

РЕЦИКЛАЖА И ОДРЖИВИ РАЗВОЈ
UDK 628.47
Научни рад

Технички факултет у Бору – Универзитет у Београду, В.Ј. 12, 19210 Бор, Србија
Катедра за минералне и рециклажне технологије
Тел. +381 30 424 555, 424 556, Фак. +381 30 421 078

ФИЗИЧКО-МЕХАНИЧКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ КОМУНАЛНОГ ОТПАДА
PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF MUNICIPAL SOLID WASTE

Драгослав Ракић[#], Слободан Ђорић, Ласло Чаки
Рударско-геолошки факултет Београд, Бушина бр. 7, 11000 Београд, Србија

ИЗВОД

Активност на изградњи нових, затим санација, ремедијација и рекултивација постојећих депонија чврстог комуналног отпада, на територији Србије интензивирани су у задњих година. У вези са тим спроводе се комплексна истраживања да би се утврдили природни геолошки услови терена, како за извођење грађевинских радова, тако и за анализу еколошких аспеката у смислу могућности ширења загађења на околину. Међутим, често за потребе изградње нових а посебно за санацију постојећих депонија, не уважава се у довољној мери значај физичко-механичких карактеристика самог отпада, што може да изазове одређене еколошке последице (клизање косина депонија, велика слегања и сл.). У овом раду, даје се кратак приказ основних физичко-механичких карактеристика комуналног отпада, које је неопходно познавати како за потребе изградње нових, тако и за санацију и рекултивацију постојећих депонија.

Кључне речи: комунални отпад, запреминска тежина, чврстоћа смицања, стишљивост.

ABSTRACT

Activities related to construction of new landfilled sites, as well as remediation and recultivation of the existing ones on the territory of Serbia, have intensified in the past few years. In relation to this, complex research has been conducted to determine natural geological properties of the terrain and its suitability for the proposed construction works and possible environmental pollution. However, for the remediation of existing landfills, the importance of sufficient physical and mechanical characteristics of the waste, which can cause some environmental effects (slip slope landfill, settlement, etc.) were not respected, very often. In this paper is given a brief review of the basic physico-mechanical characteristics of municipal solid waste, which are necessary for new construction and for rehabilitation and recultivation of existing landfills.

Key words: municipal solid waste, unit weight, shear strength, compressibility.

[#] Особа за контакт: rgfraka@rgf.bg.ac.rs

УВОД

Физичко-механичка својства комуналног отпада се анализирају и истражују применом основних метода и концепта који су развијени за тло, уз многа ограничења. Резултати досадашњих истраживања показују да је механичко понашање комуналног отпада недовољно објашњено, а неки од разлога за то су³:

- променљив и хетероген састав отпада који је по природи јако порозан (ово условљава и величину појединих фракција које су доста различите, од ситних глиновитих до великих блоковских),
- проблематично узимање и испитивање репрезентативних узорка отпада (дубина и

локација узетог узорка није увек индикативна за просечне особине отпада у депонији),

- непостојање опште прихваћене методологије узорковања и тестирања и
- велика промена својстава у зависности од времена тј. стадијума разградње отпада.

Наведени разлози су веома значајни и морају бити узети у обзир, нарочито када се користе резултати из литературе. Наиме, у литератури се често срећу подаци о физичко-механичким карактеристикама отпада, који се заснивају углавном на емпиријским или ограниченим теренским проценама.

ЗНАЧАЈ ПОЗНАВАЊА ФИЗИЧКО-МЕХАНИЧКИХ КАРАКТЕРИСТИКА ОТПАДА

Савремена депонија подразумева уређени природни терен (грађевину са одговарајућим пратећим објектима), обложен са доње и горње стране непропусним баријерама, на који се довози и плански насипа и збија комунални отпад. Висине оваквих депонија, врло често прелазе и десетине метара па је клизање њихових косина врло честа појава. Поред тога, одлагање отпада на депонији подразумева веома дуг временски период (обично двадестак и више година) па отуда запремине премашују милионе кубних метара

отпадног материјала који се најчешће директно одлаже на природне терене (уз одговарајуће претходне припреме). Због тога посебно треба водити рачуна и о слегању како материјала у оквиру самих депонија тако и тла у њиховој подлози. С обзиром на то, напонско-деформацијско стање комуналног отпада, као последица перманентног nanoшења изузетно хетерогеног материјала чије су карактеристике временски условљене, веома је сложено.

Табела 1. Најважније физичко-механичке карактеристике комуналног отпада

Случај за анализирање	Запреминска тежина	Стишљивост	Чврстоћа смицања	Водопропустљивост
Стабилност подлоге депоније	+		+	
Интегритет подлоге	+		+	
Стабилност косине депоније	+	+	+	+
Стабилност заштитног система благог нагиба	+		+	+
Интегритет заштитног система благог нагиба	+	+	+	
Стабилност заштитног система стрмог нагиба	+		+	+
Интегритет заштитног система стрмог нагиба	+	+	+	
Интегритет прекривних система	+	+	+	
Интегритет дренажних система	+			
Интегритет система за дегазацију	+	+	+	+

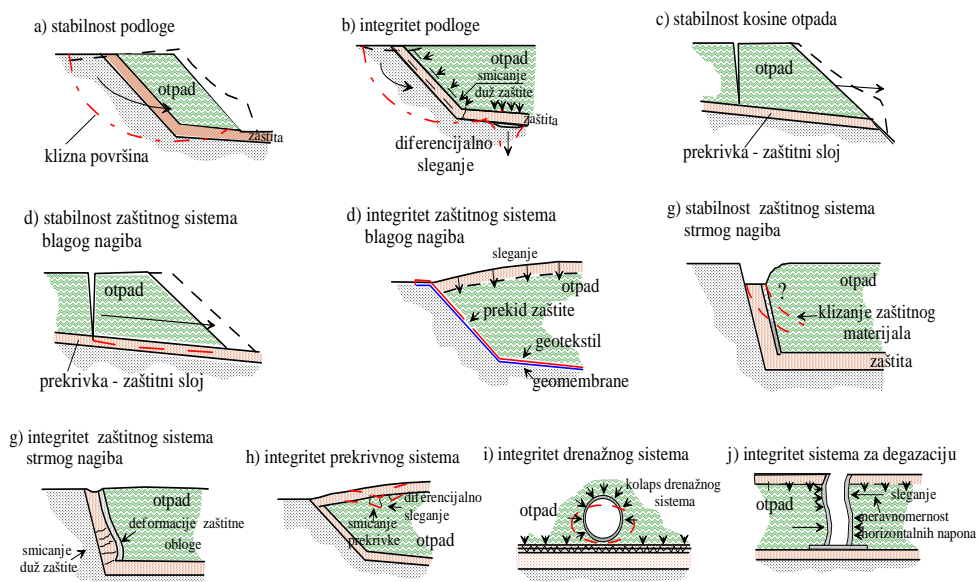
Иако није могуће у потпуности дефинисати физичко-механичке карактеристике отпада, пре свега због његове хетерогене природе, важно је да се оне разумеју и да се дефинишу приближне вредности у којима се оне крећу. У Табели 1², приказане су основне физичко-

механичке карактеристике комуналног отпада које је неопходно познавати да би се извршило правилно пројектовање, односно да би се избегле могуће деформације на инфраструктурним деловима депоније (Слика 1).

ОСНОВНИ ФИЗИЧКО-МЕХАНИЧКИ ПАРАМЕТРИ КОМУНАЛНОГ ОТПАДА

Познато је да отпад има сложену природу грађе, јер се у оквиру отпадног материјала налази међупростор испуњен водом, гасом (најчешће ваздухом), или, и гасом и водом, како слободном тако и везаном. Због те специфичне порозне структуре, физичко-механичке карактеристике отпада су изузетно променљиве и то на релативно малом растојању. Стога, сваки инжењерски захват на депонованом материјалу укључује и проблем избора репрезентативних узорка тј. подручја посматрања и спровођење одговарајућих испитивања. Да би се извршио избор репрезентативног узорка из депоније, од велике користи могу бити следећи подаци:

- познавање облика компоненти да би се разликовале оне налик тлу (на пример зрнасте) и оне које не наликују тлу (на пример листићи и влакна).
- дистинкцију између материјалних група (на пример на основу материјалних особина метал, папир, пластика) са утврђеним доминантним груписањем у односу на величину и механичка својства појединих компоненти;
- градација по величини за сваку од група компонената (гранулометријски састав);
- потенцијал појединих компоненти да промене облик и запремину;
- процена потенцијала деградације како за органске тако и за неорганске елементе.



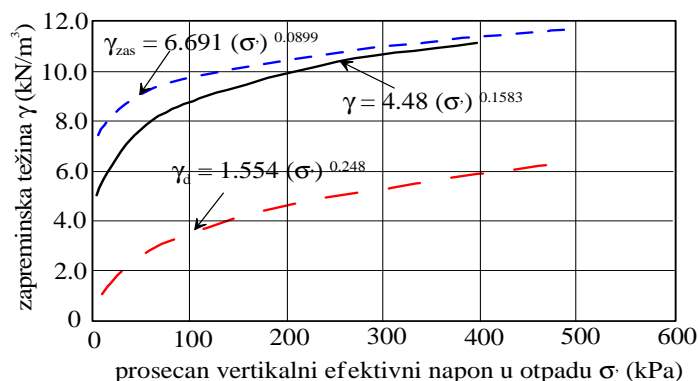
Слика 1. Модели најчешћих појава деформација на инфраструктурним деловима депоније

Запреминска тежина

Запреминска тежина је један од основних физичких показатеља отпада и веома битан параметар од кога зависи и његово механичко понашање, с обзиром да тежина самог отпада представља једно стално оптерећење које утиче како на стабилност тела депоније тако и на стабилност подлоге и заштитних система депоније. Запреминска тежина отпада, пре свега, зависи од врсте материјала који се одлаже тј. састава отпада, од његове збијености при депоновању, тежине надслоја, влажности, старости отпада и др. У зависности од збијености отпада, Фасетт је дао просечне вредности запреминске тежине отпада које су приказане у Табели бр. 2. Вредности приказане у Табели 2 релативно се добро слажу и са вредностима које су приказали

Powrie и Beaven узимајући у обзир и просечну вредност вертикалних напона у отпаду (Слика 2).

Као илустративан пример за променљиву вредност запреминске тежине отпада, може се навести “РЕТ” амбалажа, или рецимо лименка чија је запреминска тежина $\gamma=2\text{kN/m}^3$ када је празна, односно око $\gamma=12\text{kN/m}^3$ када је испуњена течношћу, а испресована под великим притисцима приближна је запреминској тежини металне плоче. Управо из тих разлога, у литератури се сусрећемо са вредностима запреминских тежина које се крећу у широким границама (Табела 2). При томе треба имати у виду чињеницу да је расипање резултата знатно мање када се примени прописана технологија одлагања у погледу збијања, уз коришћење знатних количина земљастог материјала који се користи за прекривке.



Слика 2. Зависност између запреминске тежине отпада и вертикалног ефективног напона

Табела 2. Уобичајене вредности запреминске тежине отпада у зависности од степена збијености

	Слабо збијен	Средње збијен	Добро збијен
Уобичајене вредности (kN/m^3)	3.0 -9.0	5.0-7.8	8.8-10.5
Просечна вредност (kN/m^3)	5.3	7.0	9.6
Стандардна девијација (kN/m^3)	2.5	0.5	0.8
Коефицијент варијације (%)	48	8	8

Параметри стишљивости

Да би се омогућило тачније моделирање и нумеричка симулација дуготрајног понашања депоније, које још увек није

адекватно обрађено а од великог је значаја приликом пројектовања покривног система и затварања депоније (према неким истраживањима¹ слегање депоније може да премаши интервал од 25-40% њене почетне

висине, тј. висине у тренутку затварања), неопходно је познавање параметара стишљивости. Стишљивост комуналног отпада се изучава доста дуго из разлога ефикаснијег одлагања отпада, односно да би се предвидела укупна слегања депоније, прогнозирао интеракција између система баријера на косинама и слегања самог комуналног отпада.

Теорија консолидације, која се примењује у механици тла, по правилу се примењује и за комунални отпад, па се могу користити исти параметри. Сходно томе укупно слегање се може израчунати као збир иницијалног-тренутног слегања, консолидационог слегања и секундарне компресије. Иницијално и консолидационо слегање се приписује примарној компресији и укључује дисторзију, савијање, дробљење и реоријентацију честица. Примарна компресија се по правилу одиграва одмах након nanoшења оптерећења и сматра се краткорочном, јер се дешава у периоду од неколико дана до неколико недеља. За прорачун слегања депоније, услед примарне компресије, користе се индекс примарне компресије C_c и модификован индекс примарне компресије C_c' , који зависе од промене вертикалних напона и одређују се на основу следећих једначина:

$$C_c = \frac{\Delta e}{\log(\sigma'_1/\sigma'_0)}; \quad C_c' = \frac{\Delta H}{H_0 \cdot \log(\sigma'_1/\sigma'_0)} = \frac{C_c}{1+e_0}$$

где је: Δe – промена коефицијента порозности, e_0 – почетни коефицијент порозности, σ'_0 – почетни ефективни вертикални напон, σ'_1 – крајњи ефективни

вертикални напон, H_0 – почетна висина слоја отпада и ΔH – промена дебљине слоја отпада.

Секундарна компресија се дешава кроз читав „активни живот“ депоније и обично је главна компонента укупног слегања. За њу се може рећи да укључује све „скривене“ ефекте па и оне који се односе на деградацију, како хемијску тако и биолошку. Из тих разлога, за процену слегања након завршетка примарне фазе, користе се индекс секундарне компресије $C_{\alpha\alpha}$ и модификовани индекс секундарне компресије C_{α}' .

$$C_{\alpha} = \frac{\Delta e}{\log(t_2/t_1)}; \quad C_{\alpha}' = \frac{\Delta H}{H_0 \cdot \log(t_2/t_1)} = \frac{C_{\alpha}}{1+e_0}$$

где t_1 и t_2 представљају време на почетку и на крају секундарног слегања.

Oweiss и Khera (1998) су дошли до одређених вредности индекса секундарне компресије, који су добијени на основу мониторинг студија дуготрајног слегања отпада. У Табели 3 приказане су просечне вредности индекса секундарне компресије. Треба ипак напоменути да ово нису константне вредности, јер ни брзина деградације није временски константна.

Sowers је дао једну емпиријску зависност индекса секундарне компресије и коефицијента порозности у зависности од услова деградације. Па је тако за неповољне услове деградације $C_{\alpha} = 0.03e_0$, док је за повољне услове распадања $C_{\alpha} = 0.09e_0$ (e_0 -коефицијент порозности).

Табела 3. Просечне вредности индекса секундарне компресије на основу старости отпада

	C_{α}
10 год. стара депонија	0.02
15 год. стара депонија	0.24
Од 15 - 20 год. стара депонија	0.02
депонија старија од 20 год.стар	0.04
Старија депонија са високим садржајем тла	0.001-0.005

Параметри чврстоће смицања

Познавање чврстоће смицања је потребно да би се проценила стабилност косина отпада, али и падина на којима се по правилу налазе одређени системи заштите подлоге. Уколико се комунални отпад поистовети са природним тереном, онда његова чврстоћа смицања може да се дефинише помоћу Coulomb-Mohrovog услова лома, преко угла унутрашњег трења и тзв. "привидне кохезије" с обзиром да праве кохезије нема, јер се ради о хетерогеним фракцијама отпада. То значи да се чврстоћа смицања комуналног отпада може дефинисати преко параметара чврстоће смицања: угла унутрашњег трења ϕ' и кохезије c' . Међутим, за разлику од природног тла, смичућа чврстоћа отпада се реализује при битно већим деформацијама (реда величине $\epsilon_f > 15-20\%$), када се активирају „армирајуће“ фракције отпада. Због тога се за дефинисање параметара смичуће чврстоће отпада примењује широк распон нормалних напона, уз ограничење дозвољених мобилисаних деформација.

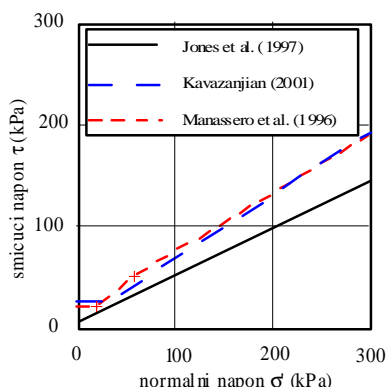
Приказане вредности параметара чврстоће смицања, које се могу наћи у литератури, обично су дате на основу опита директног смицања или на основу повратних анализа стабилности. Manassero et al. (1996) предлаже комбиновану анвелопу лома приказану на слици 3 и она се може користити као полазна основа у пројектовању, уколико не постоје подаци специфични за одређену локацију. У вези са тим пројектне вредности параметара чврстоће c и ϕ дефинисане су у зависности од три јасно одређене зоне:

- Зона А: одговара веома ниским напонима ($0 \text{ кПа} \leq \sigma'_v < 20 \text{ кПа}$) где се понашање отпада може описати само преко кохезије (у конкретном случају, $c = 20 \text{ кПа}$).

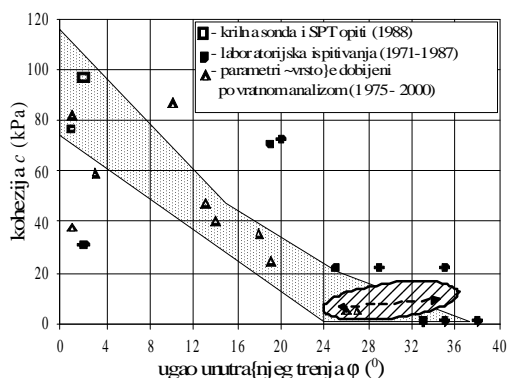
- Зона Б: одговара ниским до умереним напонима ($20 \text{ кПа} \leq \sigma'_v < 60 \text{ кПа}$) где је у овом случају $c = 0 \text{ кПа}$ и $\phi \approx 38^\circ$ и
- Зона Ц: одговара већим напонима ($\sigma'_v \geq 69 \text{ кПа}$) где је $c \geq 20 \text{ кПа}$ и $\phi \approx 30^\circ$.

Сличан приступ имао је и Кавзаџиан (2001) који је, на основу података из студија у северној Америци, предложио да се за нормалне напоне мање од 30 кПа за параметре чврстоће смицања усвоји вредност од $c = 24 \text{ кПа}$ и $\phi = 0^\circ$, док би за напоне преко 30 кПа вредност параметара чврстоће смицања износила $c = 0 \text{ кПа}$ и $\phi = 33^\circ$. Овај опсег је такође приказан на слици 3. На основу података Jones et al. (1997) предложене су вредности параметара чврстоће смицања за $c = 5 \text{ кПа}$ и $\phi = 25^\circ$. Поред тога, често се за дефинисање параметара чврстоће смицања користи и дијаграм којег су дали Singh и Murphy⁴ на основу бројних повратних анализа уз усвајање фактора сигурности од $F_s = 1.3$ и 1.5, као и на основу лабораторијских и ин ситу опита. Овај дијаграм може корисно да послужи за добијање оријентационих вредности параметара чврстоће смицања, мада се може закључити да је расипање резултата превелико и да се вредности за привидну кохезију крећу од 0-100 кПа, односно за угао унутрашњег трења од $2-40^\circ$ (Слика 4).

Као што се види, „предложени“ пројектни приступи се доста разликују те се због тога мора опрезно поступати када се користе подаци из литературе. С обзиром на то може се закључити да као што не постоји јединствена анвелопу лома, која може да се користи за све врсте тла, тако је немогуће дефинисати и јединствену анвелопу лома за отпад



Слика 3. Комбиноване анvelope лома комуналног отпада



Слика 4. Параметри чврстоће смицања одређени повратном анализом (Сингх С., Мурпху Ј., 1990)

ЗАКЉУЧАК

Услов за успешну анализу интеракције депоније и природног терена, поред познавања геотехничких карактеристика подлоге, јесте и познавање физичко-механичких параметара отпадног материјала. Познавање запреминске тежине, водопропустљивости, стишљивости, чврстоће смицања па и напонских стања је неопходно и може се рећи фундаментално за процене стабилности депонија и интегритета заштитних материјала (по правилу геосинтетичких, глиновитих и минералних компоненти подлоге). И поред

познавања карактеристика појединих компоненти отпада, засад се врло тешко могу успоставити одређене корелације између појединих група отпада и физичко-механичких параметара, с обзиром на чињеницу да су поједине компоненте отпада углавном хаотично распоређене у укупној маси. Из тих разлога неопходно је развијати одговарајуће конститутивне моделе за комунални отпад који ће помоћи да се изврши оптимизација пројектовања комуналних депонија.

ЛИТЕРАТУРА

1. Coumouls D. G., "Landfills – long-term settlement behaviour of landfills", XIII European conference on soil mechanics and geotechnical engineering, (2003), Prag, 137-142.
2. Dixon N., D. Russell V. Jones., "Engineering properties of municipal solid waste", Geotextiles and Geomembranes 23, (2005), pp. 205-233.
3. Rakić D., Lazić M., Stojadinović D., "Geotechnical investigations of different geological landscapes for the purposes of remediation of municipal landfill sites", IAEG2006, Nottingham, september, (2006). p.n. 701, DVD.
4. Singh S., Murphy J., "Evaluation of the stability of sanitary landfills, Geotechnics of Waste Fills – Theory and Parctice", ASTM STP 1070, Philadelphia, (1990). pp. 240-258.