

Pregled parametara za analize stabilnosti odlagališta otpada

Tomislav Ivšić, Igor Petrović, Franjo Verić

Ključne riječi

odlagalište,
otpad, čvrstoća,
stabilnost,
geosintetici,
brtveni sloj,
anvelopa sloma

Key words

disposal site,
waste,
strength,
stability,
geosynthetic fibers,
liner,
failure envelope

Mots clés

site d'entreposage,
déchets,
résistance,
stabilité,
géosynthétiques,
membrane étanche,
enveloppe de rupture

Ключевые слова

свалка,
отходы,
прочность,
устойчивость,
геосинтетика,
уплотняющий слой,
энvelopa слoма

Schlüsselworte

Deponie,
Abfall,
Festigkeit,
Stabilität,
Geosynthetik,
Dichtungsschicht,
Bruchenvolpe

T. Ivšić, I. Petrović, F. Verić

Pregledni rad

Pregled parametara za analize stabilnosti odlagališta otpada

U radu su navedeni bitni parametri za analize globalne stabilnosti odlagališta komunalnog otpada. Predočen je iscrpan prikaz parametara otpada te njihove varijabilnosti. Ističe se da sadašnji podaci imaju ograničenu vrijednost pa su potrebni neposredni podaci i mjerenja. Upozorava se na probleme određivanja parametara čvrstoće na dodirnim plohama u brtvenim slojevima i predlaže jednostavan postupak statističke obrade rezultata pokusa za određivanje nelinearne envelope sloma.

T. Ivšić, I. Petrović, F. Verić

Subject review

Overview of parameters for stability analysis on waste disposal sites

An overview of parameters significant in the analysis of global stability of communal waste disposal sites is presented. A detailed account is given of waste parameters and their variability. It is emphasized that present data have limited value and that direct data and measurements are required. The attention is drawn to problems of determining strength parameters on contact surfaces of liners, and a simple procedure of statistical treatment of test results is recommended as a way of determining the nonlinear failure envelope.

T. Ivšić, I. Petrović, F. Verić

Ouvrage de synthèse

Vue d'ensemble des paramètres pour l'analyse de stabilité sur les sites d'entreposage de rejets

Une vue d'ensemble des paramètres considérés importants pour l'analyse de stabilité globale des sites d'entreposage des déchets communaux est présentée. Un aperçu détaillé des paramètres des déchets et leur variabilité est présenté. Les auteurs soulignent que les données actuelles sont d'une valeur limitée et que les données et les mesures directes sont nécessaires. L'attention est dirigée sur les problèmes de détermination des paramètres de résistance aux surfaces de contact des membranes étanches, et une procédure simple de traitement statistique des données obtenues par essais est recommandée comme méthode appropriée pour déterminer l'enveloppe non linéaire de rupture.

T. Ившич, И. Петрович, Ф. Верич

Обзорная работа

Обзор параметров по анализу устойчивости мусорных свалок

В работе даётся обзор важных параметров по анализу глобальной устойчивости свалок коммунального отхода. Представлен исчерпывающий обзор параметров отхода, а также их вариабельности. Подчёркивается, что данные, полученные до сегодняшнего времени, имеют ограниченное значение, так что необходимы непосредственные данные и измерения. Предупреждается о проблемах определения параметров прочности на соприкасающихся поверхностях в уплотняющих слоях, и предлагается простой способ статистической обработки результатов опытов по определению нелинейной envelopы слoма.

T. Ivšić, I. Petrović, F. Verić

Übersichtsarbeit

Übersicht der Parameter für die Stabilitätsanalyse von AbfalldPONEN

Im Artikel gibt man eine Übersicht der wesentlichen Parameter für die Analyse der globalen Stabilität von Deponien für Kommunalabfall. Vorgelegt ist eine ausführliche Darstellung der Abfallparameter und deren Variabilität. Es wird hervorgehoben dass die gegenwärtigen Angaben nur einen begrenzten Wert haben, so benötigt man unmittelbare Angaben und Messungen. Hingewiesen wird auf die Probleme der Bestimmung der Festigkeitsparameter auf den Kontaktflächen der Dichtungsschichten. Vorgeschlagen ist ein einfaches Verfahren der statistischen Bearbeitung der Ergebnisse der Versuche für die Bestimmung der unlinearen Bruchenvolpe.

Autori: Doc. dr. sc. **Tomislav Ivšić**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Franjo Verić**, dipl. ing. građ., Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet; **Igor Petrović**, dipl. ing. geot., Sveučilište u Zagrebu Geotehnički fakultet u Varaždinu

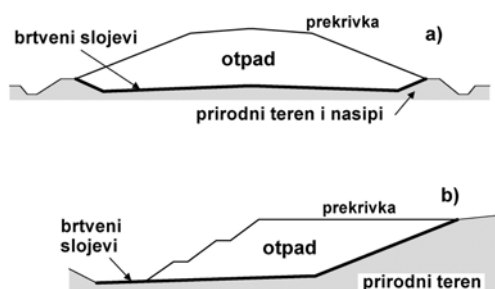
1 Uvod

Zbrinjavanje komunalnog otpada danas je jedan od vodećih problema u zaštiti okoliša. Prema procjenama, u Republici Hrvatskoj svake godine nastane oko 1,2 milijuna tona komunalnog otpada koji najvećim dijelom završava na neuređenim odlagalištima i na malom broju uređenih [1]. Volumen ovih količina otpada veći je od 1,2 milijuna prostornih metara i svake godine otpad zauzima nekoliko hektara novih površina.

Velik broj neuređenih odlagališta-smetlišta i nemaran odnos prema njima pokazatelji su niskih ekoloških standarda u Hrvatskoj. Tek je u posljednje vrijeme u Hrvatskoj počelo intenzivnije ulaganje u projekte i izgradnju suvremenih uređenih odlagališta, a snažan poticaj tog "probuđenoj ekološkoj svijesti" dali su, za naše prilike strogi, zahtjevi u procesu približavanja standardima Europske zajednice.

Suvremeni trend zbrinjavanja otpada u većini je razvijenih zemalja u tzv. "cjelovitom sustavu gospodarenja otpadom" (smanjivanje količina otpada, ponovna upotreba bez obrade, obnavljanje i recikliranje) s konačnim ciljem – napuštanje odlaganja otpada (*bezdeponijski koncept*) [1]. Takav sustav pretpostavlja dugoročnije prilagodbe društva i gospodarstva te znatnija početna ulaganja. Stoga odlagališta i dalje ostaju jednostavnija i (početno) financijski povoljnija alternativa za brže rješavanje problema zbrinjavanja otpada, posebice u područjima u kojima to prostorni uvjeti dopuštaju.

Suvremeni koncept zatvorenog odlagališta predstavlja odlagalište kao (nasutu) građevinu u kojoj je dovezeni i zbijeni otpad obložen s donje i gornje strane nepropusnim barijerama. Zagađena tekućina i plinovi koji nastaju u unutrašnjosti tijela odlagališta kontrolirano se odvođe sustavom odvodnje i otplinjavanja. Na taj se način sprječava širenje zagađenja od raspadanja otpada u podzemlje i okoliš, te otpad izolira od vanjskih utjecaja. Odlagališta se izvode kao umjetna "brda" iznad okolnog terena ili se zapunjavaju prirodne udoline, napušteni kamenolomi, jame, kaverne i sl. (slika 1.).



Slika 1 Najčešći položaji odlagališta otpada u odnosu prema terenu:
a) nasipavanje iznad prirodnog terena;
b) zatrpavanje prirodnih ili umjetnih udolina

Debljina (ili visina) takvih građevina doseže i nekoliko desetaka metara, a obujmi se izražavaju u stotinama tisuća ili milijunima prostornih metara. Otpad kao "građevinski materijal" ima nepovoljna mehanička svojstva (velika stišljivost, razmjerno mala čvrstoća, promjenljivost sastava s vremenom) pa problemi mehaničke otpornosti i stabilnosti odlagališta zahtijevaju primjerenu pozornost i obradu pri projektiranju i izvedbi. Nestabilnosti, oštećenja, pa i havarije, događaju se u odlagalištima komunalnog otpada širom svijeta, a sanacije su dugotrajne i skupe [5].

U ovome se radu raspravlja o bitnim parametrima za analize stabilnosti tijela odlagališta komunalnog otpada. Potencijalne plohe sloma na prikazanim tipičnim presjecima odlagališta prolaze kroz otpadni materijal i duž kontaktnih ploha brtvenih slojeva pa je težište ovog prikaza upravo na tim kritičnim elementima. U pojedinačnim slučajevima globalnu stabilnost mogu ugroziti i nepovoljna svojstva prirodnog temeljnog tla na odabranoj lokaciji pa se mjerodavni parametri određuju unutar mehanike tla ili stijena.

2 Parametri komunalnog otpada

2.1 Sastav i klasifikacija otpada

Analize komunalnog otpada većih hrvatskih gradova [1] pokazuju da je sastav otpada sličan onome iz drugih europskih gradova. Prema težinskim omjerima relativnu većinu (oko 37%) čini biootpad (npr. ostaci prehrambenih artikala i zeleni otpad – cvijeće, lišće, trava) koji je praktički u cijelosti razgradiv i sadrži osjetne količine vode. Drugu veću skupinu sličnog podrijetla čine papir (oko 19%) i karton (oko 7%). Stakleni otpad i plastični otpad (sintetičke tvari, polimeri) zastupljeni su svaki sa po 8%, a metalni otpad tek sa 2%. Tkanine i pelene čine i do 5% težine ukupnog otpada. Preostalih približno 14% čine razni sitni otpad, složene i problematične tvari te ostali nerazvrstani otpad.

Takav heterogeni skup materijala i tvari od kojih je znatan dio promjenljiv s vremenom predstavlja i inženjerski "materijal" čija relevantna mehanička svojstva treba uključiti u odgovarajuće analize. Prepoznavanje i određivanje tih svojstava, baš kao i praktični aspekti projektiranja i izgradnje, uglavnom su zasnovani na prethodnim spoznajama o ponašanju tla. Stoga pojmovi i načela klasične mehanike tla dominiraju u opisima i tumačenjima mehaničkog ponašanja otpada. No, današnje razumijevanje ponašanja otpada još je uvijek daleko od potpunosti. Osjetne razlike od ponašanja geoloških materijala, znatna promjenljivost sastava s vremenom (razgradivost) i nedovoljno razjašnjene uloge pojedinih sastavnica otpada u zajedničkom djelovanju predstavljaju elemente mehaničkog ponašanja koji otpad karakteriziraju kao specifi-

čan materijal. Istraživanja mehanike otpada na međunarodnom se planu povećavaju i moguć je razvoj laboratorijskih i terenskih pokusa specifično za određivanje inženjerskih svojstava komunalnog otpada [2, 3].

Postoji više klasifikacija otpada za različite specifične svrhe (npr. navedeni morfološki sastav koji upućuje na količine i moguća djelovanja u svrhu recikliranja ili minimiziranja otpada). Za određivanje inženjerskog ponašanja potrebno je razvrstavanje koje sastavnice otpada grupira prema mehaničkim svojstvima (stišljivost, čvrstoća) i svojstvima propusnosti (za plin i kapljevine). Danas još nema općeprihvaćene klasifikacije koja bi pouzdano izdvojila reprezentativne grupe otpadnih tvari s navedenoga inženjerskoga gledišta. Predložene su klasifikacije [2, 3] razmjerno grube, ne odražavaju dovoljno specifičnih mehaničkih svojstava ili i uz veći broj identifikacijskih i klasifikacijskih pokazatelja daju slabe korelacije s potrebnim parametrima. Primjer grube klasifikacije jest klasifikacija Njemačkog geotehničkog društva iz 1993. gdje se otpad općenito dijeli na dvije grupe:

- otpad sličan tlu (*soil-like waste*), definiran kao čestični materijal za koji su primjenjiva načela mehanike tla (npr. otpadni građevinski materijal, jalovina, industrijski i kanalizacijski mulj, ostaci spaljivanja),
- otpad različit od tla (*non soil-like waste*), definiran kao materijal za koji su načela mehanike tla ograničeno primjenjiva ili uopće nisu primjenjiva (npr. zeleni otpad, voluminozni otpad, komunalni kruti otpad, ostaci mehaničko-bioloških obrada otpada i sl).

Za drugu je skupinu [3] predložen i detaljni postupak karakterizacije koji uključuje razvrstavanje po sastavnici (papir, tvrda i meka sintetika, metali, minerali, drvo, mulj), određivanje veličina zrna za frakcije manje od 120 mm, geometrije sastavnica (zrna, vlakna, folije, kutije) te određivanje vlažnosti i organskih komponenata. Unatoč iscrpnom opisu i karakterizaciji otpada, zasad nisu uspostavljene jasne korelacije karakterističnih grupa i geotehničkih parametara, nego se spominju tek neke opće zavisnosti.

Budući da je na sadašnjem stupnju znanja teško uspostaviti poopćenja ili usporedbe koji pružaju pouzdanu osnovu za inženjersku upotrebu, potrebna su daljnja specifična istraživanja različitih otpadnih materijala. Objavljeni podaci ili preporuke raznih autora mogu poslužiti kao orijentir, ali ne daju dovoljna jamstva za pouzdano iskorištavanje u budućim primjenama. Vjerojatne promjene sastava budućeg otpada (zbog očekivane veće selekcije pojedinih sastavnica i njihove reciklaže) ili primjene raznih tehnologija obrade otpada radi povećanja volumena postojećih odlagališta (npr. usitnjavanje, dodatno zbijanje teškim batovima, kemijske i biološke obrade) upućuju na to da će prošla i sadašnja iskustva ili ispitivanja dati slab uvid i ograničenu upotrebnu vrijednost budućim primjenama.

2.2 Volumenska težina otpada

Volumenska težina otpada bitan je parametar za mehaničke aspekte odlagališta budući da vlastita težina otpada predstavlja jedino stalno opterećenje koje djeluje na stabilnost tijela odlagališta, izaziva deformacije (slijeganja), te u potpornim zonama kliznih ploha ili na temeljnoj plohi normalnim naprezanjima aktivira čvrstoće mjerodavnih materijala. Na volumensku težinu, slično kao i kod tla, utječe zbijenost pri ugradnji (energija zbijanja, debljina slojeva), težina nadsloja (dubina od površine) te vlažnost (zasićenost prisutnim tekućinama). Za razliku od tla, na varijacije volumenske težine otpada utječe još i raznovrsnost sastavnica otpada, stanje razgradnje (starost otpada) te način ugradnje otpada (npr. postojanje ili nepostojanje zemljanih međuslojeva i njihova debljina).

Sastavnice otpada uvelike utječu na prosječnu volumensku težinu, pri čemu svaka od njih za sebe ima širok raspon jediničnih težina, a i on se može mijenjati s vremenom. Osim pora između pojedinih čestica ili komada otpada, svaki od njih obično ima i svoj skelet i poroznost. Ilustrativan primjer je limenka (konzerva) koja ima veliki "koeficijent pora" i volumensku težinu oko 2 kN/m³ kad je prazna, a oko 12 kN/m³ kad je ispunjena tekućinom. Ako se praznu limenku stisne i izravna pod visokim pritiskom, ona doseže volumenske težine metalnih ploča od kojih je napravljena (npr. više od 75 kN/m³ za čelične ploče). Mehanička se svojstva te limenke u različitim navedenim stanjima "zbijenosti" znatno razlikuju.

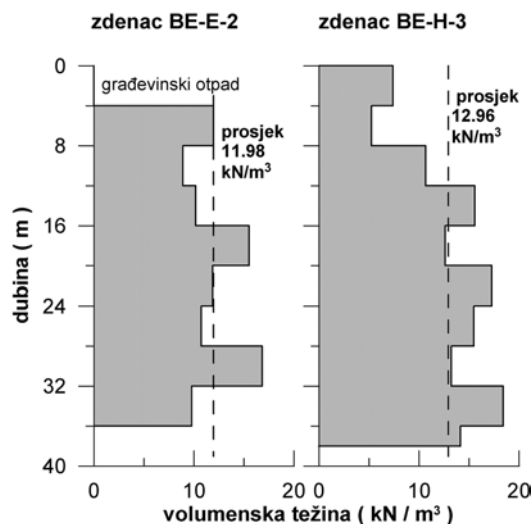
Budući da je komunalni otpad materijal sastavnice koje ga većinom imaju veliku poroznost i visoku stišljivost, procesi zbijanja pri odlaganju smanjuju pore i unutar sastavnica i među njima. Na taj način volumenska težina otpada ovisi, osim o sastavnici, još i o debljini slojeva pri navoženju otpada, težini i tipu strojeva za kompaktiranje i broju prijelaza stroja po istom sloju otpada. Prema izvješćima iz literature ti postupci nisu standardizirani i pokazuje se velika varijabilnost čak i na istim lokacijama odlagališta, ovisno o brzini punjenja odlagališta i različitim izvoditeljima radova. Prijašnja je praksa često bila istovarivanje otpada bez zbijanja ili "blago" zbijanje slojeva debljine 2-3 m, a današnja praksa teži dobrom zbijanju slojeva od 0,5-1,0 m s težim strojevima i većim brojem prijelaza po istom sloju.

Zbog navedenog ne iznenađuje da se u literaturi izvještava o volumenskoj težini komunalnog otpada u širokom rasponu od 3 pa čak do 20 kN/m³. Detaljniji pregled podataka širom svijeta [4] pokazuje da slabo zbijeni otpad (praktički bez zbijanja) daje raspon volumenskih težina od 3,0 do 9,0 kN/m³ s prosjekom 5,3 kN/m³ i standardnom devijacijom 2,5 kN/m³, dok dobro zbijeni otpad u skladu s današnjom praksom ima raspon od od 8,8 do 10,5 kN/m³, s prosječnom vrijednosti 9,6 kN/m³ i standardnom devijacijom 0,8 kN/m³. Bitan podatak iz ove

analize jest da se ujednačenost rezultata znatno povećava kad tehnologija odlaganja uključuje propisno zbijanje otpada u tanjim slojevima.

S druge strane, rezultati mjerenja iz američkih odlagališta [15] pokazuju znatno veće vrijednosti volumenskih težina otpada u rasponu od 14 do 20 kN/m³. Ovi se rezultati znatnim dijelom odnose na stari otpad (u visokom stupnju raspada) te na prisutnost znatnih količina zemljanog materijala u otpadu. Ovaj autor izvještava i o početnim volumenskim težinama otpada od 6 do 7 kN/m³ neposredno nakon ugradnje.

Rijetka mjerenja volumenske težine po dubini starijih odlagališta, npr. [2, 15] pokazuju porast volumenske težine s dubinom od 6 do 8 kN/m³ pri vrhu (ovisno o debljini zbijenih slojeva) do približno konstantnih vrijednosti od 10 do 13 kN/m³ nakon dubina od približno 20 do 30 m.



Slika 2. Raspodjela volumenskih težina otpada po dubini odlagališta Jakuševac u Zagrebu

Na slici 2. prikazane su varijacije volumenske težine otpada u zagrebačkom odlagalištu Jakuševac, mjerene pri iskopu zdenaca za otplinjavanje promjera 1,2 m udaljenih otprilike 200 m [6]. Iskopani se otpad u segmentima po 4 m dubine utovarivao u kamione i vagao na kamionskoj vagi, a volumen bušotine procijenjen je kao pravilan valjak. Iako su prosječne vrijednosti volumenskih težina bliske (12 do 13 kN/m³), varijacije po dubini su znatne, što se može pripisati raznovrsnom sastavu otpada. Tijekom sanacije odlagališta prebacivao se stari otpad (različite starosti) s dosta zemljanog materijala, a također se kontinuirano dovozio dnevni gradski otpad. Na žalost, pri iskopu nije obavljena identifikacija otpada po slojevima pa se prikazani dijagram ne može detaljnije analizirati. Mjerenje volumenske težine obavljeno je otprilike 18 mjeseci nakon ugradnje, pa procesi raspada

novog otpada još nisu ni počeli, dok je stari otpad odložen u zatečenom stanju raspada. Također, slijeganja tijela odlagališta su tek započela pa se eventualno zbijanje te ujednačivanje ili povećavanje težine s dubinom ne može primijetiti na ovim dijagramima.

Po analogiji s tradicionalnim građevnim materijalima, gustoća je i pokazatelj drugih mehaničkih svojstava, npr. čvrstoće ili stišljivosti (i propusnosti), pa prikazana prostorna varijabilnost upućuje i na znatan rasap ovih svojstava. Daljnja se prikladna mjerenja čvrstoće ili stišljivosti slojeva nisu provodila pa nema ni primjerenih brojčanih korelacija ili ocjena te varijabilnosti. S druge strane, jedini opaženi makroskopski fenomen na širem području su slijeganja gornje površine (što se i očekivalo), dok nekih drugih pokazatelja nestabilnosti nije bilo. Odlagalište je pokriveno početkom 2004. i obavljaju se redovna kontrolna opažanja pomaka.

2.3 Parametri posmične čvrstoće otpada

Za ocjene globalne stabilnosti tijela odlagališta pri izgradnji ili dugoročno nakon zatvaranja provode se analize stabilnosti s odgovarajućim parametrima čvrstoće materijala duž kritičnih kliznih ploha. Čvrstoća komunalnog otpada opisuje se, analogno geološkim i drugim znatim materijalima, s pomoću Coulombova kriterija čvrstoće. Prirast čvrstoće s normalnim naprežanjem opisuje frikcijske značajke materijala (kut trenja), dok odsječak na osi posmičnih naprežanja predstavlja "prividnu koheziju" budući da prave kohezije između raznorodnih čestica otpada nema.

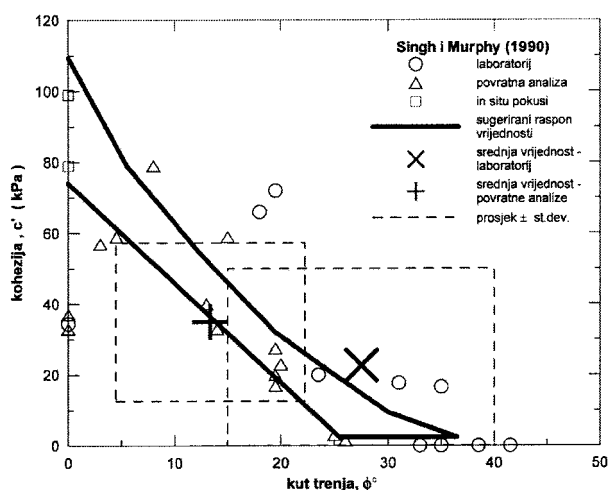
Posmična čvrstoća komunalnog otpada ovisi o sastavu i tipu njegovih sastavnica i tumači se analogijom s ponašanjem armiranog tla [3]. Miješani se otpad promatra kao kompozitni materijal koji čine dvije komponente: osnovnu strukturu čine čestice sitnog i srednjeg zrna nalik tlu (prema prije navedenoj klasifikaciji to su čestice promjera manjeg od 120 mm) koje pokazuju frikcijsko ponašanje, a "armaturu", tj. ojačavajuću strukturu daju vlaknaste sastavnice (plastični otpad, papir, karton, tekstili, granje drveća) koje doprinose prividnoj koheziji otpada. U ovakvoj idealizaciji pretpostavlja se slučajan raspored vlaknastih sastojaka i reprezentativni volumen se smatra izotropnim materijalom [3]. Očito je ovakva idealizacija vrlo gruba za detaljniji opis nepredvidivo heterogenog otpada u tijelu odlagališta, no i takav "model" omogućuje da se u laboratorijskim uvjetima ocijene bitne značajke pojedinih komponenata otpada. Za razliku od tla, posmična čvrstoća otpada ostvaruje se pri bitno većim deformacijama, pri čemu se vlaknaste komponente "aktiviraju" pri deformacijama znatno većim od 20% gdje je kut trenja čestične strukture u potpunosti mobiliziran.

Tablica 1. Pregled parametara čvrstoće otpada prema podacima iz literature

Lit.	Starost otpada	Kohezija	Kut trenja	Uređaj, metoda	Dodatni komentar
[8]	Svjež	16	40	LDS	/
	1 godina	16	33		/
	Svjež	23	24		/
	/	10	33,6		/
[9]	/	7	38	/	/
	9 mj.	7	42	jednostavan posmik	/
	Svjež	28	26,5	/	/
	/	10	23	/	predložene vrijednosti
	/	15	15	/	predložene vrijednosti
	/	10	25	povratna analiza	/
	/	15,7	21	direktan posmik	balirani otpad, slabo zbijen
	/	23,5	22		balirani otpad, dobro zbijen
	/	0	41	povratna analiza	testiranje specifikirano projektom
	/	0	25		normalno naprezanje ≈ 180 kPa
	/	0	28		normalno naprezanje ≈ 110 kPa
	/	0	30		normalno naprezanje ≈ 45 kPa
	/	0	34		normalno naprezanje ≈ 60 kPa
	/	10	18-43 (30,5)	in situ ; LDS	$14 \text{ kPa} < \sigma < 38 \text{ kPa}$
	/	20	0	povratna analiza	za normalno naprezanje ≤ 20 kPa
/	0	38	20 < nor. naprezanje ≤ 60 kPa		
/	20	30	za normalno naprezanje > 60 kPa		
7,5 god.	30, 44, 63,85, 105	12, 16, 18, 18, 18			
[10]	/	40	35	/	procijenjeno na osnovu istraživanja raznih autora
[11]	/	28-52 (38)	12-20 (17)	veliki aparat kružnog presjeka	otpad zasićen vodom
	/	15-43 (29)	19-26 (22)		prosušeni otpad
[12]	/	55	33	/	procijenjeno na osnovu literature i prethodnih mjerenja
[13]	/	10,5 – 11,4 (11)	13,2 – 14,4 (13,8)	povratna analiza	zapreminska težina je procijenjena
[14]	/	4	56	povratna analiza	/
[15]	/	43	26	direktan posmik	/
	/	0	39		pri pomaku od 25 mm, bioreaktorsko odlagalište
	/	17	33	jednostavan posmik	donja granica
	/	19	28	povratna analiza	/
[16]	/	24	18	in situ LDS	neporemećeni uzorak
	/	22	17		poremećeni uzorak
[17]	/	6,4-31,4	40,4-49,6	direktan posmik	/
[18]	svjež	0	26,4	direktan posmik	donje vrijednosti parametara čvrstoće, očvršćavajući model sa vlaknima
	star	0	17,7		
[19]	svjež, nezbijen	<5	38-42 (40)	/	/
	svjež	30-50 (40)	38-40 (39)	/	/
	razgrađen	5-15 (10)	23-27 (25)	/	/
	razgrađen	16-32 (24)	19-24 (21,5)	/	/
	razgrađen	0-10 (5)	17-23 (20)	/	/
[20]	10 – 15 god.	17	33	/	/

U uvjetima troosnih pritisaka otpad pokazuje kontinuirano očvršćivanje s porastom deformacija, a zbog velike stišljivosti i deformacija slom se i ne može dosegnuti u triaksijalnom pokusu, nego se definira mobilizirana čvrstoća pri nekoj relativnoj deformaciji (npr. 10% ili 20%). Parametri čvrstoće otpada određuju se iz terenskih podataka povratnim analizama dogođenih klizanja ili na probnim poljima, te laboratorijskim ili *insitu* pokusima, kao i za parametre tla. Ovi postupci uobičajeni su u mehanici tla, no svaki od njih za primjenu na otpad ima dodatne nedostatke i smanjenu pouzdanost [2] pa i dobivene ili prikazane rezultate treba kritički vrednovati.

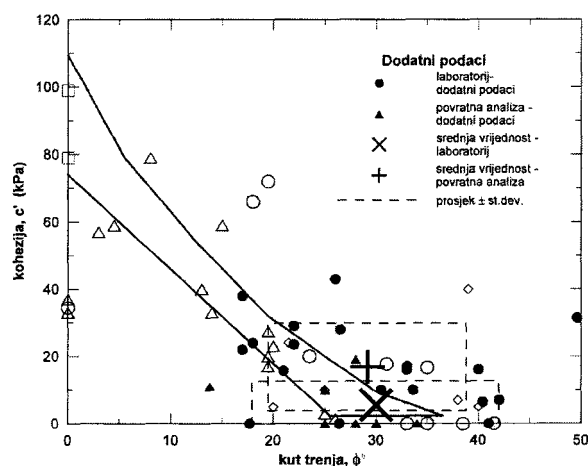
Često se parametri čvrstoće prikazuju u dijagramu Singha i Murphya [7] koji su prikazali raspon i odnose kohezije i kuta trenja otpada na osnovi manjeg broja rezultata povratnih analiza te laboratorijskih i *insitu* pokusa (slika 3.). Njihov je zaključak da je rasap rezultata prevelik za bilo kakve određene odgovore. Sugerirani uži raspon parametara odnosi se na vjerojatne minimalne i time konzervativne čvrstoće otpada. U tablici 1. i na slici 4. prikazani su dodatni podaci o parametrima otpada prikupljeni iz raznih objavljenih radova. Raspon parametara je znatan i prividna se kohezija otpada kreće u rasponu od 0 – 80 kPa, a kut trenja od 10 – 56 stupnjeva.



Slika 3. Prikaz odnosa parametara čvrstoće otpada prema Singhu i Murphyu [7]

Tablica 2. Statistički pokazatelji parametara čvrstoće otpada

Izvor	parametar	min	max	srednja vrijednost	standardna devijacija	koeficijent varijacije
Singh i Murphy laboratorij	kut trenja	0	41,5	27,5	12,47	0,453
	kohezija	0	72	22,67	27,02	1,192
Singh i Murphy povratne analize	kut trenja	0	26	13,36	8,89	0,665
	kohezija	1,5	79	34,93	22,37	0,640
Dodatni podaci laboratorij	kut trenja	17	49,6	29,16	9,65	0,331
	kohezija	0	43	16,85	12,93	0,767
Dodatni podaci povratne analize	kut trenja	13,8	56	29,98	12,03	0,401
	kohezija	0	19	5,5	7,13	1,297



Slika 4. Prikaz parametara čvrstoće otpada iz tablice 1.

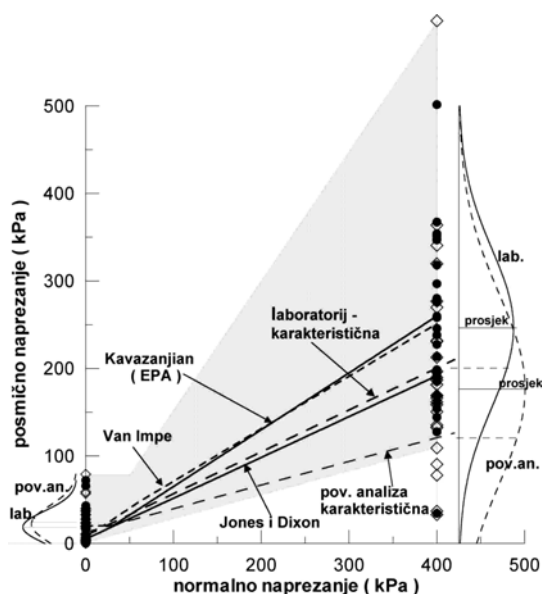
Valja napomenuti da su mnoge niske vrijednosti parametara u kontradikciji s terenskim opažanjima stabilnih pokosa odlagališta. Česta su stabilna odlagališta s pokosima 1V: 3H, pa i strmije ako prekrivni materijali dopuštaju. Nagib 1:3 odgovara kutu od 18,4°, što znači da bi (bez kohezije) trebala biti prisutna klizanja pokosa kroz otpad za sve niže referirane vrijednosti kuta trenja. Uz malu koheziju moguć je i manji kut trenja, no svejedno bi za navedeni nagib pokosa slom kroz otpad zahvaćao gornjih 1-2 m odlagališta.

Iako se iz prikaza vidi da je rasap podataka velik, osnovni statistički podaci za istovrsne grupe rezultata pokazuju sljedeće (tablica 2.):

- rasap rezultata izražen koeficijentom varijacije (omjer standardne devijacije i srednje vrijednosti) jest znatan za sve rezultate, no redovito je veći za prividnu koheziju nego za kut trenja,
- srednje vrijednosti kuta trenja su podjednake za oba skupa laboratorijskih podataka, a manju koheziju daju dodatni podaci,
- za povratne analize podaci Singha i Murphya daju znatno manji prosječni kut trenja i veću prosječnu koheziju od novijih podataka
- povratne analize i laboratorijski podaci iz dodatnih podataka daju podjednak prosječni kut trenja (oko

30 stupnjeva), no prosječna kohezija je osjetno manja za povratne analize.

Prikaz odnosa prividne kohezije i kuta trenja daje okvirni prikaz pojedinih parametara čvrstoće i njihova rasapa nezavisno jedan od drugog. U analizama stabilnosti primjenjuje se posmična čvrstoća koja ujedinjuje oba parametra. Na slici 5. prikazan je rasap čvrstoće otpada dobiven s pomoću parametara iz tablice 1. Zasjenjeno područje ilustrira znatne varijacije čvrstoće otpada koje se mogu postići s obzirom na veliki raspon mogućeg otpada, ali i teškoće uključene u mjerenja.



Slika 5. Raspon posmičnih čvrstoća otpada

Za upotrebu u projektnim analizama stabilnosti gdje nema lokalnih podataka, pojedini su autori preporučili projektne anvelope čvrstoće, npr:

- Jones i Dixon [2] predlažu projektnu liniju definiranu s kohezijom $c = 5$ kPa i kutem trenja $\varphi = 25^\circ$
- Kavazanijan [15] predlaže kombiniranu anvelopu sloma sa $c = 24$ kPa i $\varphi = 0^\circ$ do normalnog napreznja 30 kPa, te $c = 0$ kPa i $\varphi = 33^\circ$ za viša napreznja (ovu anvelopu sloma preporučuje i američka Agencija za zaštitu okoliša – EPA)
- Van Impe [9] predlaže sličnu kombiniranu anvelopu: $c = 20$ kPa i $\varphi = 0^\circ$ do normalnog napreznja 20 kPa, $c = 0$ kPa i $\varphi = 38^\circ$ za napreznja od 20 – 60 kPa, te $c = 20$ kPa i $\varphi = 30^\circ$ za napreznja veća od 60 kPa. (Ova krivulja daje slične čvrstoće kao b).

Ove su anvelope ucrtane u sliku 5. te se vidi da ima sličnosti i razlika, ovisno o bazi podataka iz koje su izvedeni. Taj prikaz ujedno i upućuje na oprez ako se projektne vrijednosti biraju samo na osnovi literature [2].

Na slici 5. prikazana je i dodatna obrada podataka sa slike 4. Prema prijedlogu Schneidera [21], da se karakteristične vrijednosti čvrstoće, X_k , biraju na osnovi statistike mjerodavnih podataka kao: $X_k = X_m - 0,5 SD$, gdje je X_m – srednja vrijednost rezultata pokusa, a SD – standardna devijacija, određene su i vrijednosti "karakterističnih" anvelopa čvrstoće otpada zasebno za laboratorijske rezultate i rezultate povratnih analiza. Statistička obrada uključila je sve podatke sa slike 4. Obrada je provedena za čvrstoće pri normalnim napreznjima od 0 i 400 kPa, što je omogućilo određivanje "karakteristične" kohezije i kuta trenja. Rezultati su također prikazani na slici 5., a broježani su podaci sljedeći:

- "karakteristične" vrijednosti kohezije i kuta trenja otpada
laboratorijski podaci: $c_k = 8,91$ kPa, $\varphi_k = 25,58^\circ$
povratne analize: $c_k = 12,65$ kPa, $\varphi_k = 15,11^\circ$
- prosječne vrijednosti kohezije i kuta trenja otpada
laboratorijski podaci: $c_m = 18,18$ kPa, $\varphi_m = 29,74^\circ$
(koeficijent varijacije 0,372)
povratne analize: $c_m = 24,23$ kPa, $\varphi_m = 20,84^\circ$
(koeficijent varijacije 0,672)

"Karakteristični" rezultati za laboratorijske pokuse dobro se poklapaju s preporukom Jonesa i Dixona, dok su rezultati za povratne analize osjetno niži u širem području normalnih napreznja. Visoka varijabilnost rezultata povratnih analiza može se tumačiti i različitim metodologijama pojedinih autora te neujednačenom pouzdanosti i potpunosti mjerodavnih podataka. Prosječne vrijednosti rezultata povratnih analiza daju čvrstoće bliže "karakterističnim" vrijednostima laboratorijskih podataka, a prosječne vrijednosti laboratorijskih pokusa bliske su preporučenim krivuljama Kavazanijana i Van Impea.

Ova obrada pokazuje i da preporuke Kavazanijana i Van Impea nisu konzervativne ako se usporede s objavljenim rezultatima većeg broja autora širom svijeta.

3 Parametri čvrstoće na kontaktima brtvenih slojeva

Na temeljnu plohu zatvorenog odlagališta između otpada i temeljnog tla postavlja se brtveni sustav koji treba spriječiti prolaz zagađene procjedne vode (eluat, filtrat) iz tijela odlagališta u temeljno tlo. Ovaj se sustav tradicionalno izvodio od slabo propusnih mineralnih materijala (obično visokoplastična glina) [25]. Takvi materijali u debljim slojevima propuštaju iznimno male količine tekućine. Uzevši u obzir dugotrajnost procesa raspada otpada, a time i proizvodnje zagađene tekućine, današnje smjernice za odlagališta otpada postavljaju vrlo stroge zahtjeve na (ne)propusnost podloge. S ciljem dodatne redukcije procjednih količina, ali i uštede na prikladnim zemljanim materijalima, danas se za brtvene slojeve intenzivno rabe geosintetici u kombinaciji s mineralnim materijalima.

Jednostavni kompozitni brtveni sustav za odlagališta komunalnog otpada ima više slojeva: na temeljno tlo polaže se sloj zbijene gline, iznad njega najčešće geomembrana od polietilena visoke gustoće, na nju se polaže zaštitni geotekstil, pa drenažni sloj za odvodnju zagađene vode, filtarski geotekstil i zaštitni sloj i tek na to se dovozi i zbija otpad. Geosintetici se danas proizvode i rabe u velikim količinama za razne svrhe, a na tržište neprestano dolaze novi ili poboljšani proizvodi.

Sa stajališta stabilnosti tijela odlagališta potencijalna klizna ploha može proći kroz temeljno tlo ili kroz brtveni sustav, slijedeći područja najmanje čvrstoće. Iskustvo je pokazalo da na lokacijama s uobičajenim nosivim temeljnim tlom kritični element za stabilnost odlagališta postaju slojevi brtvenog sustava, odnosno njihove dodirne plohe. Budući da u opisanom sustavu potencijalno sve dodirne plohe različitih materijala mogu biti kritične, treba odrediti čvrstoće i na dodirima geosintetika i na dodirima geosintetika sa zemljanim materijalima.

Posmična čvrstoća dodirnih ploha (sučelja) određuje se s pomoću prije navedenog Coulombova kriterija čvrstoće, pri čemu se, uz aproksimaciju anvelope čvrstoće pravcem, određuje kut trenja i odsječak na y-osi ($\tau_f = c + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi$, τ_f - posmična čvrstoća, σ_n - normalno naprezanje, φ - kut trenja, c - kohezija). Za kontakte različitih materijala za ovaj odsječak rabi se pojam adhezija (oznaka a).

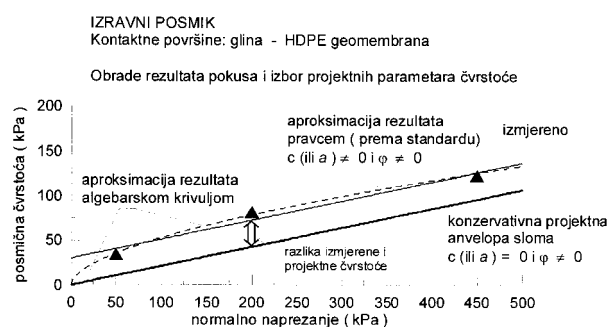
Ispitivanja pokazuju da čvrstoća na kontaktima doseže svoj maksimum (vršna čvrstoća) pri razmjerno malom pomaku (deformaciji), a zatim pada na konačnu vrijednost pri velikim pomacima (rezidualna vrijednost). Budući da se puna čvrstoća otpada ostvaruje pri relativno velikim pomacima, zajedničko klizno tijelo kroz otpad i brtvene slojeve prije potpunog sloma doživljava velike pomake, pa su za analize stabilnosti mjerodavne vrijednosti rezidualnih (konačnih) čvrstoća kontakata brtvenih slojeva.

Objavljena ispitivanja čvrstoća na sučeljima raznih geosintetika ili geosintetika s tlom [22, 23, 3] pokazuju razmjerno široke raspone (tablica 3.). Ti su rasponi posljedica raznolikosti proizvoda na tržištu, ali i teškoća s provođenjem laboratorijskih pokusa koji potpuno odražavaju realno stanje na lokaciji. Usporedni pokusi u više europskih laboratorija sredinom devedesetih godina [24] pokazali su i veliku varijabilnost rezultata među laboratorijima za iste proizvode, pa novi standardi imaju strože zahtjeve na konstrukcije aparata, postupke pripreme uzorka i interpretacije. Unatoč tome, inherentna varijabilnost tla i proizvedenih geosintetičkih materijala zahtijeva da se pokusi određivanja čvrstoće kontakata izvode učestalo i prilikom prihvaćanja novih materijala i tijekom ugradnje kao sastavni dio kontrole kvalitete.

Tablica 3. Parametri posmične čvrstoće na dodirnim ploham geosintetika i tla

a) GEOSINTETIK - TLO	
geomembrana (HDPE) - pijesak	$\Phi = 15^\circ$ do 28°
geomembrana (HDPE) - glina	$\Phi = 5^\circ$ do 29°
geotekstil - pijesak	$\Phi = 22^\circ$ do 44°
bentonitni tepih - pijesak	$\Phi = 20^\circ$ do 25°
bentonitni tepih - glina	$\Phi = 14^\circ$ do 16°
hrapava HDPE - zbijena glina	$\Phi = 7^\circ$ do 35° $c = 20 - 30$ kPa
hrapava HDPE - pijesak	$\Phi = 30^\circ$ do 45°
geotekstil - glina	$\Phi = 15^\circ$ do 33°
b) GEOSINTETIK - GEOSINTETIK	
geomreža - geomembrana (HDPE)	$\Phi = 6^\circ$ do 10°
geomembrana (HDPE) - geotekstil	$\Phi = 8^\circ$ do 18°
geotekstil - geomreža (geonet)	$\Phi = 10^\circ$ do 27°
bentonitni tepih - hrapava HDPE	$\Phi = 15^\circ$ do 25°
bentonitni tepih - geomembrana (HDPE)	$\Phi = 8^\circ$ do 16°
bentonitni tepih - bentonitni tepih	$\Phi = 8^\circ$ do 25° $c = 8$ do 30 kPa
hrapava HDPE - geomreža	$\Phi = 10^\circ$ do 25°
hrapava HDPE - geotekstil	$\Phi = 14^\circ$ do 52°

Rezultati pokusa pokazuju da, slično kao kod samog tla, linija posmične čvrstoće na kontaktu nije pravac, nego blago zaobljena krivulja, posebice u području manjih normalnih naprezanja. Aproksimacija rezultata pokusa pravcem daje vrijednosti adhezije i kuta trenja. Vrijednost interpretirane adhezije (za normalno naprezanje $\sigma_n = 0$) obično nije fizikalno relevantna (nije primijećeno sljep-ljivanje gline i geomembrane bez pritiska). Stoga se pri izboru projektnih parametara čvrstoće za analize stabilnosti često zanemaruje vrijednost adhezije (kohezije), tj. uzima se projektno c ili $a = 0$ te se čvrstoća računa samo s parametrom $\varphi \neq 0$ (obično interpretiranim iz pokusa kao prosječna ili najniža vrijednost). Takav izbor projektnih parametara pokazuje se kao konzervativan, budući da se zanemaruje izmjereni doprinos te (prividne) adhezije posmičnoj čvrstoći, kako je ilustrirano na slici 6.



Slika 6. Ilustrativni prikaz obrade rezultata pokusa i izbora parametara

U ranoj fazi projektiranja kad nema neposrednih rezultata mjerenja za odabrane materijale pa se rabe rezultati iz literature, ili kad postoji samo preliminarni pokus, konzervativni izbor parametara može biti opravdan kao mjera opreza. Ako analize stabilnosti pokazuju zadovoljavajuću zalihu sigurnosti od sloma, takva konzervativna projektna anvelopa čvrstoće ujedno postaje i projektni kriterij za ocjenu materijala.

U kasnijim fazama projektiranja ili početkom izvedbe, kad se provede veći broj pokusa za raspon materijala i uvjeta izvedbe, smatra se [2] previše konzervativnim pretpostavljati da je $a = 0$ i odabrati samo interpretirani kut trenja kao mjerodavan. Povoljnije je uzeti u obzir izmjerene vrijednosti čvrstoća te napraviti oprezan izbor karakterističnih vrijednosti, primjerice jednostavnom statističkom obradom, kako je prije navedeno.

Za slučaj povratnih analiza, kad se pokušava rekonstruirati stvarna nosivost sustava i zalih sigurnosti, ili kad se interpretiraju uočene pojave nestabilnosti, upravo je potrebno uzeti u obzir realno ponašanje koje je određeno mjerenjem. Za tu se svrhu ovdje predlaže upotreba nelinearne anvelope sloma koja točnije opisuje rezultate mjerenja u cijelom rasponu mjerenja. Današnji programi za proračune stabilnosti većinom omogućavaju uporabu nelinearnog zakona čvrstoće pa nema većih teškoća da se takvi proračuni rutinski provedu.

Za ilustraciju ovog prijedloga prikazuje se obrada rezultata izmjerenih rezidualnih čvrstoća na kontaktu hrapave HDPE geomembrane i glinene podloge za kontrolno ispitivanje na odlagalištu Jakuševac. Obrada rezultata sastojala se u sljedećem: osim linearne funkcije, izmjerene čvrstoće aproksimirane su s tri jednostavnije algebarske krivulje, odabrane empirijski, koje zadovoljavaju uvjet da pri nultom normalnom naprežanju imaju vrijednost na ordinati (čvrstoća) jednaku (ili blisku) nuli. Odabrane se funkcije (logaritmiranjem) mogu transformirati u pravac i primijeniti u regresijskoj analizi za određivanje najpovoljnijih parametara koji opisuju skup mjerenih rezultata. Mjeru poklapanja krivulje s rezultatima daje korelacijski koeficijent r , pri čemu je za idealno poklapanje $r = 1$.

Odabrane su sljedeće krivulje (uz $Y = \tau_f$, a $X = \sigma_n$):
 logaritamska $Y = L_1 \ln(X) + L_2$ (mjerodavna za veće vrijednosti X)

$$\begin{aligned} \text{korijska} & Y = A_0 X^{0,5} \\ \text{opća potencija} & Y = A_1 X^n \end{aligned}$$

Obrade linearnom regresijom provedene su pojedinačno za svaki pokus i skupno za sve pokuse. Ovdje se prikazuju samo rezultati za jedan pokus i skupni prosječni rezultat. Za usporedbu su prikazane i vrijednosti linearne funkcije

Dobiveni su sljedeći rezultati:

Test 1

$$\text{linearna funkcija } Y = 0,248 * X + 38,0127 \quad r^2 = 0,9698$$

$$\text{logaritamska } Y = 45,512 * \ln(X) - 136,49 \quad r^2 = 0,9859$$

$$\text{korijska } Y = 6,842 * X^{0,5} \quad r^2 = 0,9961$$

$$\text{opća potencija } Y = 5,226 * X^{0,5477} \quad r^2 = 0,9985$$

Skupno

$$\text{linearna funkcija } Y = 0,226 * X + 32,937 \quad r^2 = 0,9257$$

$$\text{logaritamska } Y = 41,745 * \ln(X) - 127,4 \quad r^2 = 0,9509$$

$$\text{korijska } Y = 6,140 * X^{0,5} \quad r^2 = 0,9533$$

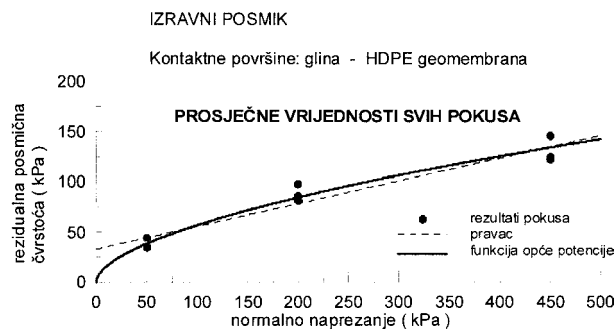
$$\text{opća potencija } Y = 4,096 * X^{0,5711} \quad r^2 = 0,9672$$

Budući da su u pojedinačnom testu statistički obrađene samo po 3 točke, visoki stupanj korelacije za većinu krivulja nije neočekivan, no iz toga se ne mogu izvoditi značajniji zaključci.

Za obrade svih rezultata može se uočiti sljedeće:

- najslabije poklapanje ostvaruje se za linearnu funkciju (skupno i pojedinačno),
- aproksimacija funkcijom opće potencije pokazuje za obje skupine rezultata vrlo dobro poklapanje, a korijska i logaritamska funkcija daju usporedivo dobre rezultate. Logaritamska funkcija nije upotrebljiva pri manjim normalnim naprežanjima.

Na slici 7. prikazane su aproksimacije pravcem i funkcijom opće potencije za prosjek svih rezultata.



Slika 7. Prikaz interpretacije rezultata pokusa pravcem i algebarskom krivuljom

4 Zaključak

Ocjena globalne stabilnosti odlagališta komunalnog otpada uključuje oprezan izbor mjerodavnih parametara otpada i temeljnih brtvenih slojeva. Mehanička svojstva otpada ovise o njegovim sastavnicama koje se kreću u širokom rasponu i promjenljive su s vremenom. Vrijednosti parametara otpada iz literature pokazuju znatnu varijabilnost i imaju ograničenu upotrebljivost za buduće primjene, jer se očekuju promjene sastava i načina

obrade otpada ovisno o promjenama u društvu i načinu gospodarenja otpadom. Iz tih je razloga posebno važno kontinuirano prikupljanje neposrednih podataka i provođenje odgovarajućih mjerenja na odlagalištima.

Dodirne plohe slojeva umjetnih i prirodnih materijala u temeljnim brtvenim slojevima najčešće su kritična mjes-

ta za stabilnost tijela odlagališta otpada. Inherentna varijabilnost svojstava geosintetika i zemljanih nasipa omogućuje generalizacije mjerodavnih parametara. Racionalizacije u primjeni su moguće za pojedinačne materijale i njihove kombinacije uz primjenu dovoljnog skupa podataka mjerenja po suvremenim standardima.

LITERATURA

- [1] Milanović, Z.; Radović, S.; Vučić, V.: *Otpad nije smeće*, Gospodarstvo i okoliš, V. Gorica, 2002.
- [2] Jones, D. R. V.; Dixon, N.: *Stability of Landfill Lining Systems: Report No. 1 – Literature Review* (R&D Technical Report P1-385/TR1), Environment Agency, Rio House, Waterside Drive, Aztec West, Almondsbury, Bristol, BS32 4UD, 2003.
- [3] König, D.; Jessberger, H. L.: *Waste Mechanics*, ISSMFE Technical Committee TC5 on Environmental Geotechnics, 1997., pp. 35-76
- [4] Fasset, J. B.; Leonards, G. A.; Repetto, P. C., *Geotechnical properties of municipal solid wastes and their use in landfill design*, Proceedings of WASTETECH '94 – Landfill Technology Conference. National Solid Waste Management Association, Charleston, SC (USA) 1994.
- [5] Koerner, R. M.; Soong, T.: *Assessment of Ten Landfill Failures Using 2-D and 3-D Stability Analysis Procedures*, 2. Österreichische geotechniktagung, Februar 1999.
- [6] Maertens, J.; Drnjević, B.; Verić, F.; Ivšić, T.: *Rehabilitation of landfill Jakuševac-Preliminary report of Task Force Group*, Zagreb, January 2004.
- [7] Singh, S.; Murphy, J.: *Evaluation of the stability of sanitary landfills*, Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice, ASTM STP 1070, Arvid Landva, G. David Knowles, editors, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990.
- [8] Landva, A. O.; Clark, J. I.; Weisner, W. R.; Burwash, W. J.: *Geotechnical Engineering and Refuse Landfills*, 6th National Conference On Waste Management in Canada, Vancouver, British Columbia, 7.-9. 11. 1984.
- [9] Van Impe, W. F.: *Environmental geotechnics – ITC5 – reports and future goals*, Geotechnical Hazards – proceedings of the XIth Danube – European conference on soil mechanics and geotechnical engineering, Poreč, Croatia, 25-29 May 1998., pp. 127-155
- [10] Eid, H. T.; Stark, T. D.; Evans, W. D.; Sherry, P. E.: *Municipal solid waste slope failure. I: Waste and foundations soil properties*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 126, No. 5, May, 2000, pp. 397-407
- [11] Mulabdić, M.; Sesar, S.; Zgaga, V.: *Ispitivanje parametara čvrstoće za analize stabilnosti odlagališta otpada Jakuševac*, V. Međunarodni simpozij Gospodarenje otpadom - Zagreb 98, 25-27. 11. 1998., pp. 413-420
- [12] Kovačević-Zelić, B.; Kvasnička, P.; Domitrović, D.: *Stability Analysis for the Landfill Jakusevec*, Proceedings of the 12th Danube-European Conference, Passau, 27-28 May 2002., pp. 503-506
- [13] Vukelić, A.; Kovačević-Zelić, B.; Drnjević, B.: *Landslide at the Jakusevec landfill*, Proceedings of the Third European Geosynthetic Conference, Munich, Germany, 1.-3. March 2004., pp. 87-92
- [14] Kovačić, D.; Čorko, B.: *Mehanička svojstva gradskog otpada*, 1. Kongres Hrvatskog društva za mehaniku, 1994., pp. 259-269
- [15] Kavazanjian, Jr. E.: *Mechanical properties of municipal solid waste*, Proceedings Sardinia 01, 8th International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, October 2001, Vol.3, pp. 415-424
- [16] Mazzucato, A.; Simonini, P.; Colombo, S.: *Analysis of block slide in a MSW landfill*, Proceedings Sardinia 99, Seventh International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, 4-8 October 1999.
- [17] Zhu, X.; Jin, J.; Fang, P.: *Geotechnical behavior of the MSW in Tianziling landfill*, Journal of Zhejiang University, Vol.4, No.3, pp. 324-330, May-June 2003.
- [18] Kölsch, F.: *The bearing behaviour of domestic waste and related consequences for stability*, Proceedings Sardinia 93, Fourth International Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, 11-15 October 1993., Vol.2, pp. 1393-1410
- [19] Greco, O. Del; Oggeri, C.: *Geotechnical parameters of sanitary wastes*, Proceedings Sardinia 93, Fourth International Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, 11-15 October 1993., Vol.2, pp. 1421-1431
- [20] Gabr, A.; Valero, S. N.: *Geotechnical properties of municipal solid waste*, Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol 18., No. 2, June 1995, pp. 241-251
- [21] Schneider, H. R.: *Definition and determination of characteristic soil properties*, Proc. 14th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Hamburg 1997., Vol. 4, pp. 2271-2274
- [22] Dixon, N.; Murray, E. J.; Jones (Eds) D. R. V.: *Geotechnical engineering of landfills*, Thomas Telford, 1998.
- [23] Koerner, R. M.: *Designing with Geosynthetics*, 4th edition, Prentice Hall, 1998.
- [24] Stoewahse, C.; Dixon, N.; Jones, D. R. V.; Blumel, W.; Kamugisha, P.: *Geosynthetic interface shear behaviour: Part 1 Test methods*, Ground Engineering, February 2002., pp. 35-41
- [25] Znidarčić, D.; Kovačić, D.; Kvasnička, P.; Mulabdić, M.: *Geotehnologija pri odlaganju komunalnog otpada*, Hrvatsko društvo građevinskih inženjera, Građevni godišnjak, 1996.