

Primljen / Received: 28.2.2023.

Ispravljen / Corrected: 21.11.2023.

Prihvaćen / Accepted: 25.1.2024.

Dostupno online / Available online: 10.4.2024.

Utjecaj tipova tla i geomembrana na ponašanje sučelja i posmičnu čvrstoću

Autori:

Dr.sc. **Develioglu Inci**, dipl.ing.građ.

Sveučilište Izmir Katip Celebi, Izmir, Turska

Odjel za građevinarstvo

inci.develioglu@ikcu.edu.trIzv.prof.dr.sc. **Pulat Hasan Firat**, dipl.ing.građ.

Sveučilište Izmir Katip Celebi, Izmir, Turska

Odjel za građevinarstvo

hfirat.pulat@ikcu.edu.tr

Autor za korespondenciju

Prethodno priopćenje

Develioglu Inci, Pulat Hasan Firat

Utjecaj tipova tla i geomembrana na ponašanje sučelja i posmičnu čvrstoću

U ovom je radu ispitano smicanje sučelja između geomembrana i tla. U istraživanju su primijenjeni pijesak/bentonit (80/20), drobljeni pijesak, riječni pijesak, drobljeni šljunak i riječni šljunak. Polivinil kloridi su njegovani u slanoj vodi molarne mase 0,5, a polietilen visoke gustoće njegovan je u procjednoj vodi krutog komunalnog otpada osam mjeseci. Pokusi izravnog posmika izvedeni su primjenom njegovanih geomembrana. Rad preporučuje upotrebu drobljenog šljunka u projektima koji upotrebljavaju polivinil-klorid i polietilen visoke gustoće. Efektivni kutovi trenja sučelja koja su bili izloženi učincima slane vode i procjednih voda iz komunalnog krutog otpada, smanjili su se čak i nakon osam mjeseci, a navedeni je učinak smanjenja potrebno uzeti u obzir u budućim projektima. Pri realizaciji projekata koji uključuju geomembrane izložene procjednoj vodi od komunalnog otpada, posebno na odlagalištima, treba uzeti u obzir potencijalnu štetu koja će nastati tijekom vremena i odabrati odgovarajuće projektne parametre. U suprotnom može doći do katastrofa koje uzrokuju gubitak života i imovine.

Ključne riječi:

geomembrana, posmična čvrstoća, sučelje, efektivni kut unutarnjeg trenja, ispitivanje izravnim posmikom

Research Paper

Develioglu Inci, Pulat Hasan Firat

Effects of soil and geomembrane types on interface and shear strength behaviour

The interface shear behaviour between the geomembranes and soils was studied. Sand/bentonite (80/20), crushed sand, river sand, crushed gravel, and river gravel were used in this study. Polyvinyl chlorides were cured in the 0.5 molar saltwater and high-density polyethylene was cured in municipal solid waste leachate for eight months. Direct shear experiments were performed using cured GMs. This study recommends the use of crushed gravel in projects that use polyvinyl chloride and high-density polyethylene. The interface friction angles, which were exposed to the effects of saltwater and municipal solid waste leachate, decreased even after eight months, and this reduction effect should be considered in future projects. When designing projects involving GMs exposed to MSW leachate, particularly in landfills, potential damage over time should be considered, and appropriate design parameters should be selected. Failure to do so can lead to disasters that cause the loss of life and property.

Key words:

geomembrane, interface shear strength, internal friction angle, direct shear test

1. Uvod

Učinkovite tehnike armiranja tla unaprijedile su građevinsku praksu [1-2]. S tim u vezi, uporaba geosintetika u građevinskoj industriji je porasla posljednjih godina te su postali jedan od najpopularnijih građevnih materijala [3-11]. Geosintetici se ne upotrebljavaju samo u svrhu ojačanja, već i za veliki broj inženjerskih funkcija kao što su odvajanje, filtracija, drenaža i zadržavanje. Uz mogućnost kontrole kvalitete, aktivno tržište koje je ekonomično i vremenski učinkovito čini geosintetike poželjnim, čak i za složena rješenja. Geomembrane (GM) su jedan od najčešće primjenjivanih geosintetika u raznim primjenama u građevinarstvu, kao što su skladišta krutog otpada, ribnjaci (umjetna jezera), bazeni za obradu i navodnjavanje, spremnici, cijevi za otpadnu vodu, izolacija tunela, korita i kanali [12, 13]. U praktičnim primjenama, GM su uglavnom u kontaktu s tlom. Međutim, u projektiranju se većinom ne uzima u obzir trenje na sučelju. To je dovelo do nekoliko građevinskih neuspjeha, kao što je pomak skladišnog pogona u Kettleman Hillsu u Kaliforniji [14]. Utvrđeno je da je do smicanja došlo na sučelju tla i geomembrane. Zbog ograničenog broja literature, inženjeri često smanjuju efektivni kut unutarnjeg trenja (1/2 ili 2/3) pri određivanju efektivnog kuta trenja sučelja, kao što je predloženo u udžbenicima [15, 16]. Budući da su neki istraživači utvrdili da redukcijski faktor može biti manji od 2/3 ili čak manji od 1/2, potrebno je detaljno proučiti ponašanje sučelja između različitih tala i geomembrana [17-20].

Kada se u literaturi prouče istraživanja s geosinteticima, vidi se da mnoga istraživanja ispituju učinak vrste tla na posmičnu čvrstoću sučelja tlo – geosintetik. Fleming i sur. [21] ispitivali su smicanje sučelja nezasićenih i glatkih geomembrana. Tip geomembrane bio je polietilen visoke gustoće (engl. *high-density polyethylene* – HDPE) debljine 1,5 mm. Primijenjena su tri različita tipa tla: prašinsti pijesak, pijesak Ottawa i mješavina pijeska Ottawa i bentonita. Maleni pretvarač pornog tlaka postavljen je u modificirani uređaj za ispitivanje izravnim posmikom. Potom je izmjeren prekomjerni tlak porne vode, a rezultati su protumačeni u odnosu na ukupna i efektivna naprezanja. Rezultati ispitivanja pokazali su da su efektivni kutovi trenja prašinstog pijeska i pijeska Ottawa bili 31,8° do 21,0° i 35,5° do 14,1°, odnosno 35,5° do 14,1°. Veći efektivni kutovi trenja sučelja dobiveni su pri većoj suhoj gustoći nanošenja, a niži efektivni kutovi trenja na sučelju dobiveni su pri većem udjelu vode. Smanjenje efektivnog kuta trenja autori su objasnili kao grebanje i klizanje pri niskom normalnom naprezanju i oranje pri visokom normalnom naprezanju. Chai i Saito [22] proučavali su parametre posmične čvrstoće sučelja geomembrane i glinovitog tla pomoću uređaja za ispitivanje izravnim posmikom velikih razmjera. Prah kvarca i bentonita pomiješan je s glinovitim tlom u omjeru 30/70. Primijenjena su tri tipa geosintetika: polivinil-klorid (PVC), polietilen (PE) i HDPE. Dimenzije gornje ploče velikog uređaja za izravno smicanje bile su 200 x 450 x 100 mm³ a onih donje ploče 200 x 200 x 70 mm³. Za pokuse su primijenjena normalna naprezanja od 50 kPa, 80 kPa i 100 kPa. Rezultati ispitivanja

pokazali su da je maksimalna vrijednost prionjivosti dobivena za sučelje glinene mješavine i PVC geomembrane. Efektivni kutovi trenja sučelja bentonita i geomembrane bili su prilično mali (3° do 4°). Budući da se voda istisnula iz bentonita i pojavila na granici tijekom ispitivanja posmikom, pretpostavljeno je da je formirana vodena membrana između geomembrane i čestica bentonita. Stoga je efektivni kut trenja sučelja bio nizak. U svim je uzorcima posmična čvrstoća sučelja bila približno 55 % niža od posmične čvrstoće tla. U kontekstu proučavanja radova koji ispituju učinak geosintetika i vrste tla, Frost i sur. [23] istraživali su učinak hrapavosti površine geomembrane, uglatosti tla i normalnog naprezanja na posmičnu čvrstoću sučelja. Prva serija ispitivanja izravnim posmikom uključivala je ispitivanje zaobljenog pijeska s tri različite vrijednosti hrapavosti geomembrane pri normalnom naprezanju od 100 kPa. Druga serija uključivala je uglati pijesak s dvije različite vrijednosti hrapavosti geomembrane pod normalnim naprezanjem od 100 kPa. Provedena su dva dodatna ispitivanja primjenom zaobljenog i uglatog pijeska pri normalnom naprezanju od 300 kPa kako bi se odredili učinci normalnog naprezanja. Ispitivanja su provedena primjenom modificiranog uređaja za izravno smicanje (100 x 100 x 38 mm³) s brzinom smicanja od 0,25 mm/min. Uzorak tla stavljen je u kutiju za smicanje pluvijalnom metodom s relativnom gustoćom od 80 %. Pomak potreban da gruba geomembrana (1,5 mm) postigne vršno posmično naprezanje bio je veći od pomaka potrebnog za glatku geomembranu (0,3 mm). Također, vršni i rezidualni kut trenja sučelja značajno su porasli s promjenama u hrapavosti do kritične vrijednosti hrapavosti ($\approx 1,35$), a zatim su ostali konstantni. Efektivni kut trenja sučelja povećavao se s povećanjem hrapavosti. Povećanjem hrapavosti došlo je do pozitivnog utjecaja na efektivni kut trenja sučelja, ali ne i promjenom normalnog naprezanja. Adamska [24] je odredio ponašanje posmične čvrstoće sučelja HDPE geomembrane i letećeg pepela. Za ispitivanja je primijenjen tradicionalni uređaj za ispitivanje izravnim posmikom s cilindričnom kutijom za smicanje. Upotrijebljene su dvije HDPE geomembrane, glatka i hrapava, svaka debljine 1,5 mm. Leteći je pepeo stavljen u kutiju s maksimalnom suhom jediničnom težinom i optimalnim udjelom vlage prema standardnoj Proctorovoj energiji. Također, kako bi se odredio učinak udjela vode na posmičnu čvrstoću sučelja, promijenjene su vrijednosti udjela vode ($w_{opt} \pm 2,5$ i $w_{opt} \pm 5$). Rezultati ispitivanja pokazali su da je udio vode imao mali učinak na posmičnu čvrstoću sučelja glatkih geomembrana. Gruba geomembrana ima veći efektivni kut trenja sučelja od glatke geomembrane. Minimalna smična čvrstoća sučelja dobivena je pri najvećem udjelu vode za grubu geomembranu. U ovom su radu ispitane posmične čvrstoće sučelja formirane između dviju vrsta geomembrana (PVC i HDPE) i pet različitih tala (mješavina pijeska/bentonita, drobljeni pijesak, riječni pijesak, drobljeni šljunak i riječni šljunak). Prvo su određena geotehnička svojstva i efektivni kutovi unutarnjeg trenja (ϕ) tala. Zatim su formirana sučelja tlo – geomembrana u kutiji za izravno smicanje te su dobiveni kutovi trenja (δ) sučelja. Osim toga, PVC geomembrane su njegovane u slanoj vodi (SW), a

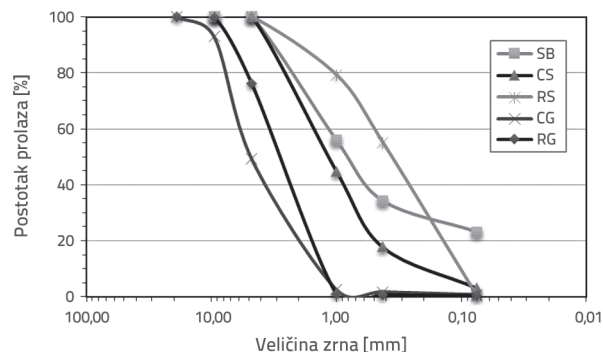
HDPE geomembrane su njegovane u procjednoj vodi krutog komunalnog otpada (engl. *municipal solid waste* - MSW) u laboratoriju tijekom osam mjeseci kako bi predstavljale okoliš koji nastaje na odlagalištima krutog otpada i građevinama u blizini obale. Pokusi su provedeni primjenom uređaja za izravno smicanje ($100 \times 100 \text{ mm}^2$). Vrijednosti normalnog naprezanja primijenjene su u rasponu ispitivanja izravnim posmikom između 12,25 i 784 kPa. Na temelju rezultata ispitivanja utvrđeni su učinci uglatosti, veličine zrna, porne tekućine i normalnog naprezanja na posmično ponašanje sučelja. Najvažnije inovacije i nužnosti koje ovo ispitivanje razlikuju od drugih jesu primjena dviju različitih vrsta geomembrana i nekoliko različitih tipova tla. Na taj su način dobiveni nalazi o odnosu između vrsta geomembrana i pet različitih tala. Najvažniji propust u prethodnim istraživanjima na ovu temu jest nedostatak istraživanja o efektivnim kutovima trenja sučelja njegovanih uzoraka geomembrana. Stoga su negativni učinci podzemnih voda i procjednih tekućina na GM zanemareni tijekom faze izrade projekta. U ovom se radu uzimaju u obzir negativni učinci podzemnih voda ili otpadnih procjednih voda, kojima su geomembrane izložene tijekom projektiranja građevina blizu obale ili skladišta komunalnog krutog otpada.

2. Materijali i metode

2.1. Tla

U ovom je radu primijenjeno pet različitih tala, tj. mješavina pijeska/bentonita (80/20) (SB: veličina čestica 2,0 – 0,0 mm),

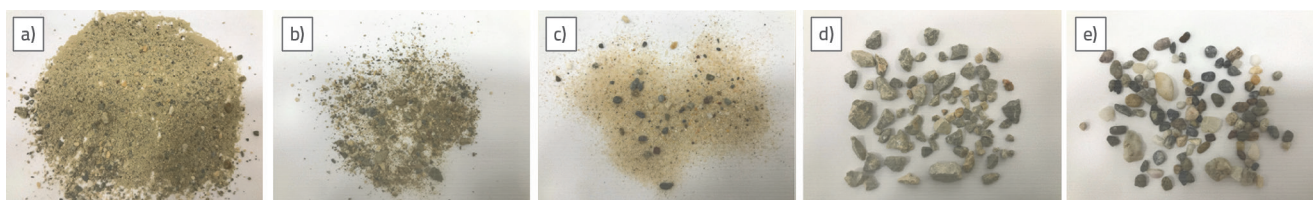
drobljeni pijesak (CS: veličina čestica 2,0 – 0,075 mm), riječni pijesak (RS: veličina čestica 2,0 – 0,075 mm), drobljeni šljunak (CG: veličina čestica 10,0 – 1,0 mm) i riječni šljunak (RG: veličina čestica 10,0 – 1,0 mm). Navedena su tla poželjna jer se često primjenjuju za temelje zgrada, skladišta otpada, ribnjake, umjetne bazene, zajedno s geomembranama. Također, utjecaj veličine zrna (grubo – fino) i uglatosti (uglato – okruglo) ispitani su pomoću ovih tala. Raspodjela veličine čestica pet tala prikazana je na slici 1. Geotehnička klasifikacijska svojstva uzoraka tala navedena su u tablici 1. Slika 2. prikazuje fizikalni izgled tala.



Slika 1. Raspodjela veličine čestica tla

2.2. Geomembrane

U radu su primijenjene komercijalno dostupne glatke HDPE i PVC geomembrane. Razlozi zašto se navedenim geomembranama



Slika 2. Fizikalni izgled tala: a) pijesak/betonit (SB); b) drobljeni pijesak (CS); c) riječni pijesak (RS); d) drobljeni šljunak (CG); e) riječni šljunak (RG)

Tablica 1. Geotehnička klasifikacijska svojstva tala

Svojstvo	SB	CS	RS	CG	RG
Specifična težina, G_s	2,46	2,68	2,67	2,63	2,62
Granica tečenja, LL [%]	60,7	-	-	-	-
Granica plastičnosti, PL [%]	30,2	NP	NP	NP	NP
Maksimalna suha jedinična težina, $\gamma_{dry,max}$ [kN/m^3]	17,0	17,3	17,1	17,6	17,2
Optimalni udio vlage, w_{opt} [%]	13,2	11,2	11,7	6,5	4,7
D_{10}	-	0,19	0,11	1,29	1,10
D_{30}	0,2	0,69	0,19	2,77	1,90
D_{60}	1,5	1,70	0,50	5,95	3,64
Koeficijent jednolikosti, C_u	-	8,95	4,55	4,61	3,31
Koeficijent zakrivljenosti, C_c	-	1,47	0,66	1,00	0,90
USCS	SC	SW	SP	GW	GP

Tablica 2. Bitne karakteristike geomembrana

PVC			HDPE		
Bitne karakteristike	Jedinica	Vrijednost	Bitne karakteristike	Jedinica	Vrijednost
Debljina	mm	1.5	Debljina	mm	1,5
Otpornost na paranje	N	150	Otpornost na pukotine pod naprezanjem	h	>200
Otpor spojeva na smicanje	N/5 cm	800	Istezanje kod popuštanja	%	>12
Vlačna čvrstoća	N/mm ²	15	Vlačno naprezanje kod loma	N/mm ²	>26
Prekidno istezanje	%	250	Prekidno istezanje	%	>700
Vodonepropusnost	-	Potpuno	Vodopropusnost	m ³ /m ² ·d	<10 ⁻⁶
Umjetno starenje - vodonepropusnost	-	Potpuno	Otpornost na vremenske uvjete	%	<25
Otpornost na kemikalije - vodonepropusnost	-	Potpuno	Snaga oksidacije	%	<25
Otpornost na udar	mm	1500	Granica popuštanja	N/mm ²	>16
Otpornost na statičko opterećenje	kg	20	Statička otpornost na probijanje	N	3700

daje prednost u građevinarstvu jesu svojstva poput visoke vlačne čvrstoće pri malim naprezanjima, poput jeftine montaže i dugotrajne otpornosti na vremenske uvjete. PVC geomembrana je zaštitni sloj sastavljen od sintetičkih sirovina i primjenjuje se za hidro- i toplinsku izolaciju. PVC je akronim za riječ polivinil-klorid. Radi se o vrsti polimera koji se proizvodi iz ulja i soli u petrokemijskim postrojenjima. Proizvodi se miješanjem PVC sirovine s omekšivačima, stabilizatorima i raznim dodacima u miješalici, preradom u ekstruzijskom sustavu na odgovarajućoj temperaturi i homogenim oblikovanjem. PE je naziv za etilen u obliku monomera. Etilen se pretvara u polietilen pomoću nekoliko metoda polimerizacije. HDPE geomembrana je geosintetička obloga nastala ekstruzijom polietilena visoke gustoće i homogena je oblikovana kalendarskim sustavom. Primjenjuje se za osiguravanje nepropusnosti u projektima, kao što su gradska odlagališta krutog otpada, odlagališta rudarskog otpada, spremnici kiseline, ribnjaci i kanali za navodnjavanje. Svojstva geomembrana koje su naveli proizvođači prikazana su u tablici 2.

2.3. Porna tekućina

Procjedna voda sintetičkog otpada (MSW) primijenjena u ovom radu, čiji je sastav opisao Hrapovic [25], proizvedena je miješanjem različitih kemijskih spojeva u destiliranoj vodi. Procjedne vode MSW-a pogodan su medij za rast i održavanje acetogenih, metanogenih i sulfidogenih bakterija koje sudjeluju u fazi mineralizacije anaerobne razgradnje. Osim toga, kao moguća varijanta u procjednim vodama s odlagališta otpada upotrijebljena je mješavina koja sadrži samo tri masne kiseline s pH = 3,45 [25]. Kemijski sastav procjedne vode MSW-a prikazan je u tablici 3.

PVC geomembrane se uglavnom upotrebljavaju kao strukturni temelji za podrumске spremnike. Kada je struktura blizu obale, PVC geomembrane primijenjene u temeljima izložene su slanoj vodi. Stoga je PVC geomembrana primijenjena u radu njegovana

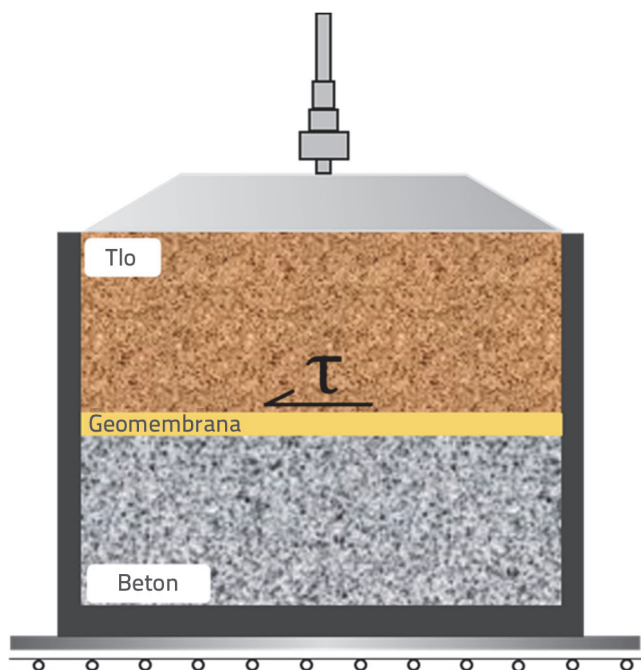
u slanoj vodi molarne mase 0,5 tijekom osam mjeseci, a potom je istražen štetan učinak slane vode na geomembranu. Slana voda je dobivena miješanjem litre destilirane vode s 29,25 g NaCl.

Tablica 3. Sastav procjedne vode MSW-a [25]

Kemijski naziv	Kemijska formula	Količina (po litri)
Octena kiselina	CH ₃ COOH	7 mL
Propionska kiselina	CH ₃ CH ₂ CO ₂ H	5 mL
Maslačna kiselina	C ₄ H ₈ O ₂	1 mL
Dikalijev fosfat	K ₂ HPO ₄	30 mg
Kalijev bikarbonat	KHCO ₃	312 mg
Kalijev karbonat	K ₂ CO ₃	324 mg
Natrijev klorid	NaCl	1440 mg
Natrijev nitrat	NaNO ₃	50 mg
Soda bikarbona	NaHCO ₃	3012 mg
Kalcijev klorid	CaCl ₂	2882 mg
Magnezijev klorid heksahidrat	MgCl ₂ ·6H ₂ O	3114 mg
Magnezijev sulfat	MgSO ₄	156 mg
Amonijev bikarbonat	NH ₄ HCO ₃	2439 mg
Urea	CO(NH ₂) ₂	695 mg
Otopina kovina u tragovima	-	1 mL
Natrijev sulfid nonahidrat	Na ₂ S·9H ₂ O	Titrirati na Eh 120-180 mV
Natrijev hidroksid	NaOH	Titrirati do pH 5,8-6,0
Destilirana voda	H ₂ O	Za 1 L

2.4. Metode

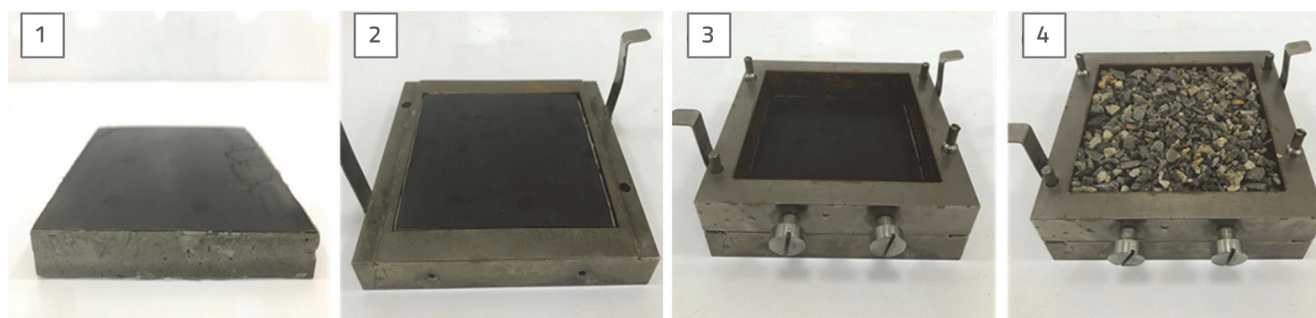
Prvo su određeni efektivni kutovi unutarnjeg trenja tla u skladu s ASTM D3080 [26] tradicionalnom metodom ispitivanja izravnim posmikom, ali primjenom kutije za smicanje različite veličine ($100 \times 100 \times 40 \text{ mm}^3$) [27-30]. Efektivni kut trenja sučelja tla i geomembrane određen je prema ASTM D5321 [31] pomoću uređaja za izravno smicanje. Postava ispitivanja prikazana je na slici 3.



Slika 3. Shema uređaja za izravno smicanje

Kako bi se tijekom pokusa sučelja tla i geomembrane održala fiksna, proizvedeni su betonski blokovi dimenzija donje kutije uređaja za izravno smicanje. Na dno kutije postavljen je betonski blok, geomembrana je položena na sučelje i zalijepljena na betonski blok, a na vrh je postavljena zemlja. Koraci pripreme uzoraka prikazani su na slici 4.

U svim pokusima uzorci su tla pripremljeni s optimalnim udjelom vlage i stavljeni u kutiju za smicanje s maksimalnom suhom jediničnom težinom. Uzorci su držani u vodi jedan sat



Slika 4. Koraci pripreme uzorka za ispitivanje sučelja izravnim smicanjem

prije svakog eksperimenta kako bi se postigla stopostotna zasićenost (nakon pokusa određen je stupanj zasićenosti uzoraka i utvrđeno je da su gotovo stoposto zasićeni). Ispitivanja izravnim posmikom provedena su pod normalnim naprezanjima od 12,25, 24,5, 49, 98, 196, 392 i 784 kPa. Pokusi su izvedeni pri brzini smicanja od 0,5 mm/min jer su propusnosti CS-a, CG-a, RS-a i RG-a bile vrlo visoke, odnosno 0,1 mm/min, a propusnost SB-a bila je niska [22, 32, 33].

3. Rezultati i rasprava

3.1. Tradicionalno ispitivanje izravnim posmikom

U početku je izveden niz eksperimenata tlo-tlo na pet tala (SB, CS, RS, CG i RG) pri maksimalnoj suhoj jediničnoj težini i optimalnom udjelu vlage pod sedam normalnih naprezanja (12,25, 24,5, 49, 98, 196, 392 i 784) za određivanje posmične čvrstoće. Razlog ispitivanja od vrlo niskih normalnih naprezanja do vrlo visokih normalnih naprezanja bio je utvrditi mijenja li se ponašanje geomembrana pod visokim normalnim naprezanjima. Početni koeficijenti pora i efektivni kutovi unutarnjeg trenja dobiveni za tla prikazani su u tablici 4. Efektivni kutovi trenja sučelja kod grubih i uglatih tla su veći, kao što je navedeno u tablici 4. Utvrđeno je da tla s različitim morfološkim svojstvima (okruglost i sferičnost) mogu utjecati na efektivni kut unutarnjeg trenja [23-24, 34-37]. Efektivni kut unutarnjeg trenja povećavao se s povećanjem veličine čestica jer je većim česticama bila potrebna veća sila trenja da se kotrljaju i dostignu stanje klizanja nakon što je uklještenje otpušteno pri vršnoj otpornosti [36, 38, 39].

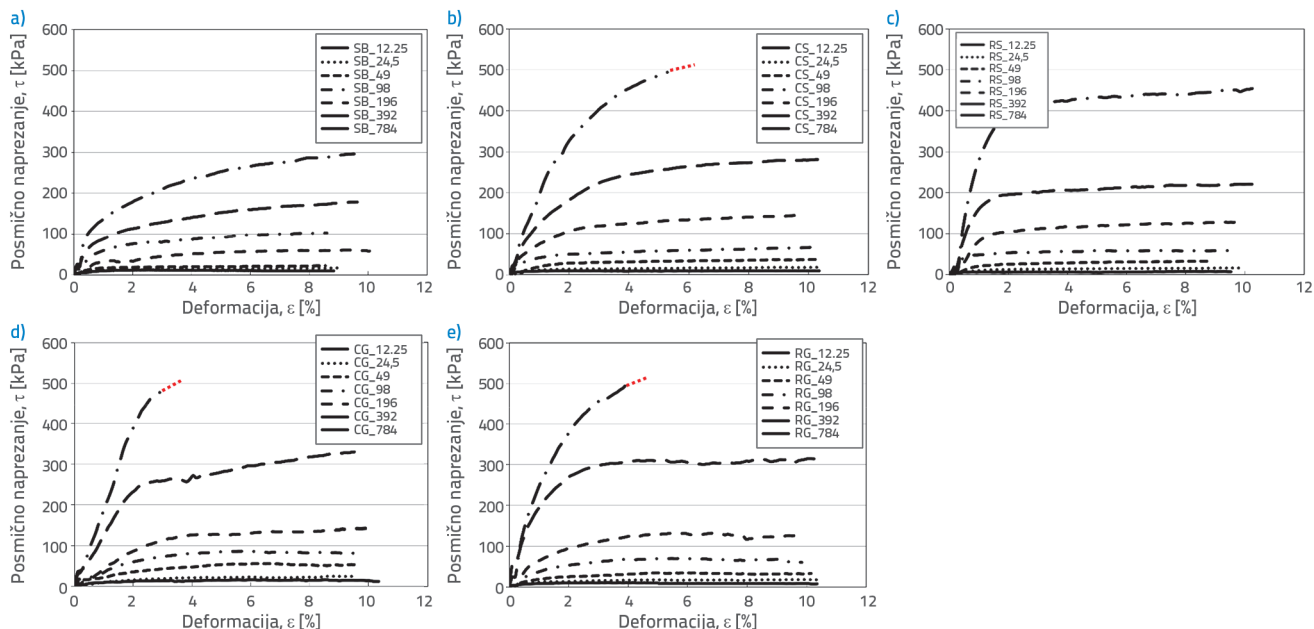
Tablica 4. Početni koeficijenti pora i efektivni kutovi unutarnjeg trenja tala

Vrsta tla	Početni koeficijent pora, e	Efektivni kut unutarnjeg trenja, ϕ [°]
SB	0,339	21,2
CS	0,517	34,9
RS	0,535	28,5
CG	0,471	43,9
RG	0,428	40,6

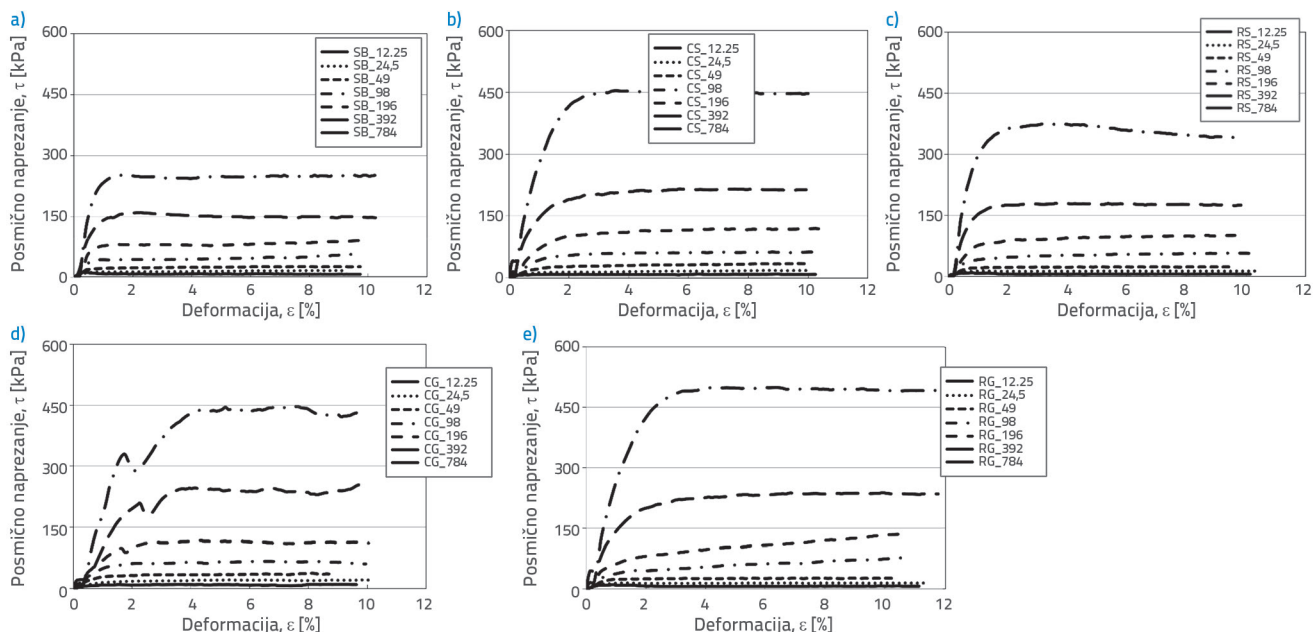
3.2. Ispitivanje sučelja izravnim posmikom

Ispitivanja sučelja izravnim posmikom provedena su kako bi se istražili učinci veličine čestica, morfologije, normalnog naprezanja i vrste geomembrane na smicanje sučelja između tla i geomembrane. Uvjeti pripreme i normalna naprezanja uzoraka bili su identični onima koji su upotrijebljeni u ispitivanjima izravnim posmikom. Ponovljivost eksperimentalnih rezultata izravnog posmika i izravnog posmika sučelja osigurana je ponavljanjem ispitivanja dvaput ili čak triput. Na slikama 5. i 6. prikazani su grafovi posmičnog naprezanja i deformacija za tla i

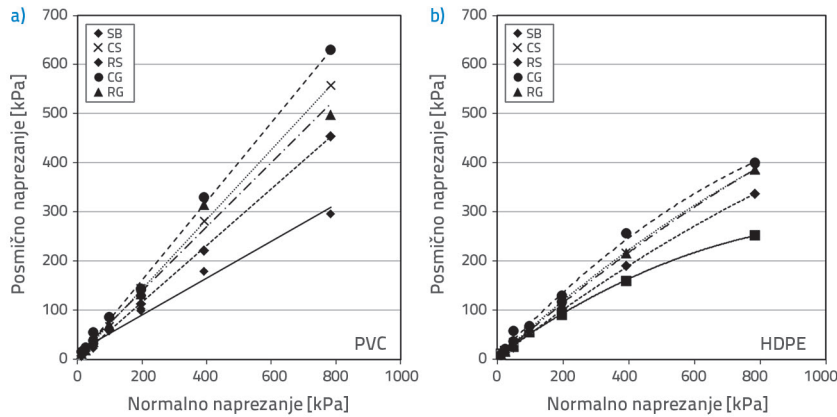
PVC geomembrane te za tla i HDPE geomembrane. Na slikama 5. i 6., dok su posmična naprezanja na sučelju HDPE-a i tla postala konstantna pri malim deformacijama ($\approx 2\%$), posmična naprezanja na sučelju PVC-a i tla postala su konstantna pri većim deformacijama ($\approx 7\%$) i čak su se nastavila povećavati u nekim uzorcima. Navedeno se može objasniti na sljedeći način: kombinirana uporaba meke geomembrane (PVC) i tla, koja sadrži ugrlate čestice (SB, CS i CG), rezultirala je ranim početkom oranja i značajnom mobilizacijom posmične čvrstoće uslijed oranja. Međutim, kombinirana uporaba tvrde geomembrane (HDPE) i tla može rezultirati malim ili nikakvim oranjem [19, 21, 40].



Slika 5. Grafovi posmičnog naprezanja i deformacije na sučelju tla i PVC-a



Slika 6. Grafovi posmičnog naprezanja i deformacije na sučelju tla i HDPE-a



Slika 7. Mohr-Coulombove anvelope sloma sučelja tla i geomembrana: a) PVC; b) HDPE

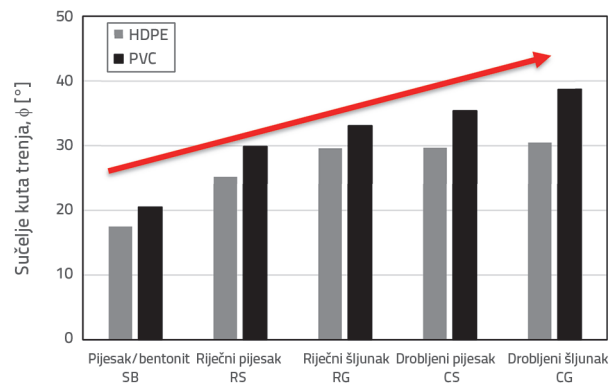
Mohr-Coulombove anvelope sloma sučelja tla i PVC-a te tla i HDPE-a dobivene iz grafova posmičnog naprezanja i deformacija prikazane su na slici 7. Sučelja tla i PVC-a imaju linearne Mohr-Coulombove anvelope sloma, a sučelja tla i HDPE-a imaju parabolne Mohr-Coulombove anvelope. Razlog je taj što čestice klize po površini geomembrane do određene vrijednosti normalnog naprezanja i , kao rezultat toga, raste posmično naprezanje. Nakon određene vrijednosti normalnog naprezanja, čestice se počinju utiskivati u površinu meke PVC geomembrane. Stoga dolazi do smanjenja otpornosti kod HDPE geomembrana, dok u PVC geomembranama takvog smanjenja nema jer dolazi do trenja na kontaktu tlo-tlo [41].

3.3. Utjecaj normalnog naprezanja

Posmično naprezanje nije doseglo rezidualnu vrijednost pri visokim normalnim vrijednostima naprezanja na sučeljima tla i PVC geomembrana. Međutim, ista situacija nije uočena na sučelju tla i HDPE geomembrana. Posmična naprezanja su se povećala do određene točke, a zatim su ostala konstantna, kao što je prikazano na slikama 5. i 6. Slične rezultate dobili su Fleming i sur. [21] te objasnili pomoću nalaza da pri visokim normalnim naprezanjima mehanizam sloma varira od klizanja čestica tla po površini geomembrane do čestica tla utisnutih u geomembranu i oranja utora duž smjera smicanja. Mehanizam loma pri oranju rezultirao je značajno većom posmičnom čvrstoćom na sučelju geomembrane i tla. Da bi došlo do pojave ovog mehanizma, geomembrana mora biti sastavljena od mekih polimera. Kod HDPE geomembrane, posmična naprezanja su porasla s normalnim vrijednostima naprezanja, ali nije primijećeno linearno povećanje. Povećanje posmičnog naprezanja smanjivalo se s povećanjem normalnog naprezanja. Međutim, ista situacija nije uočena za PVC geomembranu te je porast bio linearan. U nekim je pokusima ispitivanje zaustavljeno pri naprezanju od 784 kPa jer je posmično naprezanje premašilo 500 kPa, što je kapacitet mjerne ćelije uređaja za izravno smicanje (označeno crvenom linijom na slici 5.).

3.4. Utjecaj veličine i uglatosti čestica

Efektivni kutovi unutarnjeg trenja između tla i PVC geomembrana te tla i HDPE geomembrana prikazani su na slici 8. Uspoređujući tla s istom uglatošću, utvrđeno je da su efektivni kutovi trenja sučelja pjeskovitih tala (CS i RS) niži od onih u slučaju šljunčanih tala (CG i RG). Velike čestice zahtijevaju veću silu trenja kako bi postigle uvjete klizanja i kotrljanja nakon otpuštanja mehanizma blokiranja [36]. Također je uočeno da od dvije vrste geomembrana, mješavina pijeska/bentonita s najvećom kohezijom ima najniži efektivni kut trenja na sučelju.



Slika 8. Usporedba vrijednosti efektivnog kuta trenja sučelja

Ako se ispita učinak uglatosti, tla s visokom uglatošću (CS i CG) imaju veći efektivni kut trenja sučelja od okruglozrnih (RS i RG) tala. Drobljeni pijesak i drobljeni šljunak bili su manje sferični, manje zaobljeni i manje pravilni od riječnog pijeska i šljunka. Uglate čestice pijeska mogu lako zaorati i formirati dublje utore, osiguravajući veće efektivne kutove trenja sučelja [23, 24, 36, 37, 42]. U istraživanjima se također navodi da se veće vrijednosti efektivnog kuta trenja sučelja postižu pri većim vrijednostima normalnog naprezanja jer je više čestica tla u kontaktu s površinom geomembrane, što rezultira povećanom kontaktnom površinom, a time i povećanom posmičnom čvrstoćom sučelja [21, 24, 43]. Eksperimentalni rezultati također su pokazali da su efektivni kutovi trenja sučelja izravno proporcionalni suhoj gustoći.

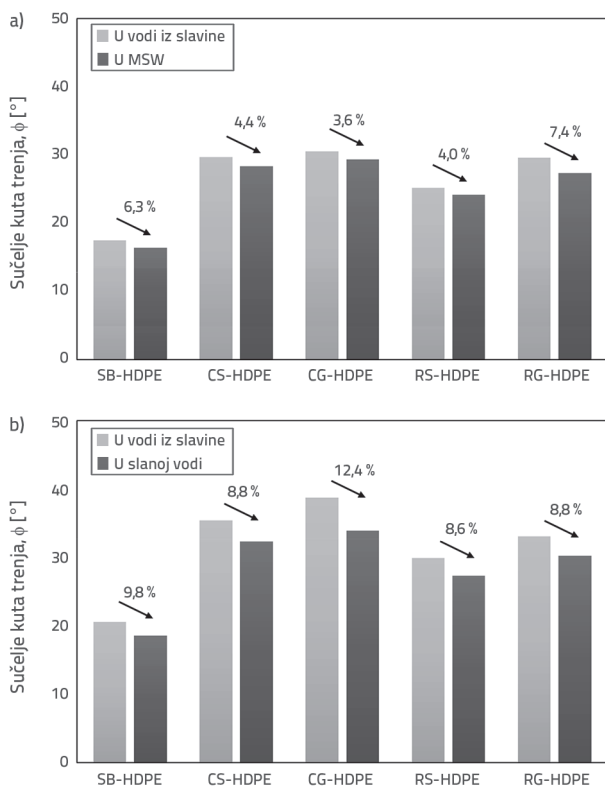
3.5. Utjecaj vrste geomembrane

Debljine obiju vrsta geomembrana odabrane su tako da budu jednake (1,5 mm) kako bi se ispitali učinci vrste geomembrane na efektivni kut trenja sučelja. Za sve tipove tla, efektivni kut trenja sučelja tla i PVC geomembrane bio je veći od efektivnog kuta trenja sučelja tla i HDPE geomembrane. To je zato što je PVC geomembrana bila mekša od HDPE geomembrane. Istraživanja

su pokazala da su efektivni kutovi trenja veći jer se čestice tla lakše utiskuju u površinu mekih geomembrana. Efektivni kutovi trenja sučelja drobljenog tla i PVC geomembrana bili su 19,2 do 26,9 % veći od onih drobljenog tla i HDPE geomembrana. Međutim, efektivni kutovi trenja sučelja riječnog tla i PVC geomembrana bili su 11,8 do 18,7 % veći od onih riječnog tla i HDPE geomembrana. Budući da je morfologija riječnih tala bila zaobljena, nije bilo ulegnuća na površini geomembrane. Stoga je efektivni kut trenja bio manji [22, 44, 45].

3.6. Utjecaj starenja i sastava tekućine na učinkovitost geomembrane

Geomembrane su čuvane u procjednoj vodi krutog komunalnog otpada (MSW) i slanoj vodi osam mjeseci kako bi se ispitali učinci procjedne vode i podzemne vode nastale na odlagalištima i obalnim građevinama na parametre posmične čvrstoće geomembrana. Ispitivanja sučelja izravnim posmikom provedena su na uzorcima bez njegovanja u vodi iz slavine i uzorcima osam mjeseci njegovanja u MSW-u i slanoj vodi. Usporedba efektivnih kutova trenja na sučelju za različite porne tekućine prikazana je na slici 9.



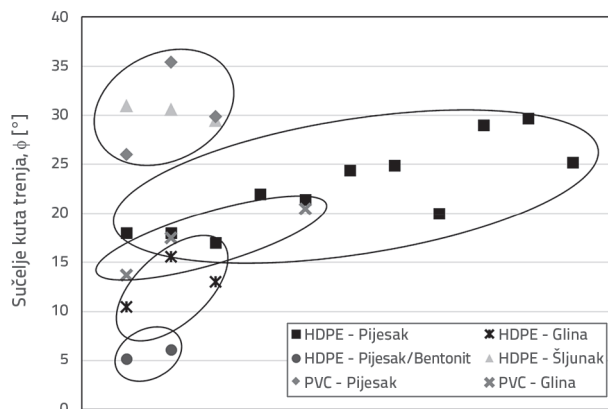
Slika 9. Efektivni kutovi trenja sučelja njegovanih uzoraka: a) sučelja HDPE-tlo; b) sučelja PVC-tlo

Slika 9. pokazuje da su se efektivni kutovi trenja sučelja geomembrana držanih u MSW-u osam mjeseci smanjili u prosjeku za 5,1 %. Razlog oštećenja geomembrane

uzrokovano MSW-om je oksidativna razgradnja koja počinje od četvrtog mjeseca. Viebke i sur. [46] i Hsuan i Koerner [47] opisali su oksidativnu razgradnju kao proces u tri koraka. U prvoj fazi nije bilo značajnih promjena u tehničkim svojstvima. Druga je faza vrijeme indukcije za početak razgradnje nakon što se potroše antioksidansi. Kraj druge faze poklapa se s početkom oksidacije. U trećoj fazi došlo je do značajnih promjena u fizikalnim i mehaničkim svojstvima zbog oksidacije što je na kraju dovelo do sloma geomembrane. Slom se u ovom kontekstu odnosi na smanjenje inženjerskih svojstava, kao što je otpornost na stvaranje pukotina i vlačna otpornost, do određene vrijednosti [3]. U ovom je radu utvrđeno da je druga faza započela nakon četiri mjeseca njegovanja i nastavila se tijekom sljedeća četiri mjeseca. Rowe i sur. [3] u svom istraživanju navode da se čak i pri 50°C u MSW-u vrijeme oksidacije smanjilo za samo 25 % nakon osam mjeseci. Stoga je smanjenje efektivnog kuta trenja sučelja bilo malo. Također je uočeno da su efektivni kutovi trenja sučelja geomembrana držanih u slanoj vodi osam mjeseci smanjeni u prosjeku za 9,7 %. U istraživanjima provedenima u literaturi utvrđeno je da slana voda ima negativan učinak na otpornost na pukotine pod naprezanjem, prekidno vlačno naprezanje i izduženje geomembrane [48, 49]. To je zato što prisutnost soli na površini geomembrane bez difuzije katalizira razgradnju polimera.

3.7. Usporedba s efektivnim kutovima trenja sučelja u literaturi

Efektivni kutovi trenja sučelja (nenjegovani) uspoređeni su s rezultatima dobivenima u literaturi i sažeti su u tablici 5. U ovom su radu efektivni kutovi trenja sučelja geomembrane i tla bili u skladu s rezultatima autora Fleminga i sur. [21], Frosta i sur. [23], Cena i sur. [37], i Starka i Santoyoa [50]. Također je vidljivo da je efektivni kut trenja krupnozrnatog tla veći od efektivnog kuta trenja sitnozrnatog tla. Osim toga, efektivni kutovi trenja sučelja grupirani su na slici 9. prema vrsti sučelja. Kao što je prikazano na slici 10., efektivni kutovi trenja sučelja uzoraka s istom vrstom sučelja su podjednaki.



Slika 10. Usporedba efektivnih kutova trenja sučelja po vrsti sučelja

Tablica 5. Prikaz parametara posmične čvrstoće sučelja geomembrane i tla iz prethodnih istraživanja

Istraživanje	Normalno naprezanje [kPa]	Oprema za ispitivanje	Sučelja	Vrh
				Efektivni kut trenja δ [°]
Williams i Houlihan [51]	-	Izravni posmik	PVC – zaobljeni pijesak HDPE – zaobljeni pijesak PVC – uglati pijesak HDPE – uglati pijesak	26,1 18,8 33,0 27,0
Mitchell i sur. [52]	158, 316, 479	Modificirani izravni posmik	HDPE – betonski pijesak	18,0
			HDPE – pijesak Ottawa	18,0
			HDPE – pijesak Misa Schist	17,0
O'Rourke i sur. [18]	-	Izravni posmik	PVC – zaobljeni pijesak HDPE – zaobljeni pijesak	30,1 18,8
Nataraj i sur. [53]	-	Izravni posmik	PVC – zaobljeni pijesak HDPE – zaobljeni pijesak	31,8 20,8
Izgin i Wasti [54]	5 – 50	Nagnuta daska	HDPE – pijesak Ottawa	22,0
			HDPE – kamen Ottawa	31,0
Dove i Frost [34]	-	Izravni posmik velikih razmjera	HDPE – zaobljeni pijesak HDPE – uglati pijesak	21,3 27,9
Bergado i sur. [55]	150 – 400	Izravni posmik	HDPE – kompaktna glina	10,5
Fleming i sur. [21]	-	Modificirani izravni posmik	HDPE – prašnasti pijesak	21,4 – 23,7
			HDPE – 6 % pijeska/bentonita	19,8 – 21,2
Mariappan i sur. [56]	100, 200, 300	Izravni posmik velikih razmjera	HDPE – izvorno tlo	15,6
Mariappan i sur. [57]	100, 200, 300	Izravni posmik velikih razmjera	HDPE – 10 % praha/bentonita	5,2
			HDPE – 10 % pijeska/bentonita	6,1
			HDPE – izvorno tlo	19,8
			PVC – 10 % praha/bentonita	13,7
			PVC – 10 % pijeska/bentonita	3,5
			PVC – izvorno tlo	17,5
Frost i sur. [23]	100, 300	Izravni posmik velikih razmjera	HDPE – pijesak Ottawa	24,4 – 25,5
			HDPE – pijesak za pjeskarenje	24,9 – 25,5
Stark i Santoyo [50]	17, 50, 100, 200, 400	Modificirani prstenasti posmik	PVC – Ledenjački til Urbana	26,0
			PVC – pijesak Ottawa	26,0
			HDPE – Ledenjački til Urbana	13,0
			HDPE – pijesak Ottawa	20,0
Cen i sur. [37]	50, 100, 150, 200	Kompozitni posmik velikih razmjera	HDPE – fini pijesak	29,0
			HDPE – pjeskoviti šljunak	30,6
Markou i Evangelou [41]	100, 200, 400	Izravni posmik velikih razmjera	PVC – zaobljeni pijesak HDPE – zaobljeni pijesak PVC – uglati pijesak	30,8 16,7 40,9

Tablica 5. Sažetak parametara posmične čvrstoće sučelja geomembrane i tla iz prethodnih istraživanja - nastavak

Istraživanje	Normalno naprezanje [kPa]	Oprema za ispitivanje	Sučelja	Vrh
				Efektivni kut trenja δ [°]
Ovo istraživanje	12,25, 24,5, 49, 98, 196, 392, 784	Modificirani uređaj za izravno smicanje	PVC – 20 % pijeska/bentonita	20,5
			HDPE – 20 % pijeska/bentonita	17,5
			PVC – drobljeni pijesak	35,4
			HDPE – drobljeni pijesak	29,7
			PVC – drobljeni šljunak	38,7
			HDPE – drobljeni šljunak	29,5
			PVC – riječni pijesak	29,9
			HDPE – riječni pijesak	25,2

4. Zaključak

U ovom je radu ispitana posmična čvrstoća sučelja tla i geomembrana. Efektivni kutovi trenja na sučelju tala i geomembrana određeni su pomoću uređaja za izravno smicanje. Pet tipova tla (mješavina pijeska/bentonita, drobljeni pijesak, riječni pijesak, drobljeni šljunak i riječni šljunak) primijenjeno je u pokusima kako bi se ispitali učinci veličine čestica i uglatosti na efektivni kut trenja sučelja. Dvije različite vrste geomembrana iste debljine primijenjene su za određivanje učinka vrste geomembrane na efektivni kut trenja sučelja. Nadalje, normalna naprezanja od 12,25 kPa do 784 kPa primijenjena su u pokusima kako bi se dobio učinak normalnog naprezanja na efektivni kut trenja sučelja. Rezultati eksperimentalnog ispitivanja pokazali su da se posmično naprezanje povećava s rastom horizontalne deformacije pri visokim normalnim naprezanjima u sučeljama PVC geomembrana, ali na sučeljama HDPE geomembrana čak i pri visokim normalnim naprezanjima, posmično naprezanje raste do određene horizontalne deformacije ($\approx 7,0$ %) i zatim ostaje konstantno. HDPE geomembrana nosi manje opterećenje od PVC geomembrane pod visokim pritiscima. Stoga se, prema rezultatima ispitivanja dobivenima iz trenutačnog istraživanja, u stvarnom projektu preporučuje primjena PVC geomembrane u temeljima višeslojnih zgrada. Tla s većim i uglastim česticama imala su veće efektivne kutove trenja sučelja, a sučelje tla i PVC-a imalo je 10,6 do 21,2 % veći efektivni kut trenja sučelja od sučelja tla i HDPE-a. Najmanja razlika između efektivnih kutova trenja

obiju sučelja bila je u slučaju riječnog šljunka, a najveća razlika kod drobljenog šljunka. Važan zaključak dobiven iz ovog istraživanja jest taj da postoji smanjenje od 9,7 % u efektivnom kutu trenja sučelja PVC geomembrane koja se upotrebljava u temeljima, čak i nakon osam mjeseci, u građevinama izgrađenima blizu obale. Još jedan važan rezultat je smanjenje efektivnog kuta trenja od 5,1 % na sučelju HDPE geomembrane koja se primjenjuje za nepropusnost na odlagalištima komunalnog krutog otpada, čak i nakon osam mjeseci.

Još jedan ključan rezultat dobiven iz ovog istraživanja je taj da primjena specifičnih vrijednosti kao što je 2/3 (0,67) kao koeficijenta trenja sučelja u zakonima, propisima ili normama koji se primjenjuju kao preporuka u projektima geomembrana može nositi značajne rizike. Ovo je istraživanje pokazalo da omjer smanjenja efektivnog kuta unutarnjeg trenja od 2/3 može biti nedostatan za neka sučelja, ovisno o uvjetima okoline. Stoga, pri projektiranju projekata koji uključuju geomembrane izložene procjednoj vodi od komunalnog otpada, posebno na odlagalištima, treba uzeti u obzir potencijalnu štetu koja će nastati tijekom vremena i odabrati odgovarajuće projektne parametre. U suprotnom može doći do katastrofa koje uzrokuju gubitak života i imovine.

Zahvale

Ovaj su rad poduprli TUBITAK 2211-A program stipendiranja obrazovanja i društvo BTM.

LITERATURA

- [1] Kulkarni, S., Ranadive, M.: Effect of soil stabilization on design of conventional and perpetual pavement in India, GRAĐEVINAR, 74 (2022) 9, pp. 779-787, <https://doi.org/10.14256/JCE.3337.2021>.
- [2] Tanzadeh, R., Vafaeian, M., Fard, M.Y.: The influence of lime powder on the behaviour of clay soil, GRAĐEVINAR, 73 (2021) 9, pp. 907-915, <https://doi.org/10.14256/JCE.1871.2016>.
- [3] Rowe, R.K., Islam, M.Z., Hsuan, Y.G.: Effects of thickness on the aging of HDPE geomembranes Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 136 (2010) 2, pp. 299-309, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000207](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000207).
- [4] Kaluđer, J., Mulabdić, M., Minažek, K.: Testing noncohesive geogrid-reinforced soil in triaxial shear apparatus under cyclic loading, GRAĐEVINAR, 73 (2021) 1, pp. 57-66, <https://doi.org/10.14256/JCE.3039.2020>.

- [5] Ferreira, F.B., Vieira, C.S., Lopes, M.L.: Direct shear behaviour of residual soil–geosynthetic interfaces – influence of soil moisture content, soil density, and geosynthetic type, *Geosynthetics International*, 22 (2015) 3, 257 – 272, <https://doi.org/10.1680/gein.15.00011>.
- [6] Thielmann, S.S., Fox, P.J., Athanassopoulos, C.: Shear strength of GMX/GCL composite liner under high normal stress. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142 (2016) 5, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001457](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001457).
- [7] Lin, H., Shin, J.Y., Qian, X.D., Zhang, L.L.: An improved simple shear apparatus for GCL internal and interface stress-displacement measurements, *Environmental Earth Science*, 71 (2014) 8, pp. 3761-3771, <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2810-4>.
- [8] Stoltz, G., Nicaise, S., Veylon, G., Poulain, D.: Determination of geomembrane –protective geotextile friction angle: An insight into the shear rate effect, *Geotextiles and Geomembranes*, 48 (2020), pp. 176-189, <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2019.11.007>.
- [9] Alimohammadi, H., Schaefer, V.R., Zheng, J., Li, H.: Performance evaluation of geosynthetic-reinforced flexible pavement: A review of full-scale field studies. *International Journal of Pavement Research Technology*, 14 (2021), pp. 30-42, <https://doi.org/10.1007/s42947-020-0019-y>.
- [10] Alimohammadi, H., Zheng, J., Schaefer, V.R., Siekmeier, J.: Evaluation of geogrid reinforcement of flexible pavement performance: A review of large-scale laboratory studies, *Transportation Geotechnics*, 27 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100471>.
- [11] Zheng, G., Alimohammadi, H., Zheng, J., Schaefer, V.R.: Effectiveness of Geosynthetics in the Construction of Roadways: A Full-Scale Field Studies Review, *International Foundations Congress and Equipment Expo*, Dallas, 2021, <https://doi.org/10.1061/9780784483411.022>.
- [12] Ghavam-Nasiri, A., El-Zein, A., Airey, D., Rowe, K.R.: Numerical Simulation of Geosynthetic Clay Liner Desiccation under High Thermal Gradients and Low Overburden Stress, *International Journal of Geomechanics*, 19 (2019) 7, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001540](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001540).
- [13] Cen, W.J., Wang, H., Yu, L., Rahman, M.S.: Response of high-density polyethylene geomembrane-sand interfaces under cyclic shear loading: Laboratory investigation, *International Journal of Geomechanics*, 20 (2020) 2, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001540](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001540).
- [14] Seed, R.B., Mitchell, J.K., Seed, H.B.: Slope stability failure investigation: Kettleman Hills repository landfill unit B-19, Phase IA. Berkeley, California, 1988.
- [15] Bowles, J.E.: *Foundation analysis and design*, Fifth edition, McGraw-Hill 1997.
- [16] Das, B.M.: *Principles of foundation engineering*, Sixth edition, Thomson, 2007.
- [17] Rinne, N.F.: Evaluation of interface friction between cohesionless soils and common construction materials. Civil Engineering Department, University of British Columbia, Vancouver, 1989.
- [18] O'Rourke, T.D., Druschel, S.J.: Shear strength characteristics of sand-polymer interfaces, *Journal of Geotechnical Engineering*, 116 (1990) 5, pp. 451-469, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1990\)116:3\(451\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1990)116:3(451)).
- [19] Effendi, R.: Interface friction of smooth geomembranes and Ottawa sand *Info Teknik*, 12 (2011) 1, pp. 61-72.
- [20] Punetha, P., Mohanty, P., Samanta, M.: Microstructural investigation on mechanical behaviour of soil – geosynthetic interface in direct shear test, *Geotextiles and Geomembranes*, 45 (2017), pp. 197-210, <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2017.02.001>.
- [21] Fleming, I.R., Sharma, J.S., Jogi, M.B.: Shear strength of geomembrane-soil interface under unsaturated conditions, *Geotextiles and Geomembranes*, 24 (2006), pp. 274-284, <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2006.03.009>.
- [22] Chai, J.C., Saito, A.: Interface shear strengths between geosynthetics and clayey soils, *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2 (2016) 19, pp.3-9, <https://doi.org/10.1007/s40891-016-0060-8>.
- [23] Frost, J.D., Kim, D., Lee, S.W.: Microscale geomembrane-granular material interactions, *KSCCE Journal of Civil Engineering*, 16 (2012) 1, pp. 79-92, <https://doi.org/10.1007/s12205-012-1476-x>.
- [24] Adamska, K.Z.: Water content – density criteria for determining geomembrane – fly ash interface shear strength, *MATEC Web of Conferences*, 262 (2018), pp. 1-8, <https://doi.org/10.1051/mateconf/201926204005>.
- [25] Hrapovic, L.: Laboratory study of intrinsic degradation of organic pollutants in compacted clay soil, PhD thesis, The University of Western Ontario, 300 (2001).
- [26] American Society for Testing and Materials (ASTM): standard test method for direct shear testing of soils under consolidated drained conditions. ASTM D 3080/3080M – 11. West Conshohocken, PA, ASTM 2011.
- [27] Dadkhah, R., Ghafoori, M., Ajalloeian, R., Lashkaripour, G.R.: The effect of scale direct shear test on the strength parameters of clayey sand in Isfahan City, Iran, *Journal of Applied Science*, 10 (2010) 18, pp. 2027-2033, <https://doi.org/10.3923/jas.2010.2027.2033>.
- [28] Sobol, E., Sas, W., Szymanski, A.: Scale effect in direct shear tests on recycled concrete aggregate, *Studia Geotechnica et Mechanica*, 37 (2015) 2, pp. 45-49, <https://doi.org/10.1515/sgem-2015-0019>.
- [29] Mohapatra, S.R., Mishra, S.R., Nithin, S., Rajagopal, K.: Effect of Box Size on Dilative Behaviour of Sand in Direct Shear Test, *Indian Geotechnical Conference*, Chennai, 16, pp. 111-118, 2016, https://doi.org/10.1007/978-981-13-0899-4_14.
- [30] Zahran, K., El Naggar, H.: Effect of Sample Size on TDA Shear Strength Parameters in Direct Shear Tests, *Transportation Research Record*, 2674 (2020) 9, pp. 1110 -1119, <https://doi.org/10.1177/0361198120934482>.
- [31] ASTM (American Society for Testing and Materials [Internet]). Standard Test Method for Determining the Shear Strength of Soil – Geosynthetic and Geosynthetic – geosynthetic interfaces by using direct shear. ASTM D 5321/5321M – 20. West Conshohocken, PA, ASTM 2020.
- [32] Shi, J., Shu, S., Qian, X., Wang, Y.: Shear strength of landfill liner interface in the case of varying normal stress *Geotextiles and Geomembranes*, 48 (2020), pp. 713-723, <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2020.05.004>.
- [33] Zhou, L., Zhu, Z., Yu, Z., Zhang, C.: Shear testing of the interfacial friction between an HDPE geomembrane and solid waste, *Materials*, 13 (2020), pp. 1-16, <https://doi.org/10.3390/ma13071672>.
- [34] Dove, J.E., Frost, J.D.: Peak friction behaviour of smooth geomembrane-particle interfaces, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125 (1999) 7, pp. 544-555, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1999\)125:7\(544\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1999)125:7(544)).

- [35] Santamarina, J.C., Cho, G.C.: Determination of critical state parameters in sandy soil simple procedure *Geotechnical Testing Journal*, 24 (2001) 2, pp. 185-192, <https://doi.org/10.1520/GTJ11338J>.
- [36] Vangla, P., Gali, M.L.: Shear behaviour of sand – smooth geomembrane interfaces through micro – topographical analysis, *Geotextiles and Geomembranes*, 44 (2016), pp. 592-603, <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2016.04.001>.
- [37] Cen, W.J., Wang, H., Sun, Y.J.: Laboratory investigation of shear behaviour of high – density polyethylene geomembrane interfaces. *Polymers*, 10 (2018), pp. 1-14, <https://doi.org/10.3390/polym10070734>.
- [38] Ghazizadeh, S., Bareither, C.A.: Failure mechanism of geosynthetic clay liner and textured geomembrane composite systems, *Geotextiles and Geomembranes*, 49 (2021), pp. 789-803, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001425](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001425).
- [39] Marcotte, B.A., Fleming, I.R.: Direct measurement of geomembrane strain from aggregate indentations, *Geosynthetics International*, 0 (2021) 0, pp. 1-54, <https://doi.org/10.1680/jgein.21.00027>.
- [40] Liu, F., Ying, M., Yuan, G., Wang, J., Gao, Z., Ni, J.: Particle shape effects on cyclic shear behaviour of the soil-geogrid interface, *Geotextiles and Geomembranes*, 49 (2021), pp. 991-1003, <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2021.01.008>.
- [41] Markou, I.N., Evangelou, E.D.: Shear resistance characteristics of soil-geomembrane interfaces, *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 4 (2018) 29, pp. 1-16, <https://doi.org/10.1007/s40891-018-0146-6>.
- [42] Zettler, T.E., Frost, J.D., DeJong, J.T.: Shear-induced changes in smooth HDPE geomembrane surface topography, *Geosynthetics International*, 7 (2000) 3, pp. 243-267, <https://doi.org/10.1680/gein.7.0174>.
- [43] Khilnani, K., Stark, T.D., Bahadori, T.M.: Comparison of single and multilayer interface strengths for geosynthetic/geosynthetic and soil/geosynthetic interfaces. *Geotechnical Frontiers*, 276 (2017), <https://doi.org/10.1061/9780784480434.005>.
- [44] Koerner, R.M., Martin, J.P., Koerner, G.R.: Shear strength parameters between geomembranes and cohesive soils, *Geotextiles and Geomembranes*, 4 (1986) 1, pp. 21-30, [https://doi.org/10.1016/0266-1144\(86\)90034-8](https://doi.org/10.1016/0266-1144(86)90034-8).
- [45] Fishman, K.L., Pal, S.: Further study of geomembrane/cohesive soil interface shear behaviour, *Geotextiles and Geomembranes*, 13 (1994) 9, pp. 571-590, [https://doi.org/10.1016/0266-1144\(94\)90011-6](https://doi.org/10.1016/0266-1144(94)90011-6).
- [46] Viebke, J., Elble, E., Ifwarson, M., Gedde, U.W.: Degradation of unstabilised medium-density polyethylene pipes in hot-water applications. *Polymer Engineering Science*, 34 (1994) 17, pp. 1354-1361, <https://doi.org/10.1002/PEN.760341708>.
- [47] Hsuan, Y., Koerner, R.: Antioxidant depletion lifetime in high density polyethylene geomembranes, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124 (1998) 6, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1998\)124:6\(532\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1998)124:6(532)).
- [48] Gualtieri, C., Rotondo, G.: Comparison of the Performance of Two Different Geomembranes for Sanitary Landfill, 6th International Landfill Symposium, S. Margherita, 1997.
- [49] Abdelaal, F.B., Rowe, R.K., Islam, M.Z.: Effect of leachate composition on the long-term performance of a HDPE geomembrane, *Geotextiles and Geomembranes*, 42 (2014), pp. 348-362, <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2014.06.001>.
- [50] Stark, T.D., Santoyo, R.F.: Soil-geosynthetic interface strength from torsional ring shear test, *Geotechnical Frontiers*, pp. 260-268, Orlando, 2017, <https://doi.org/10.1061/9780784480472.028>.
- [51] Williams, N.D., Houlihan, M.F. Evaluation of interface friction properties between geosynthetics and soils. *Geosynthetics'87 conference*, New Orleans, pp. 616-627, Roseville, 1987.
- [52] Mitchell, J.K., Seed, R.B., Seed, H.B.: Kettleman Hills waste landfill slope failure, I: Liner System Properties. *Journal of Geotechnical Engineering*, 116 (1990) 4, pp. 647-668, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1990\)116:4\(647\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1990)116:4(647)).
- [53] Nataraj, M.S., Maganti, R.S., McManis, K.L.: Interface frictional characteristics of geosynthetics, *Geosynthetics'95*, Nashville, 3, pp. 1057-1069, Roseville, 1995.
- [54] Izgin, M., Wasti, Y. Geomembrane-sand interface frictional properties as determined by inclined board and shear box tests *Geotextiles and Geomembranes*, 16 (1998), pp. 207-219, 10.1016/S0266-1144(98)00010-7.
- [55] Bergado, D.T., Ramana, G.V., Sia, H.I.: Evaluation of interface shear strength of composite liner system and stability analysis for a landfill lining system in Thailand, *Geotextiles and Geomembranes*, 24 (2006), pp. 371-393, <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2006.04.001>.
- [56] Mariappan, S., Kamon, M., Ali, F.H., Katsumi, T., Akai, T.: Landfill interface study on liner member selection for stability, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 13 (2008), pp. 1-14.
- [57] Mariappan, S., Kamon, M., Ali, F.H., Katsumi, T., Akai, T., Inui, T., Nishimura, M.: Performance of landfill liners under dry and wet conditions, *Geotechnical and Geological Engineering*, 29 (2011), pp. 881-890, <https://doi.org/10.1007/S10706-011-9426-9>.