela Park i Lee, pa do maksimalnog sleganja $s_{max} = 20.18$ m, korišćenjem takođe biološkog modela Hettiarachehi i dr. (2009). Posmatrano u odnosu na početnu visinu deponije $H_0 = 30$ m, deformacije su iznosile od svega 0.8 % pa do 67.2 %. Vrednosti sleganja, dobijene pomoću modela koji su analizirani u ovom radu, iskoristio sam za poređenje sa rezultatima prikazanim od strane Babu i dr. Na osnovu poređenja, koje je prikazano na Slici 9.28, jasno se mogu uočiti razlike sračunatih sleganja u zavisnosti od korišćenih modela.



Slika 9.28. Uporedni prikaz sračunatih sleganja sa literaturnim podacima

9.4. ZAKLJUČAK

Analiza sleganja deponije predstavlja jedan od najvećih geotehničkih problema, kada je u pitanju istraživanje komunalnog otpada. Pored svih poteškoća koje se odnose na način odlaganja, izbor materijala i pripreme uzoraka, korišćene metode i aparate za ispitivanje, poseban uticaj na sleganje otpada pripisuje se heterogenosti materijala, vremenu i biodegradacionim procesima, koji uslovljavaju promenu faznog sastava. Sleganje otpada se u početku izučavalo kao i sleganje tla, i računalo se kao zbir inicijalnog, konsolidacionog sleganja i sekundarne kompresije (inicijalno i konsolidaciono sleganje obično se analiziraju objedinjeno kao primarno sleganje).

Uticaj vremena na sleganje deponije komunalnog otpada, autori su analizirali kroz različite mehanizme, prema kojima se sleganje otpada analizira u fazama. Najčešće se izdvajaju tri osnovne faze: početna (uključuje mehaničko sleganje usled zbijanja i traje prvih nekoliko dana nakon odlaganja), faza puzanja (kretanje sitnih čestica u porni prostor između krupnijih) i faza koja uključuje biodegradaciju otpada.

Na osnovu predloženih mehanizama, autori su predlagali različite modele sleganja. Neki od njih zasnivaju se na teorijama mehanike tla, dok su drugi specifični za otpad. Oni se uopšteno mogu svrstati u sledeće četiri osnovne grupe: modeli zasnovani na tradicionalnoj Tercagijevoj teoriji konsolidacije tla (Sowers, 1973; Rao i dr., 1977; Bjarngard i Edgers, 1990; Fassette i dr., 1994; Richard i dr., 2001; Hossain i Gabr, 2005), empirijski modeli zasnovani na podacima terenskih i laboratorijskih ispitivanja (logaritamska funkcija: Yen i Scanion, 1975; Ling i dr., 1998; eksponencijalna funkcija puzanja: Edil i dr., 1990; Ling i dr., 1998; El-Fadel i dr., 1999; hiperbolička funkcija: Ling i dr., 1998; Coumoulos i Koryalos, 1997), reološki modeli za tla primenjeni na komunalni otpad (Gibson i Lo, 1961; Edil i dr., 1990; El-Fadel i dr., 1999) i modeli koji uključuju biodegradaciju otpada (Edgers i dr., 1992; Wall i Zeiss, 1995; Park i Lee, 1997; Marques i dr., 2003; Hettiarachchi i dr., 2009). Pored toga, predlagani su i složeni modeli koji u stvari predstavljaju kombinaciju modela izprethodnopomenutih grupa.

Primenjujući modele koji se najčešće koriste za prognozu sleganja, u ovom poglavlju je izvršena validacija laboratorijski određenih vrednosti parametara deformabilnosti

komunalnog otpada. Validacija je obavljena na osnovu poređenja sračunatih sa izmerenim sleganjima. Za poređenje su poslužili rezultati, koji su dobijeni geodetskim osmatranjima repera, postavljenim na temeljima administrativno-tehničkog objekta, koji je izgrađenog na prostoru komunalne deponije u Novom Sadu.

Geotehnički model je formiran na osnovu obavljenih geotehničkih istraživanja. Prilikom formiranja modela, efekat nadsloja je prikazan stupnjevitom promenom visine komunalnog otpada. Analiza sleganja obuhvatila je dve faze: period pre izgradnje objekta tj., od početka odlaganja otpada, 1980 god. do izgradnje objekta 2003 god., i period nakon izgradnje objekta sve do 2010 god. Na ovaj način su dobijene vrednosti ukupnog sleganja komunalnog otpada, za period od 30 god. U analizama sam koristio parametre deformabilnosti (indekse i modifikovane indekse primarne C_c i C'_c i sekundarne kompresije C_α i C'_α), za koje su uspostavljene određene zavisnosti, na osnovu rezultata laboratorijskih ispitivanja, prikazane u ovom radu. Kod modela u kojima su figurisali parametri koji nisu obuhvaćeni istraživanjima (empirijski, reološki i biološki modeli), odgovarajuće vrednosti su usvojene na osnovu preporuka autora modela.

U zavisnosti od primenjenih modela, rezultati su ukazali na značajne razlike sračunatih sleganja. Tako su za period do izgradnje objekta, sleganja iznosila od $\Delta s'_{min} = 19.64$ cm, tj. 3.3 % u odnosu na početnu visinu otpada od 6.0 m, do $\Delta s'_{max} = 77.08$ cm, što predstavlja 12.8 % početne visine. Najveće vrednosti sleganja su dobijene korišćenjem reološkog i empirijskog modela hiperboličkog tipa, u kojima su korišćeni parametri modela na osnovu predloga njihovih autora. Analogna odstupanja su dobijena i za period nakon izgradnje objekta, tj. $\Delta s''_{min} = 33.3$ cm (5.6 %), odnosno, $\Delta s''_{max} = 91.95$ cm (15.3 %).

Ovakva rasipanja nisu neuobičajena, jer su mnogo veća neslaganja, prilikom proračuna sleganja komunalnog otpada primenom različitih modela, dobijali i drugi autori. Ona su se kretala od svega 0.8 % - 67.2 % (Babu i dr., 2010), odnosno od 33.1% pa čak do 85.9 % (Park i dr., 2002b; Park i dr., 2007), u odnosu na početnu visinu deponije. Ovo samo potvrđuje poznatu činjenicu, da sve do danas, još uvek nije razvijen generalni model,

koji uključuje sve aspekte koji su od uticaja na sleganje komunalnog otpada. Razloge za to treba tražiti u specifičnosti lokacije deponije, u smislu sastava i starosti otpada. Ove specifičnosti brojni modeli ne mogu da uključe u analizu sleganja jer su formirani na osnovu mnogobrojnih ispitivanja i osmatranja sleganja na, umnogome, drugačijim deponijama. To se posebno odnosi na empirijske modele (matematičke funkcije), koji upravo preko odgovarajućih faktora, uvode specifičnost lokacije, odnosno sastav otpada. Iz tih razloga je njihova direktna i uopštena ekstrapolacija otežana, i često se postavlja pitanje njihovog uspešnog korišćenja, kod analiza sleganja deponija sa drugačijim sastavom otpada.

Međutim, poređenjem merenih i sračunatih sleganja primenom modela u kojima su figurisali parametri dobijeni laboratorijskim ispitivanjima komunalnog otpada sa analizirane lokacije (modeli zasnovani na teoriji konsolidacije: Sowers, Bjarngard i Edgers), dobijena su sasvim zadovoljavajuća sleganja ($\Delta s_{osm} = 13.5 - 16.0$ cm; $\Delta s_{ob} = 14.6 - 15.5$ cm). Kako i biološki model Park i Lee, uključuje mehaničku sekundarnu kompresiju (preko indeksa sekundarne kompresije C_a), može se reći da je i u ovom slučaju dobijeno dobro sleganje, jer je sračunato sleganje iznosilo $\Delta s_{ob} = 14.8$ cm. Za modele u kojima se ne koriste parametri deformabilnosti dobijeni ispitivanjima u ovom radu, najbolje sleganje sa izmerenim sleganjima dobijeno je korišćenjem hiperboličke funkcije Ling i dr. ($\Delta s_{ob} = 14.9$ cm).

Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da je za uspešnu prognozu sleganja komunalnog otpada, neophodno da se parametri deformabilnosti odrede dugotrajnim laboratorijskim i terenskim ispitivanjima otpada sa predmetnih (konkretnih) deponija. Osim toga, od velike važnosti je da se mere sleganja deponija i, saglasno tome, koriguju i poboljšaju modeli proračuna sleganja.

POGLAVLJE 10

ZAKLJUČAK

Geotehnički parametri komunalnog otpada sa deponija u Srbiji, do sada nisu bili predmet naučnih istraživanja kod nas. Domaća stručna i naučna javnost, bila je oslonjena na direktno korišćenje literaturnih podataka dobijenih ispitivanjem komunalnog otpada sa različitih deponija u svetu. Međutim, sastav komunalnog otpada varira od regiona do regiona i od države do države, što značajno utiče i na njegove fizičko-mehaničke parametre. Zato, direktno preuzimanje i korišćenje ovih parametara kod projektovanja novih, pa i sanacija postojećih deponija komunalnog otpada u Srbiji, bez prethodnih provera, vrlo je problematično.

U okviru ove disertacije su u cilju uspostavljanja konstitutivnih zavisnosti koje se odnose na komunalni otpad sa deponija u Srbiji, obavljena određena laboratorijska ispitivanja. Ovim ispitivanjima definisani su osnovni fizičko-mehanički parametri koji se prilikom analiza sleganja, nosivosti i stabilnosti kosina deponija, koriste u numeričkom geotehničkom modeliranju komunalnog otpada. Sva ispitivanja izvršena su na veštački pripremljenim uzorcima, uz poštovanje preporuka koje se odnose na dimenzije korišćenih aparata i veličinu najvećih frakcija u uzorku (EN 1997-2, ASTM 2007-a, 2007-b). Za formiranje uzoraka korišćen je komunalni otpad različite starosti, koji je istražnim bušenjem i kopanjem istražnih jama uzet sa dve deponije u Srbiji (Ade Huje u Beogradu i gradske deponije u Novom Sadu). Komunalni otpad je tretiran kao “veštačko tlo“, pa su za definisanje fizičko-mehaničkih parametara primenjene konvencionalne laboratorijske metode istraživanja koje se koriste i u mehanici tla.

Nakon definisanja sastava komunalnog otpada, obavljena su identifikaciono-klasifikaciona ispitivanja. Ovim ispitivanjima ustanovljeno je sledeće:

- na prirodnim uzorcima dobijena je vlažnost od $w = 19-68\%$, što je ukazalo na postojanje zona unutar deponija sa izrazito promenljivom vlažnošću. Bez obzira na ova odstupanja, zaključeno je da su dobijene vrednosti, u poređenju sa literaturnim podacima, uobičajene jer se prema tim podacima vlažnost kreće i do $w = 150\%$

- na osnovu sadržaja organskih materija (13.2 – 14.6 %), zaključeno je da je komunalni otpad u podmaklom stadijumu razgradnje
- specifična težina se kretala u intervalu $G_s = 1.98 - 2.39$, s tim da su u zavisnosti od lokacije, predložene prosečne vrednosti $G_s = 2.0 - 2.2$
- uzorci su veštački formirani sa zapreminskim težinama u intervalu $\gamma = 9.5 - 17.6 \text{ kN/m}^3$. Na osnovu toga, sračunati su poroznost i koeficijent poroznosti, a s obzirom na širok interval zapreminskih težina, koeficijent poroznosti se kretao u granicama $e = 0.576 - 2.060$
- granulometrijski sastav komunalnog otpada je određivan na prethodno pripremljenom i usitnjenom materijalu, koji je iskorišćen za formiranje uzoraka na kojima su obavljani edometarski opiti i opiti direktnog smicanja. Rezultati su pokazale da starost opada ima uticaj na granulometrijski satav

Podaci o sastavu, obliku i veličini čestica u deponiji, kao i dobijene vrednosti identifikaciono-klasifikacionih pokazatelja, iskorišćeni su za formiranje novog postupka geotehničke klasifikacije komunalnog otpada, koji je prikazan u disertaciji. Pored navedenih podataka, predloženi sistem geotehničke klasifikacije uzima u obzir i faktore koji utiču na mehaničko ponašanje komunalnog otpada (sadržaj stišljivih i nestišljivih čestica i čestica sa armirajućom funkcijom u otpadu), kao i razgradljivost komponenti u otpadu.

Pored definisanja osnovnih pokazatelja fizičkog stanja i prikaza nove geotehničke klasifikacije komunalnog otpada, najveća pažnja posvećena je laboratorijskim ispitivanjima za određivanje čvrstoće smicanja i deformabilnosti. Čvrstoća smicanja komunalnog otpada je jedna od njegovih najvažnijih inženjerskih osobina. Ona je definisana preko pravolinijske (Kulon-Mor-Tercagijeve jednačine čvrstoće smicanja) i krivolinijske anvelope loma koristeći logaritamsku, a po prvi put, i hiperboličku funkciju. U oba slučaja, usvojen je isti kriterijum i to tako što je definisana mobilisana vrednost čvrstoće smicanja za pomeranje od $\Delta l = 14 \text{ mm}$. Dobijeni su sledeći rezultati:

- manje zbijeni uzorci ($\gamma < 12.4 \text{ kN/m}^3$) imaju nešto niže vrednosti mobilisane kohezije i ugla unutrašnjeg trenja, koje se kreću u intervalu $\phi'_{\text{mob}} = 30 - 39^\circ$ i $c'_{\text{mob}} = 9 - 22 \text{ kN/m}^2$

- za zbijene uzorke ($\gamma > 13 \text{ kN/m}^3$) vrednosti mobilisanih parametara čvrstoće smicanja su $\varphi'_{\text{mob}} = 35 - 43^\circ$ i $c'_{\text{mob}} = 15 - 33 \text{ kN/m}^2$
- za uzorke sa armirajućim česticama, orijentisanim upravno na ravan smicanja, dobijene su značajno veće vrednosti mobilisanih parametara čvrstoće smicanja i to $\varphi'_{\text{mob}} = 32 - 51^\circ$ i $c'_{\text{mob}} = 31 - 57 \text{ kN/m}^2$. Ovim je pokazano da je čvrstoća smicanja komunalnog otpada u znatnoj meri anizotropna
- mlađi otpad ima veću čvrstoću smicanja u odnosu na stariji
- za uzorke sa česticama orijentisanim paralelno ravni smicanja, kohezija je dostizala maksimalne vrednosti u zoni relativno malih horizontalnih pomeranja ($\Delta l = 2-5 \text{ mm}$), i u velikoj meri je zavisila od zbijenosti uzoraka
- pri horizontalnim pomeranjima $\Delta l > 12 \text{ mm}$, dobijene su slične vrednosti kohezije sa razlikama između $\Delta c'_{\text{mob}} = 2-5 \text{ kN/m}^2$, tako da zbijenost nije imala veći uticaj
- konstatovana je tendencija porasta ugla unutrašnjeg trenja sa porastom horizontalnih pomeranja, mada pri malim horizontalnim pomeranjima ($\Delta l = 3-4 \text{ mm}$) zapreminska težina nije imala veliki uticaj, jer su se razlike mobilisanih vrednosti kretale u intervalu $\Delta \varphi'_{\text{mob}} = 2^\circ$.
- konstatovano je relativno dobro slaganje pravolinijske Kulon-Mor-Tercagijeve i krivolinijskih jednačine čvrstoće smicanja u rasponu primenjenih normalnih napona
- sa povećanjem normalnih napona, izražena je tendencija većih odstupanja jer su smanjene čvrstoće smicanja dobijene preko krivolinijskih jednačina, u odnosu na pravolinijsku zavisnost
- korišćenjem hiperboličke funkcije, za definisanje čvrstoće smicanja, dobijene su vrednosti normalnog napona srednjeg sekantnog ugla koje su se u zavisnosti od zbijenosti otpada kretale u rasponu $p_N = 19.5 - 51.4 \text{ kPa}$, odnosno kod uzoraka sa armirajućim česticama orijentisanim upravno na ravan smicanja bilo je $p_N = 36.2 - 83.5 \text{ kPa}$.
- za opis hiperboličkog krivolinijskog oblika jednačine čvrstoće smicanja, prvi put je korišćena i kohezija

Da bi se izvršilo modeliranje i numerička simulacija dugotrajnog sleganja deponije, od najvećeg značaja su parametri deformabilnosti (stišljivosti). Kod komunalnog otpada glavnu komponentu sleganja predstavlja sekundarna kompresija, koja se odvija tokom čitavog trajanja deponije. Edometarskim ispitivanjima je delimično dobijen i uvid u vremenski razvoj deformacija, s obzirom da je trajanje pojedinih serija opita iznosila preko 5 meseci. Sleganje komunalnog otpada je analizirano kroz fazu primarne (u koju je uključena i inicijalna) i sekundarne kompresije (koja je posledica puzanja i biološke degradacije). Kada je u pitanju deformabilnost komunalnog otpada, zaključeno je sledeće:

- u ranom vremenskom periodu, dešava se rasipanje rezultata pri nižim stupnjevima opterećenja, a nakon toga dijagrami sleganja dobijaju ustaljeni, relativno blagi nagib, koji se kasnije značajnije povećava sa vremenom. Zbog krivljenja, savijanja, lomljenja i preorijentacije čestica otpada, dijagrami su okarakterisani kao "dijagrami sleganja" a ne konsolidacije, što je uobičajena terminologija kod tla
- određene su: minimalne i maksimalne vrednosti indeksa i modifikovanog indeksa sekundarne kompresije (C_{α} i C_{α}') i indeksa i modifikovanog indeksa primarne kompresije (C_c i C_c')
- za stariji otpad (Ada Huja, preko 40 god.), indeks sekundarne kompresije se kretao u intervalu $(C_{\alpha})_{\min} = 0.0032 - 0.025$, odnosno $(C_{\alpha})_{\max} = 0.011 - 0.093$.
- za otpad srednje starosti (Novi Sad, od 15 do 20 god.), indeks sekundarne kompresije se kretao u intervalu $(C_{\alpha})_{\min} = 0.0012 - 0.024$, odnosno $(C_{\alpha})_{\max} = 0.0235 - 0.107$
- vrednosti indeksa primarne kompresije nalaze se u intervalu $C_c = 0.267 - 0.369$ (za stariji otpad), odnosno, $C_c = 0.189 - 0.392$ (za otpad srednje starosti)

Verifikacija rezultata ispitivanja, posebno je obavljena za parametre čvrstoće smicanja a posebno za parametre stišljivosti, poređenjem sa rezultatima koji su prikazani u literaturi. Kada je u pitanju čvrstoća smicanja, poređenje je izvršeno sa prosečnim vrednostima za pravolinijsku (Kulon-Mor-Tercagijevu) i krivolinijske anvelope loma. Zaključeno je:

- da se čvrstoća smicanja manje zbijenog komunalnog otpada relativno dobro slaže sa literaturnim podacima
- da maksimalnu čvrstoća smicanja predodređuju uzorci otpada srednje starosti, čime je potvrđena opšta pretpostavka da sa degradacijom komunalnog otpada, opada i čvrstoća smicanja
- da u odnosu na anvelopu logaritamskog oblika, kada je u pitanju veći opseg normalnih napona, hiperbolički oblik ima znatno bolje slaganje sa pravolinijskom Kulon-Mor-Tercagijevom anvelopom
- s obzirom na dobro slaganje kako pravolinijske tako i krivolinijskih oblika čvrstoće smicanja, sa eksperimentalnim podacima pri normalnim efektivnim naponima $\sigma'_n < 150$ kPa, predloženo je njihovo korišćenje u analizama nosivosti i stabilnosti kosina komunalnih deponija u Srbiji, čija visina ne prelazi 10-15 m.
- za komunalne deponije većih visina, preporučena je krivolinijska anvelopa loma hiperboličkog oblika

Za verifikaciju parametara stišljivosti, iskorišćena je zavisnost indeksa primarne i sekundarne kompresije i početnog koeficijenta poroiznosti. Dobijeni su sledeći rezultati:

- za indeks primarne kompresije uspostavljena je zavisnost $C_c = 0.18 e_0$, koja približno odgovara donjoj granici $C_c = 0.15 e_0$, koju je predložio Sowersa (1973)
- za indeks sekundarne kompresije, po prvi put je posebno definisana zavisnost za maksimalni $(C_\alpha)_{\max} = 0.0388 e_0$, a posebno za minimalni indeks sekundarne kompresije $(C_\alpha)_{\min} = 0.0068 e_0$
- za komunalni otpad je po prvi put uspostavljena i zavisnost između modifikovanih indeksa primarne (C'_c) i sekundarne kompresije $(C'_\alpha)_{\max}$ i $(C'_\alpha)_{\min}$.
- konstatovana je tendencija porasta vrednosti indeksa sekundarne kompresije sa povećanjem vertikalnog efektivnog napona i na osnovu toga je uspostavljena analitička zavisnost u vidu pravougla hiperbole
- zaključeno je da se, kao posledica primene samo jedne vrednosti indeksa sekundarne kompresije, može da dobije nerealan proračun sleganja deponije

Analiza sleganja deponije predstavlja jedan od najvećih geotehničkih problema, kada je u pitanju istraživanje komunalnog otpada. Primenom različitih modela, koji se najčešće koriste za prognozu sleganja deponija komunalnog otpada (modeli zasnovani na tradicionalnoj teoriji konsolidacije tla, empirijski modeli, reološki modeli i modeli sleganja koji uključuju biodegradaciju otpada), izvršena je validacija parametara deformabilnosti za koje su uspostavljene određene konstitutivne zavisnosti. Validacija je obavljena na osnovu poređenja sračunatih sa geodetski izmerenim sleganjima repera. Za postavljanje repera su iskorišćeni temelji administrativno-tehničkog objekta izgrađenog na prostoru komunalne deponije u Novom Sadu, a merenja su vršena počevši od 2003. pa do 2010. godine. Došlo se do sledećih zaključaka:

- poređenjem merenih i sračunatih sleganja, primenom modela u kojima su figurisali parametri dobijeni laboratorijskim ispitivanjima komunalnog otpada, dobijena su zadovoljavajuća sleganja
- obavljena analiza sleganja korišćenjem modela u kojima figurišu parametri koji nisu obuhvaćeni ovim istraživanjima, već su njihove vrednosti usvojene na osnovu preporuka autora modela, ukazala je na značajne razlike sračunatih sleganja
- analize su pokazale da ne postoje opšte prihvaćeni parametri deformabilnosti komunalnog otpada koji se mogu uspešno iskoristiti u svim modelima za prognozu sleganja
- parametri deformabilnosti se razlikuju od lokacije do lokacije i za njihovo određivanje su neophodna dugoročna laboratorijska i terenska ispitivanja komunalnog otpada različitog sastava i starosti

U ovoj disertaciji je pokazano da bez obzira na izražene razlike u odnosu na prirodne sredine i izrazitu heterogenost komunalnog otpada, standardne metode ispitivanja, koje se koriste prilikom ispitivanja tla, mogu se primeniti i za ispitivanje komunalnog otpada. Ali, treba naglasiti da se komunalni otpad u laboratoriji još uvek ispituje u poremećenom stanju, jer pitanja koja se odnose na potrebnu veličinu uzorka, kao i način pripreme, još uvek nisu rešena. Analiza literaturnih podataka je pokazala da su istraživači koristili različite veličine uzoraka i različite sastave otpada za utvrđivanje fizičko-mehaničkih karakteristika. Uglavnom je vršena prethodna mehanička priprema

otpada u smislu usitnjavanja (mlevenje, sečenje ili jednostavno uklanjanje krupnijih komada otpada) ili su ispitivanjima obuhvaćene samo sitne frakcije komunalnog otpada. Moglo bi se reći da je priprema uzoraka vršena prema postojećim uređajima za ispitivanje, jer biranje uređaja prema veličinama komponenata otpada jednostavno nije moguće. Sve to ukazuje na činjenicu da još uvek ne postoji opšta saglasnost o dimenzijama uzoraka i sadržaju neophodnih vrsta materijala koji bi definisali reprezentativan uzorak za određeni komunalni otpad.

Pored toga, još uvek nije rešen način ubrzanja procesa bidegradacije i razgradnje pojedinih komponenti u otpadu, kako bi se simulirale promene određenih parametara tokom vremena. To znači da će se i u budućnosti, sve više, raspravljati o neophodnosti uvođenja specijalnih aparata ili značajnijoj doradi postojećih. U vezi sa tim, u svetu se sve više zagovara i mišljenje pojedinih autora da ponašanje komunalnog otpada treba razmatrati u okviru posebne tehničke discipline „mehanike otpada“ (*waste mechanics*), a pominje se još i termin „geotehnika otpada“. Formiranje ove nove geotehničke discipline, svakako će otvoriti još mnogo prostora za buduća geotehnička istraživanja komunalnog otpada.

LITERATURA

- ASTM. (2000). Standard test methods for moisture, ash, and organic matter of peat and other organic soils (ASTM: D 2974-87). *ASTM international publisher, Philadelphia*.
- Athanasopoulos, G., Grizi, A., Zekkos, D., Founta, P. & Zisimatou, E. (2008). Municipal solid waste as a reinforced soil: Investigation using synthetic waste, *Proc., Geo-Institute Geocongress 2008, The Challenge of Sustainability in the Geoenvironment, Geotechnical Special Publication, ASCE, No. 177*, 168-175.
- Atkinson, J.H. (1993). A note on modelling small strain stiffness in Cam clay, *Proceedings of the wroth memorial symposium, Predictive soil mechanics, Thomas Telford, London*. 111-120.
- Atkinson, J. H. (2000). Nonlinear soil stiffness in routine design. *Geotechnique, Vol.50*, 487-508.
- Augello, A.J., Matasović, N., Bray, J.D., Kavazanjian, Jr.E. & Seed, R.B. (1995). Evaluation of solid waste landfill performance during the Northridge earthquake, *Earthquake design and performance of solid waste landfills, ASCE Geotechnical Special Publication No. 54*, 17-50.
- Babu G.L.S., Reddy K.R. & Chouksey S.K. (2010). Constitutive model for municipal solid waste incorporating mechanical creep and biodegradation-induced compression, *Waste Management, 30*, 11-22.
- Bardet, J.P. (1997). *Experimental Soil Mechanics, Prentice Hall*, 582.
- Barlaz, M.A., Ham, R.K. & Schaefer, D.M. (1990). Methane production from municipal refuse: a review of enhancement techniques and microbial dynamics, *CRC Critical Reviews in Environmental Control, Vol. 19, No.3*, 557-584.
- Barriera, A.J., Overmann, L.K., Wong, D.K.H. & King, A.C. (2001). Settlement monitoring at shuen wan landfill, Hong Kong, during restoration and ongoing aftercare and afteruse, *Proceedings of the 8th International Waste Management and Landfill Symposium, Sardinia '01, S. Margherita di Pula, CISA, Italy*, 525-534.
- Beaven, R. P. & Powrie, W. (1995). Hydrogeological and geotechnical properties of refuse using a large scale compression cell, *Proceedings of the 5th International Landfill Symposium, Sardinia '95, S. Margherita di Pula, CISA, Italy*, 745-760
- Bjangard A. & Edgers L. (1990). Settlement of municipal solid waste landfills, *Proceedings, 13 Annual Madison Waste Conference*, 192-205.
- Blight, G.E., Ball, J.M. & Blight, J.J. (1992). Moisture and suction in sanitary landfills in semiarid areas, *Journal of Environmental Engineering, 118(6)*, 865-877.
- Bouazza, A., Van Impe, W.F. & Heageman W. (1996). Quality control of dynamic compaction in municipal solid waste fills. *Proc. 2nd International Congress on Environmental Geotechnics, Osaka, Vol. 2*, 635-640.

- Bowders, J., Bouazza, M., Loehr, E. & Russell, M. (2000). Settlement of municipal solid waste landfills, *Proceedings of the 4th Kansai International Geotechnical Forum, Creation of a new-GeoEnvironment Kyoto, Japan*, 101-106.
- Bray, J.D., Zekkos, D., Kavazanjian, E.Jr., Athanasopoulos, G.A. & Michael, F.R. (2009). Shear strength of municipal solid waste, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 135, No. 6*, 709-722.
- Britto, A.M. & Gunn, M.J. (1987). Critical State Soil Mechanics via Finite Elements, *Ellis Horwood Ltd.*, 488.
- Caicedo, B., Giraldo, E., Yamin, L. & Soler, N. (2002a). The landslide of Dona Juana landfill in Bogota. A case study, *Proceeding of the Fourth International Congress on Environmental Geotechnics, Rio de Janeiro, Brazil, Vol. 1*, 171-175.
- Caicedo, B., Yamin, L., Giraldo, E. & Coronado, O. (2002b). Geomechanical properties of municipal solid waste in Dona Juana sanitary landfill, *Proceeding of the Fourth International Congress on Environmental Geotechnics, Brazil, Vol. 1*, 177-182.
- Carvalho, M.F. & Vilar, O.M. (1999). In situ tests in urban waste sanitary landfill. *Environmental Geotechnics, Seco e Pinto, ed., Balkema, Rotterdam*, 121-126.
- Charles, J. A. & Burland, J. B. (1982). Geotechnical considerations in the design of foundations for buildings on deep deposits of waste material, *The Structural Engineer, 60A(No. 1)*, 8-14.
- Chen, C.F. (1985). Mechanics of Geomaterials, *In: Z. Bazant, editor. John Wiley & Sons Ltd.* 65-86.
- Coduto, D. & Huitric, R. (1990). Monitoring landfill movements using precise instruments, *Geotechnics of Waste Fills - Theory and Practice, ASTM STP 1070*, 358-370.
- Coumoulos, D.G., Koryalos, T.P., Metaxas, I.L., & Gioka, D.A. (1995). Geotechnical Investigation at the Main Landfill of Athens, *Proceedings of the 5th International Landfill Symposium, Sardinia '95, S. Margherita di Pula, CISA, Italy*, 885-895.
- Coumoulos, D. G. & Koryalos, T. P. (1997). Prediction of attenuation of landfill settlement rates with time, *Proc., 14th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 3, ISSMFE, Hamburg, Germany*, 1807-1811.
- Coumoulos, D. G. & T. P. Koryalos, 1999. Prediction of long-term settlement behaviour of landfill covers after closure, *Proceedings of the 7th International Landfill Symposium, Sardinia '99, S. Margherita di Pula, CISA, Italy*, 505-512.
- Cowland, J.W., Tang, K.Y. & Gabay, J. (1993). Density and strength of Hong Kong refuse. *Proceedings of the 4th International Landfill Symposium, Sardinia '93, S. Margherita di Pula, CISA, Italy*, 1433-1446.
- Ćorić, S. (1987). Naponsko-deformacijska analiza tla primenom konačnih elemenata, *Univerzitet u Beogradu Rudarsko-geološki fakultet, Institut za puteve*, 155.
- Ćorić, S. (2008). Geostatički proračuni, *Univerzitet u Beogradu Rudarsko-geološki fakultet, Časopis Izgradnja*, 460.

- De Haan, E.J. (1997). An overview of the mechanical behavior of peats and organic soils and some appropriate construction techniques, *Proceedings of Conference on Recent Advances in Soft Soil Engineering, Huat & Bahia, Sarawak*, 17-20.
- Del Greco, O. & Oggeri, C. (1997). Shear strength characteristics at geosynthetic interfaces, *Proceedings of the 6th International Landfill Symposium, Sardinia '97, S. Margherita di Pula, CISA, Italy*, 443-451.
- De Poli, F., Fabrizi, F. & Rinaldi, L. (1999). Modelling landfill settlement for the design of biogas plant and top cover." *Proceedings of the 7th International Landfill Symposium, Sardinia '99, S. Margherita di Pula, CISA, Italy*, 513-519.
- Departman za inženjerstvo zaštite životne sredine. (2009). Projekat: Utvrđivanje sastava otpada i procene količine u cilju definisanja strategije upravljanja sekundarnim sirovinama u sklopu održivog razvoja Republike Srbije, *Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu*
- Desai, C.S. & Siriwardane, H.J. (1984). Constitutive Laws for Engineering Materials with Emphasis on Geologic Materials, *Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA*, 468.
- Dixon, N. & Jones, R.D.V. (2005). Engineering properties of municipal solid waste, *Geotextiles and Geomembranes, Vol. 23*, 205 – 233.
- Drucker, D.C. & Prager, W. (1952). Soil mechanics and plastic analysis or limit design, *Quarterly of Applied Mathematics. Vol. 10, No. 2*, 157-165.
- Duncan, J.M. & Chang, C.Y. (1970). Nonlinear analysis of stress and strain in soils, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 96*, 1629-1653.
- Duraisamy, Y., Huat, B.B.K. & Aziz, A.A. (2007). Engineering Properties and Compressibility Behavior of Tropical Peat Soil, *American Journal of Applied Sciences, 4(10)*, 768-773.
- Edinçliler, A., Benson, C.H. & Edil, T.B. (1996). Shear strength of municipal solid waste, Interim Report - year 1, *Environmental Geotechnics Report 96-2, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Wisconsin - Madison*, 65.
- Edgers, L., Noble, J. & Williams, E. (1992). A biologic model for long term settlement in landfills, *Proceedings of the Mediterranean Conference on Environmental Geotechnology, Cesme, Turkey: A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands*, 177-184.
- Edil, T.B., Ranguette, V.J. & Wuellner, W.W. (1990). Settlement of municipal waste, *Geotechnics of Waste Fills - Theory and Practise, ASTM STP 1070, Landva, A.O. and Knowles, G.D., eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA*, 225-239
- Eid, H.T., Stark, T.D., Evans, W.D. & Sherry, P.E. (2000). Municipal solid waste slope failure, I: Waste and foundation properties, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 126(5)*, 397-407.
- El-Fadel, M. & Al-Rashed, H. (1998). Settlement in municipal solid waste landfills, field scale experiments, *The Journal of Solid Waste Technology and Management, Vol. 25(2)*, 89-98.

- El-Fadel, M., Sadek, S. & Khoury, R. (1999). Simulation of solid waste settlement in laboratory columns, *Proceedings of the 7th International Landfill Symposium, Sardinia '99, S. Margherita di Pula, CISA, Italy*, 521-528.
- El-Fadel, M., Shazbak, S., Saliby, E. & Leckie, J. (1999). Comparative assessment of settlement models for municipal solid waste landfill applications, *Waste Management Res.*, Vol. 17(5), 347–368.
- Environmental Protection Agency [EPA]. (2000). Landfill Manuals - Landfill Site Design, *Published by the Environmental Protection Agency, Ireland*, 132.
- Eringen, C. (1962). Non-linear theory of continuous media, McGraw Hill, 477.
- European Commission [EC], (2004). S.W.A. – Tool, Development of a Methodological Tool to Enhance the Precision & Comparability of Solid Waste Analysis Data, *5th Framework Program, EU Austria*, 57.
- Fahey, M. & Carter, J.P. (1993). A finite element study of the pressuremeter test in sand using a non-linear elastic plastic soil model, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 30, 348-362.
- Fassett, J.B., Leonards, G.A. & Repetto, P.C. (1994). Geotechnical Properties of Municipal Solid Waste and Their Use in Landfill Design, *WasteTech '94 - Landfill Technology Conference, Charleston, South Carolina, USA*, 1-32.
- Gabr, M.A. & Valero, S.N. (1995). Geotechnical properties of municipal solid waste, *Geotechnical Testing Journal, ASTM*, Vol. 18, (No.2), 241-254.
- Gasparini, P.A., Saetti, G.F. & Marastoni, M. (1995). Experimental Research on MSW Compaction Degree and its Change with Time, *Proceedings of the 5th International Landfill Symposium, Sardinia '95, S. Margherita di Pula, CISA, Italy*, 833-842.
- Geotehnički izveštaj za potrebe izgradnje hale za separaciju i baliranje otpada na lokaciji gradske deponije u Novom Sadu, (2002). *Zavod za geotehniku, Subotica*
- Ghaly, A.M. (2000). Discussions: Large Shear Tests on Compacted Bales of Municipal Solid Waste, *Soils and Foundation; Japanese Geotechnical Society*, 40(No. 3), 127.
- Gibson, R.E. & Lo, K.Y. (1961). A theory of soils exhibiting secondary compression, *Acta Polytechnica Scandinavica C-10*, 1–15.
- Gilbert, R.B., Wright, S.G. & Liedtke, E. (1998). Uncertainty in back analysis of slopes: Kettleman Hills case history, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 124(12), 1167-1176.
- Gomes, C., Ernesto, A., Lopes, M.L. & Moura, C. (2002). Sanitary landfill of Santo Tirso municipal waste physical, chemical and mechanical properties, *Proceedings of the Fourth International Congress on Environmental Geotechnics, Brazil, Vol. 1*, 255-261.
- Gomes, C., Lopes, M.L. & Lopes, M.G. (2005). A Study of Municipal Solid Waste properties of a Portuguese landfill, *International Workshop "Hydro-Physico-Mechanics of Landfills" LIRIGM, Grenoble 1 University, France*.
- Gotteland, P., Lemarechal, D. & Richard, P. (1995). Analysis and monitoring of the stability of a domestic waste landfill, *Proceedings of the 5th International Landfill Symposium, Sardinia '95, S. Margherita di Pula, CISA, Italy*, 777-787.

- Gotteland, P., Gourc, J.P., Aboura A. & Thomas, S. (2000). On site determination of geomechanical characteristics of waste, *International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, Melbourne, Australia, ICMS, (CD)*.
- Gourc, J.P. & Staub, M.J. (2010). The Biohydro-mechanical Behaviour of Municipal Solid Waste and the Improvement of Landfill Environmental Sustainability, *Proceedings of the 6th International Congress on Environmental Geotechnics, New Delhi, Vol. 1*, 24–39.
- Green, D.C. & Jamnejad, G. (1997). Settlement characteristics of domestic waste, *Conference on Contaminated Ground, Cardiff, Wales, British Geotechnical Society*, 319-324.
- Grisolia, M., Napoleoni, Q. & Tangredi, G. (1991). Geotechnical behavior of sanitary landfills based on laboratory and in-situ test. *In: Proceedings of the Seventh International Conference on Solid Waste Management and Technology, Philadelphia, PA*.
- Grisolia, M. & Napoleoni, Q. (1995a). Deformability of waste and settlements of sanitary landfills, *Proc. World Congress on Waste Management ISWA '95, Wien*.
- Grisolia, M., Napoleoni, Q. & Tancredi, G. (1995b). Contribution to a Technical Classification of Municipal Solid Waste, *Proceedings of the 5th International Landfill Symposium, Sardinia '95, S. Margherita di Pula, CISA, Italy*, 703-710.
- Grisolia, M., Napoleoni, Q. & Tangredi, G. (1995c), The use of triaxial tests for the mechanical characterization of municipal solid waste, *Proceedings of the 5th International Landfill Symposium, Sardinia '95, S. Margherita di Pula, CISA, Italy*, 761-767.
- Grisolia, M. & Napoleoni, X. (1996). Geotechnical characterization of municipal solid waste: Choise of design parameters, *Proc., 2nd Int. Cong. On Environmental Geotechnics, Osaka, Japan, Balkema, Rotterdam, The Netherlands*, 2, 641-646.
- Head, K.H. (1982). Manual of soil laboratory testing, Vol. 2, Permeability, Qick Shear Strength and Compressibility Tests. *Pentech Press Ltd.*, 747.
- Hettiarachchi, C. H., Meegoda, J. & Hettiarachchi, P. (2009). Effects of gas and moisture on modeling of bioreactor landfill settlement, *Waste Management, Vol. 29(3)*, 1018–1025.
- Hill, R. (1950). The Mathematical Theory of Plasticity, *Oxford Classic Texts in the Physical Sciences*.
- Holtz, R. D. & Kovacs, W. D. (1981). Introduction to geotechnical engineering, *Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey*, 309-390.
- Hossain, M.S. (2002). Mechanics of compressibility and strength of solid waste in bioreactor landfills, *PhD Dissertation, Department of Civil Engineering. North Carolina State University at Raleigh, NC*. 184.
- Hossain S.M. & Gabr M.A. (2005). Prediction of municipal solid waste landfill settlement with leachate recirculation, *Proc. Geo. Frontier, Austin Tex., Vol. 168. ASCE*, 50.

- Houston, W.N., Houston, S.L., Liu, J.W., Elsayed, A. & Sanders, C.O. (1995). In situ testing methods for dynamic properties of MSW landfills, *In: Proceedings of specialty conference on Earthquake Design and performance of solid waste landfills, Geotechnical Special Publication, ASCE, No.54*, 73-82.
- Howland, J.D. & Landva, A.O. (1992). Stability analysis of a municipal solid waste landfill, Stability and Performance of Slopes and Embankments, II: *Proceedings of a Specialty Conference, Berkeley, California, USA, American Society of Civil Engineers*. 2 1216-1231.
- Huat, B.K. (2004). Organic and Peat Soils Engineering, *Serdang: University Putra Malaysia Press*, 146.
- Huitric, R. (1981), Sanitary Landfill Settlement Rates, *Los Angeles County Sanitation District*.
- Hunte, C.A., Hettiarachi, J.P.A., Hettiarachi, C.H. & Meegoda, J.N. (2011). Determination of waste properties from settlement behaviour of a full scale waste cell operated as a landfill bioreactor, *Geotechnical Special Publications, Geo-Frontiers 2011, Advanced in Geotechnical Engineering, ASCE*. 1404-1413.
- Jessberger, H.L. & Kockel, R. (1993). Determination and assessment of the mechanical properties of waste materials, *Proceedings of the 4th International Landfill Symposium, Sardinia '93, S. Margherita di Pula, CISA, Italy*, 1383-1392.
- Jessberger, H.L., Syllwasschy, O. & Kockel, R. (1995). Investigation of waste body behaviour and waste structure interaction, *Proceedings of the 5th International Landfill Symposium, Sardinia '95, S. Margherita di Pula, CISA, Italy*, 731-743.
- Jessberger, H. L. (2001). Geotechnical parameters of municipal solid waste, *Grundbau und Bodenmechanik; Ruhr-Universität Bochum*; <http://www.gub.ruhr-unibochum.de/tc5/SC303.htm>.
- Jones, R., Taylor, D. & Dixon, N. (1997). Shear strength of waste and its use in landfill stability analyses, *British Geoenvironmental Engineering Conference, Cardiff, UK, British Geotechnical Society*, 343-350.
- Kaniraj, S.R. & Joseph, R.R. (1996). Geotechnical behavior of organic soils of North Sarawak, *4th International Conference on Soft Soil Engineering, Vancouver Canada, October 4-6, 2006*.
- Kavazanjian, E.J., Matasovic, N. & Bachus, R.C. (1999). Large-Diameter Static and Cyclic Laboratory Testing of Municipal Solid Waste, *Proceedings of the 7th International Landfill Symposium, Sardinia '99, S. Margherita di Pula, CISA, Italy*, 437-444.
- Kavazanjian, E.J. (2001). Mechanical Properties of MSW, *Proceedings of the 8th International Landfill Symposium, Sardinia '01, S. Margherita di Pula, CISA, Italy*, 415-424.
- Kavazanjian, E.Jr. (2006). Waste mechanics: Recent findings and unanswered questions, *Geotechnical Special Publications, ASCE, 148*, 34-54.
- Kavazanjian, E.Jr. (2007). 10th Annual Sowers Lecture and Symposium State of the Practice Lecture Geotechnics of Solid Waste Landfills, <http://www.docstoc.com/docs>

- Kockel, R. & Jessberger, H.L. (1995). Stability evaluation of municipal solid waste slope, *Proceedings of the 11th ECSMFEE (European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering), Copenhagen, Bulletin 11, Vol. 2, 267-272.*
- Kockel, R., König, D. & Syllwasschy, O. (1997). Three basic topics on waste mechanics, *Proc., 14th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 3, ISSMFE, Hamburg, Germany, 1831-1837.*
- Koerner, R.M. & Soong, T.Z. (2000). Stability assessment of ten large landfill failures, *Advances in transportation and geoenvironmental systems using geosynthetics, Proceedings of sessions of GeoDenver 2000, ASCE Geotechnical Special Publication No. 103, 1-38.*
- Koerner, R.M. & Soong, T.Y. (2000). Leachate in landfills: the stability issues, *Geotextiles and Geomembranes, No 18, 293-309.*
- Kondner, R.L. (1963). Hyperbolic stress-strain response: cohesive soils, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol 89, No. SMI, 115-143.*
- Kondner, R.L. & Zelasko, J.S. (1963). A hyperbolic stress-strain formulation for sands, *2nd Pan-American Conf., SMFE, Brasil.*
- Kölsch, F. (1996). Der Einfluss der Faserbestandteile auf die Scherfestigkeit von Siedlungsabfall (The Influence of Fibrous Constituents on Shear Strength of Municipal Solid Waste), *Ph.D. Thesis, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Germany (in German).*
- Kölsch, F. & Ziehmann, G. (2004). Landfill stability - risks and challenges, *Waste Management World, 55-60.*
- König, D. & Jessberger, H.L. (1997). Waste Mechanics, *Report of the ISSMGE Technical Committee TC5 on Environmental Geotechnics, Bochum, Germany, 35-76.*
- Landva, A.O., Weisner, W.R. & Burwash, W.J. (1984). Geotechnical engineering and refuse landfills, *6th International Conference on Waste Management, Canada, 57.*
- Landva, A.O. & Clark, J.I. (1986). Geotechnical testing of wastefill, *Proceedings, 39th Canadian Geotechnical Conference Ottawa, Ontario, 371-385.*
- Landva, A.O. & Clark, J.I. (1990). Geotechnics of Waste Fill - Theory and Practice, *Geotechnics of Waste Fill – Theory and Practice, ASTM (American Society for Testing and Materials) STP 1070, 86-103.*
- Landva, A.O., Valsangkar, A.J. & Pelkey, S.G. (2000). Lateral earth pressure at rest and compressibility of municipal solid waste, *Canadian Geotechnical Journal, 37(No. 6), 1157-1165.*
- Langer, U. (2005). Shear and Compression Behaviour of Undegraded Municipal Solid Waste, *Doctoral Thesis at Loughborough University, 292.*
- Langer, U., Dixon, N., Gotteland, P. & Gourc, J.P. (2005). Waste mechanics: investigations using synthetic municipal solid waste, *Proceedings of the 10th International Waste Management and Landfill Symposium, Sardinia '05, S. Margherita di Pula, CISA, Italy, (on CD).*
- Liu, M.D. & Carter, J.P. (2002). A structured Cam Clay model, *Canadian Geotechnical Journal No.39, 1313-1332.*

- Ling, H. I., Leshchinsky, D., Mohri, Z. & Kawabata, T. (1998). Estimation of municipal solid waste landfill settlement, *Journal Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 124, 21-28.
- Machado, S.L., Carvalho, M.F. & Vilar, O.M. (2002). Constitutive Model for Municipal Solid Waste, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 128(11), 940-951.
- Machado, S.L., Vilar, O.M. & Carvalho, M.F. (2008). Constitutive model for long – term municipal solid waste mechanical behavior, *Computers and Geotechnics*, 35, 775- 790.
- Mahler, C.F. & Iturri, E.A.Z. (1998). The finite element method applied to the study of solid waste landfills. *Proceedings of the Third International Congress on Environmental Geotechnics, Balkema, A.A., Lisbon, Portugal, vol. 1*, 89–94.
- Mahler, C. F., Burin, E. & Oliveira, F.J.P. (1998). Reflections on the stability of a municipal sanitary landfill, *Proceedings of the third international congress on Environmental Geotechnics, Seco e Pinto, editor, Lisbon, Portugal, Balkema*, 83-88.
- Maksimović, M. (1979), Limit equilibrium for nonlinear failure envelope, *Third International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Aachen*, 769-777.
- Maksimović, M. (1989). Nonlinear failure envelope for soils, *Journal of Geotechnical Engineering, American Society of Civil Eng., Vol. 115 (4)*, 581-586.
- Maksimović, M. (1993). Nonlinear failure envelope for the limit state design, *Limit state design in geotechnical engineering, International symposium, Danish Geotechnical Society, Bul. 10, Copenhagen*, 131-140.
- Maksimović, M. i sar. (2005). Tehnički izveštaj o detaljnim geotehničkim istražnim radovima i laboratorijskim ispitivanjima sa uslovima temeljenja za tržišni centar na Adi Huji u Beogradu, *Građevinski fakultet, Beograd*
- Maksimović, M. (2008). Mehanika tla, četvrto izdanje, *AGM knjiga*, 517.
- Manassero, M., Van Impe, W.F. & Bouazza, A. (1997). Waste Disposal and containment, *Proceedings, 2nd International Congress on Environmental Geotechnics, Osaka, Japan, Balkema, Rotterdam, Vol.2*, 1425-1474.
- Marques, A.C.M. (2001). Compaction and compressibility of municipal solid waste *Ph.D Thesis, Sao Paulo University, Sao Carlos, Brazil*.
- Marques A.C.M., Filz G.M. & Vilar O.M. (2003). Composite compressibility model for municipal solid waste, *Journal of geotechnical and Geoenvironment Engineering, ASCE, Vol.129, No.4*, 372-378
- Mazzucato, N., Simonini, P. & Colombo, S. (1999). Analysis of block slide in a municipal solid waste landfill, *Proceedings of the 7th International Waste Management and Landfill Symposium, Sardinia '99, S. Margherita di Pula, CISA, Italy*, 537-544.
- McDougall, J. R. & Pyrah, I. C. (2001). Settlement in landfilled waste: extending the geotechnical approach, *Proceedings of the 8th International Waste Management and Landfill Symposium, Sardinia '01, S. Margherita di Pula, CISA, Italy*, 481-490.

- McDougall, J. R. & Pyrah, I. C. (2004). Phase relations for decomposable soils. *Geotechnique*, 54(7), 487-493.
- McDougall, J. (2007). A hydro-bio-mechanical model for settlement and other behavior in landfilled waste. *Computers and Geotechnics* 34, 229–246.
- McDougall, J.R. (2008). Geomechanics and long-term landfill settlement, *Geotechnical Special Publication, ASCE*, 177, 192-199.
- Mitchell, J.K. (1976). Fundamentals of Soils Behaviour, *John Wiley & Sons*, 450.
- Morris, D.V. & Wood, C.E. (1990). Settlement and Engineering Consideration in Landfill Final Cover Design, *Geotechnics of Waste Fills - Theory and Practice: ASTM- American Society for Testing and Materials, STP 1070*, 319-330.
- Oettle, N. K., Hanson, J. L. & Yesiller, N. (2008), Experimental determination of cover surface temperature functions at MSW landfills, *Proceedings, 2008 Global Waste Management Symposium*, Penton Media, 1-7.
- Oweis, I.S. & Khera, R.P. (1990). Geotechnology of waste management, *Butterworth-Heinemann, 2nd edition*. 472.
- Oweiss, I. S. (1993). Stability of landfills, *Chapter 11 of Geotechnical Practice for Waste Disposal*, edited by D. E. Daniel, *Chapman & Hall*, 244-268.
- Oweis, I.S. & Khera, R.P. (1998). Geotechnology of waste management, 2nd *PWS Publishing company, Boston*, 472.
- Papić, J. (2007a). Geotehnički aspekti deponija, *Magistarska teza, Građevinskifakultet Beograd*, 155.
- Papić, J., Jovanovski, M., Vitanov, V & Josifovski, J. (2007b). Laboratorijska ispitivanja i numeričke analize za komunalnu deponiju, *Građevinski materijali i konstrukcije, Vol. 50, br. 3*, 21-30.
- Park, H.I., & Lee, S.R. (1997). Long-term settlement behavior of landfills with refuse decomposition, *Journal of Resource Management and Technology* 24 (4), 159–165.
- Park, H.I., Lee, S.R. & Young Do, N. (2002a). Evaluation of decomposition effect on long-term settlement prediction for fresh municipal solid waste landfills, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 128 (2)*, 107–118.
- Park, H.I. & Lee, S.R. (2002b). Long-term settlement behavior of MSW landfills with various fill ages, *Waste Management Research, Vol. 20(3)*, 259–268.
- Park, H.I., Parl, B., Lee, S.R. & Hwang D. (2007). Parameter evaluation and performance comparison of MSW settlement prediction models in various landfill types, *Journal of Environmental Engineering, Vol. 133 (1)*, 64–72.
- Pelkey, S.G., Valsangkar, A.J. & Landva, A.O. (2001). Shear displacement dependent strength of municipal solid waste and its major constituents, *Geotechnical Testing Journal, ASTM - American Society for Testing and Materials, No.24(4)*, 381-390.
- Powrie, W. & Beaven, R.P. (1999). Hydraulic Properties of Household Waste and Implication for Landfills, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers; Geotechnical Engineering, 137*, 235-247.
- Qian, X., Koerner, R.M. & Gray, D.H. (2002). Geotechnical aspects of landfill design and construction, *Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey*, 717.

- Rakić, D. & Dragaš, J. (2002). Primena geosintetičkih materijala pri skladištenju komunalnog otpada, *I stručno savetovanje - Inženjerski rizik i hazard u urbanom sistemu Beograda, Udruženje inženjera Beograda – UIB, Beograd*, 217-225.
- Rakić, D. & Šušić, N. (2005). Uticaj geotehničkih činilaca na stabilnost i sleganje deponija komunalnog otpada, *Međunarodna konferencija – Otpadne vode, komunalni čvrsti otpad i opasan otpad, Udruženje za tehnologiju vode i sanitarno inženjerstvo, Zlatibor*, B 175-179.
- Rakić, D., Lazić, M. & Đoković, K. (2005). Geotehnička istraživanja različitih geoloških sredina za potrebe izgradnje i sanacije deponija komunalnog otpada, *Međunarodna konferencija – Otpadne vode, komunalni čvrsti otpad i opasan otpad, Udruženje za tehnologiju vode i sanitarno inženjerstvo, Zlatibor*, B 180-184.
- Rakić, D., Lazić, M. & Stojadinović, D. (2006). Geotechnical investigations of different geological landscapes for the purposes of remediation of municipal landfill sites, *IAEG 2006, Nottingham*, p.n. 701, DVD.
- Rakić, D., Ćorić, S & Čaki, L. (2009). Fizičko-mehaničke karakteristike komunalnog otpada, *Reciklaža i održivi razvoj, Broj 1. Vol. 2.*, 46-52.
- Rakić, D., Čaki, L., Ćorić, S. & Cvetković, V. (2010). Određivanje parametara stišljivosti starog komunalnog otpada, *Međunarodna konferencija – Otpadne vode, komunalni čvrsti otpad i opasan otpad, Udruženje za tehnologiju vode i sanitarno inženjerstvo, Subotica*, B 203-207.
- Rakić, D., Čaki, L., Tomašević, B & Novaković, D. (2011a). Analiza sleganja objekta na komunalnoj deponiji”, *Međunarodna konferencija – Otpadne vode, komunalni čvrsti otpad i opasan otpad, Udruženje za tehnologiju vode i sanitarno inženjerstvo, Niška Banja*, B 310-314.
- Rakić, D., Čaki, L. & Ljubojev, M. (2011b). Deformable characteristics of the old municipal solid waste sites with Ada Huja, Belgrade – Serbia, *TTEM- Technics Technologies Education Management, Volume 6, No 1*, 52-60.
- Rakić, D., Čaki, L. & Ćorić, S. (2011c). Čvrstoća smicanja komunalnog otpada, *Zbornik radova četvrtog naučno-stručnog savetovanja - Geotehnički aspekti građevinarstva, Zlatibor*, 457-466.
- Rakić, D. (2011). Deponija komunalnog otpada – geotehnička građevina, *6^{ti} Simpozijum Reciklažne tehnologije i održivi razvoj – SRTOR, Soko Banja*, 530-537.
- Rakić, D., Čaki, L., Ćorić, S., Cvetković, V. (2012a), Analiza uticajnih faktora na čvrstoću smicanja komunalnog otpada”, *Međunarodna konferencija – Otpadne vode, komunalni čvrsti otpad i opasan otpad, Udruženje za tehnologiju vode i sanitarno inženjerstvo, Čačak*, B 227-231.
- Rakić, D., Čaki, L. & Basarić, I. (2012b). Geotehnički aspekti projektovanja deponija komunalnog otpada, *Međunarodna konferencija – Otpadne vode, komunalni čvrsti otpad i opasan otpad, Udruženje za tehnologiju vode i sanitarno inženjerstvo, Čačak*, B 222-226.

- Rakić, D., Čaki, L. & Ćorić, S. (2012c). Prilog geotehničkoj klasifikaciji komunalnog otpada, *XIV Simpozijum iz inženjerske geologije i geotehnike, Društvo geoloških inženjera i tehničara Srbije i Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet u Beogradu, Beograd*, 257-267.
- Rao, S.K., Moulton, L.K. & Seals, R.K. (1977). Settlement of refuse landfills, *Geotechnical practice for disposal of solid waste materials, ASCE, Reston, Va.*, 574-598.
- Reddy, K.R., Kosgi, S. & Motan, E.S. (1996). Interface shear behavior of landfill composite liner systems: a finite element analysis, *Geosynthetics, International 3(2)*, 247-275.
- Reddy, K.R., Gangathulasi, J., Hettiarachchi, H. & Bogner, J. (2008). Geotechnical properties of Municipal Solid Waste subjected to leachate recirculation, *Geotechnical Special Publication, ASCE, 177*, 144-151.
- Repetto, P.C. (1995). Geo-Environment, Section III Geotechnical Engineering, *The Civil Engineering Handbook, CRC Press, Inc., 2000 Corporate Blvd., N.W., Boca raton, Fl 33431*, 883-902.
- Republika Srbija. Ministarstvo za zaštitu prirodnih bogatstava i životne sredine. (2003). Nacionalna strategija upravljanja otpadom sa programom približavanja EU
- Reuter, E. & Nolte, H.C. (1995). Conception of a stability analysis for large landfills: case study in Hannover, *Proceedings of the 5th International Waste Management and Landfill Symposium, Sardinia '95, S. Margherita di Pula, CISA, Italy*, 801-812.
- Richardson, G. & Reynolds, D. (1991). Geosynthetic considerations in a landfill on compressible clays, *Proceedings of Geosynthetics '91, Vol.2, Industrial Fabrics Association International, St. Paul, MN*.
- Richard, P., Gotteland, P., Lemarechal, D. & Gachet, C. (2001). Evaluation of stability and settlements for the design of a municipal solid waste landfill, *Proceedings of the 8th International Waste Management and Landfill Symposium, Sardinia '01, S. Margherita di Pula, CISA, Italy*, 491-498.
- Roje-Bonacci, T., Lasić, A. & Talić, Z. (2005). Modeli tla ili konstitutivne jednačbe, *skripta*, 51.
- Scheelhaase, T., Bidlingmaier, W., Klümper, A., Maile, A. & Rechberger, M. (2001). Geotechnical behaviour of mechanically-biologically pretreated residual waste, *Proceedings of the 8th International Waste Management and Landfill Symposium, Sardinia '01, S. Margherita di Pula, CISA, Italy*, 445-453.
- Schroeder, P.R., Dozier, T.S., Zappi, P.A., McEnroe, B.M., Sjoström, J.W. & Peyton, R.L. (1994). The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model: Engineering documentation for version 3, *US Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH*, 105.
- Sharma, H.D., Dukes, M.T. & Olsen, D.M. (1990). Geotechniques of waste fills – theory and practice, *ASTM, STP 1070, A. Landva and G.D. Knowles, Eds., Philadelphia, P.A.*, 57-70.

- Sharma, H.D., Fowler, W.L. & Cochrane, D.A. (1999). Evaluation and remediation of ground cracking associated with refuse settlements, *Proceedings of the 7th International Waste Management and Landfill Symposium, Sardinia '99, S. Margherita di Pula, CISA, Italy*, 495-503.
- Sharma, H.D. & Anirban De. (2007). Municipal solid waste landfill settlement: postclosure perspectives, *Journal of Geotechnical and Geoinveronmental Engineering, Vol. 133, No. 6*, 619-629.
- Siegel, R.A., Robertson, R.J. & Anderson, D.G. (1990). Slope stability investigations at a landfill in southern California, *American Society for Testing and Materials, ASTM. Special Technical Publication, Philadelphia, USA, 1070*, 259-284.
- Singh, S. & Murphy, B.J. (1990). Evaluation of the stability of sanitary landfills, *Geotechnics of Waste Fill - Theory and Practice. Landva, A.O. and Knowles, G.D. Philadelphia, USA, ASTM - American Society for Testing and Materials, STP 1070*, 240- 258.
- Singh, A., Hamme, J.D. & Ward, O.P. (2007). Surfactants in microbiology and biotechnology. *Part 2. Application aspects. Biotechnol. Adv.*, 25, 99-121.
- Singh, M.K. (2008). Characterization of stress-deformation behaviour of municipal solid waste, *Ph.D. thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada*, 292.
- Skempton, A.W. & Petley, J. (1970). Ignition loss and other properties of peats and clays from Avonmouth, King's Lynn, and Cranberry Moss, *Geotechnique, 20 (4)*, 343-356.
- Službeni Glasnik RS. (1992). Pravilnikom o kriterijumima za određivanje lokacije i uređenje deponija otpadnih materijala, *Br. 54*.
- Službeni Glasnik RS. (2008). Nacionalna strategija održivog razvoja Republike Srbije. *Br. 57*.
- Službeni Glasnik RS. (2010). Nacionalni program zaštite životne sredine. *Br. 12*.
- Službeni Glasnik RS. (2010). Strategiji upravljanja otpadom za period 2010-2019. godine. *Br. 29*.
- Službeni Glasnik RS. (2010). Zakon o upravljanju otpadom, *Br. 88*.
- Službeni Glasnik RS. (2009/11). Zakon o zaštiti životne sredine, *Br. 36/43*
- Sowers, G.F. (1973). Settlement of waste disposal fills, *Proceedings of the eighth international conference on soil mechanics and foundation engineering, Moscow, Vol. 2*, 207-210.
- Soler, N.D., Maher, A., Chae, Z.S. & Hamidi. (1995). Acon-ceptual model for transient settlement in waste fill., *Procidings UNSAT'95, Paris Vol. 1*, 411-416.
- Solid Waste Menagement [SWM]. (2005). United Nations Environment Programme – UNEP.
- Stark, T.D., Huvaj-Sariham, N. & Li, G. (2009). Shear strength of municipal solid waste for stability analyses, *Environmental Geology, 57*, 1911-1923.
- Stoltz, G. & Gourc, J.P. (2008). Variation of fluid conductivity with settlement of domestic waste, *Geotechnical Special Publication, ASCE, No. 177*, 272-279.

- Tchobanoglous, G., Theisen, H. & Vigil, S. (1993). Integrated Solid Waste Management, *Engineering Principles and Management Issues*, Irwin/McGraw-Hill, Boston, MA. 671-715.
- Tehnički izveštaj (2004). Kontrola sleganja repera, "Geoinženjering", biro za inženjersku geodeziju, Novi Sad,
- Tehnički izveštaj (2007). Kontrola sleganja repera, geodetski biro "Geosoft", Novi Sad,
- Tehnički izveštaj (2010). Kontrola sleganja repera, geodetski biro "Geometar", Novi Sad,
- Thomas, S., Aboura, A.A., Gourc, J.P., Gotteland, P., Billard, H., Delineau, T., Gisbert, T., Ouvry, J.F. & Vuillemin, M. (1999). An In Situ Waste Mechanical Experimentation on a French Landfill, *Proceedings of the 7th International Landfill Symposium, Sardinia '99, S. Margherita di Pula, CISA, Italy*, 445-452.
- Turczynski, U. (1988). Geotechnical Aspects of Building Multicomponent- Landfills, *Ph.D. Thesis, Freiberg (Sachsen), Germany (In German)*.
- Van Impe, W.F. & Bouazza, A. (1998). Large shear tests on compacted bales of municipal solid waste, *Soils and Foundation; Japanese Geotechnical Society*, 38 (No. 3), 199-200.
- Vilar, O.M. & Carvalho, M.F. (2002). Shear strength properties of municipal solid waste, *Proceeding of the Fourth International Congress on Environmental Geotechnics, Brazil, Vol. 1*, 59-64.
- Vilar, O.M. & Carvalho, M.F. (2004). Mechanical properties of municipal solid waste, *Journal of Testing and Evaluation, ASTM*. 32(6), 1-12.
- Wall, D.K. & Zeiss, C. (1995). Municipal landfill biodegradation and settlement, *Journal of Environmental Engineering., ASCE*, 121 (3), 214-224.
- Watts, K. S. & Charles, J. A. (1990). Settlement of recently placed domestic refuse fills, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering* 88, 971-993.
- Watts, K. S. & Charles, J. A. (1999). Settlement characteristics of landfill wastes, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering, No. 137*, 225-233.
- Watts, K.S., Charles, J.A. & Blaken, N.J.R. (2002). Settlement of landfills: measurements and their significance, *Waste 2002, Integrated Waste Management and Pollution Control: Research, Policy and Practice, Stratford-upon-Avon, UK*, 673-682.
- Westlake, K. (1995). Landfill waste pollution and control, Chichester, *U.K.L Albion Publishing*, 34-69.
- Withiam, J.L., Tarvin, P.A., Bushell, T.D., Snow, R.E. & German, H.W. (1995). Prediction and performance of municipal landfill slope, *Proceedings International Conference The Geoenvironment 2000, ASCE GSP No.46(2), NY*, 1005-1019.
- Whitlow, R. (1983). Basic Soil Mechanics, *Pearson Education Limited, 4th Edition*, 2001.

- Washington State Department of Ecology [WSDE]. (1987). Solid Waste Landfill Design Manual, *Publication No. 87-13*, 632.
- Wong, W.W.Y. (2009). Investigation of the geotechnical properties of municipal solid waste as a function of placement conditions, *PhD thesis, Faculty of California Polytechnic State University, San Luis Obispo*, 151.
- Wood, D.M. (1990). Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics. *Cambridge University Press, UK*, 462.
- Zekkos, D.P. (2005). Evaluation of static and dynamic properties of municipal solid waste. *PhD thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkley*. 578.
- Zekkos, D.P., Bray, J.D., Kavazanjian, E., Matasovic, N., Rathje, E.M., Riemer, M.F. & Stokoe, K.H. (2006). Unit weight of municipal solid waste, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 132(10)*, 250-1261.
- Zekkos, D., Bray, J.D., Reimer, M., Kavazanjian, E. & Athanasopoulos, G.A. (2007). Response of municipal solid-waste from Tri-Cities landfill in triaxial compression, *Proceedings of the 11th International Waste Management and Landfill Symposium, Sardinia '07, S. Margherita di Pula, CISA*, Paper No. 447.
- Zhan, L.T., Chen, Y.M. & Ling, W.A. (2008). Shear strength characterization of municipal solid waste at the Suzhou landfill, China, *Engineering Geology, No 97*, 97-111.
- Zimmerman, E.R. (1972). A mathematical model for solid waste settlement, *Ph.D. Dissertation, Northwestern University, Evanston, Illinois*.
- Zornberg, J.G., Jernigan, B.L., Sanglerat, T.R. & Cooley, B.H. (1999). Retention of free liquids in landfills undergoing vertical expansion, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 125, No. 7*, 583-594.
- Yen, B.C. & Scanlon, B.S. (1975). Sanitary landfill settlement rates, *Journal Geotechnical Engineering, Vol. 101(5)*, 475-487.

BIOGRAFIJA

Dragoslav Rakić rođen je 1965. godine u Stubici. Osnovnu školu završio je u mestu rođenja, a srednju školu u Paraćinu, smer matematičko - tehnički. Dipolomirao je 1991. godine, a magistarsku tezu pod nazivom "Geotehnički činioci i njihov uticaj na nosivost i sleganje vertikalno opterećenih šipova" odbranio je 1997. godine na Rudarsko-geološkom fakultetu, na smeru za Geotehniku. U periodu od 1992. do 1994. godine radio je u D.P. "Geoinženjering" iz Niša. Od 1994. godine radi na Rudarsko-geološkom fakultetu u Beogradu gde na osnovnim studijama održava vežbe iz predmeta: Fundiranje, Mehanika tla i Geotehnika zaštite životne sredine, a na diplomskim akademskim studijama izvodi vežbe iz predmeta: Mehanika tla 2 i Fundiranje 2. Honorarni je saradnik u istraživačkoj stanici Petnica. Pored nastavnog i obrazovnog rada, aktivno se bavi i naučno-istraživačkim radom. Samostalno, ili kao jedan od autora, objavio je 102 rada. U svojim radovima obrađivao je raznovrsnu i kompleksnu geotehničku problematiku: fundiranje objekata i numeričke metode u geotehničkom inženjerstvu, geotehnička istraživanja i ispitivanja u tlu i steni, deponije komunalnog otpada i zaštita životne sredine, stabilnost padina i kosina, primena geosintetičkih materijala u geotehnici, obrazovanje inženjera geotehnike. Autor je tri tehnička i razvojna rešenja koja imaju poseban doprinos u razvoju i unapređenju laboratorije za mehaniku tla. Od strane saveza pronalazača i tehničkih unapređenja Beograda, na XXXII međunarodnoj izložbi "Pronalazaštvo – Beograd 2012", u svojstvu koautora, dobitnik je srebrne medalje sa likom Nikole Tesle za pronalazak "Sanacija klizišta ugradnjom Geo-stentova". U svojstvu korukovodioca i istraživača, u periodu od 1996. do 2011. godine, učestvovao je u četiri naučno-istraživačka projekta Ministarstva za nauku i zaštitu životne sredine i Ministarstva za obrazovanje i nauku, u sklopu programa osnovnih istraživanja i istraživanja u oblasti tehnološkog razvoja. Trenutno korukovodi jednim naučno istraživačkim projektom koje finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja, a na jednom je angažovan u svojstvu saradnika. Uporedo sa naučno-istraživačkim radom bavi se i stručnim radom na rešavanju različitih problema iz geotehnike. Član je: International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE), International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG), Društvo za mehaniku tla i geotehniku Srbije. Oženjen je Danijelom sa kojom ima sinove Aleksu i Vukašina.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани-а мр Драгослав Р. Ракић

број индекса _____

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

КОНСТИТУТИВНЕ ЗАВИСНОСТИ КОМУНАЛНОГ ОТПАДА

СА ДЕПОНИЈА У СРБИЈИ

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

Потпис докторанда

У Београду, 04. 02. 2013.



Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора мр Драгослав Р. Ракић

Број индекса _____

Студијски програм _____

Наслов рада **КОНСТИТУТИВНЕ ЗАВИСНОСТИ КОМУНАЛНОГ ОТПАДА СА
ДЕПОНИЈА У СРБИЈИ**

Ментор Проф. Др Владица Цветковић

Потписани/а мр Драгослав Р. Ракић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 04. 02. 2013.



Прилог 3.

Изјава о коришћењу

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

КОНСТИТУТИВНЕ ЗАВИСНОСТИ КОМУНАЛНОГ ОТПАДА СА ДЕПОНИЈА У СРБИЈИ

која је моје ауторско дело.

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

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

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 04. 02. 2013.