

Tuzlu Su Etkisindeki Geomembranların Ara Yüzey Kayma Davranışlarının İncelenmesi

İnci Develioğlu¹, Hasan Fırat Pulat^{2*}

^{1,2} İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir.

Sorumlu yazar e-posta*: hfirat.pulat@ikcu.edu.tr.
e-posta: inci.develioğlu@ikcu.edu.tr.

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-8298-7106>
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-6594-8095>

Geliş Tarihi: 21.07.2022

Kabul Tarihi: 02.03.2023

Öz

Yapı temellerinin tasarımında, kayma tahkikinin önemi birçok yönetmelik ve akademik çalışmada vurgulanmıştır. Hesaplamalar sırasında zemin özellikleri ve uygulama koşulları dikkate alınırken yalıtım amacıyla kullanılan ve etkili bir ara yüzey elemanı olan geomembranların kayma davranışları göz ardı edildiği taktirde ve geomembran ile yapı elemanı arasındaki kayma mukavemetinin tasarımda kullanılan kayma direncinden daha düşük olması durumunda önemli problemlerle karşılaşılabilir. Olası can ve mal kayıplarının önüne geçebilmek için sistemde var olan tüm ara yüzeylerin dikkatle irdelenmesi gerekir. Bu çalışmada, iki farklı geomembran ile İzmir, Karşıyaka, Mavişehir sahil şeridinden alınan deniz suyu etkisindeki killi zeminin ara yüzey kayma davranışı incelenmiştir. Polivinil klorür (PVC) geomembranın kalınlıkları 1.5 ve 3.0 mm ve TPO geomembranın kalınlığı 1.5 mm dir. Ara yüzey kayma dayanımı parametreleri orta ölçekli direk kesme deneyleri ile belirlenmiştir. Direk kesme deneyleri 0.5 molar (0.5M) tuzlu suda 4, 8 ve 16 ay kür edilmiş ve kür edilmemiş geomembranlar ile gerçekleştirilmiştir. Zemin – TPO ara yüzeyi en büyük kayma dayanımı ve sürtünme açısına sahipken en düşük kayma dayanımı ve sürtünme açısının – PVC/1.5 ara yüzeyine aittir. Tuzlu suda kür edildikten sonra ara yüzey sürtünme açısı en fazla azalan geomembran 1.5 mm PVC iken en az azalan geomembran 3.0 mm PVC olmuştur.

Anahtar kelimeler

Geomembran;
Ara yüzey kayma dayanımı; Tuzlu su;
Orta ölçekli direk kesme deneyi

Investigation of the Interface Shear Behavior of Geomembranes Under the Influence of Salt Water

Abstract

In the design of construction foundations, the importance of shear verification has been emphasized in many codes and academic studies. Considering the soil properties and application conditions during the calculations, if the shear behavior of geomembranes, which is an effective interface element and used for insulation, is ignored, and if the shear strength between the geomembrane and the structural element is lower than the shear resistance used in the design, significant problems may be encountered. In order to prevent possible loss of life and property, all interfaces in the system should be carefully examined. In this study, the interface shear behavior between two different geomembranes and the clayey soil taken from the coastal part of İzmir province, Karsiyaka district, Mavişehir was investigated. Geomembrane types are polyvinyl chloride (PVC) and thermoplastic polyolefin (TPO). The thickness of the TPO geomembrane is 1.5 mm, while the thickness of the PVC geomembrane is 1.5 and 3.0 mm. Interface shear strength parameters were determined by medium-scale direct shear tests. Direct shear tests were carried out with uncured geomembranes and cured in 0.5 molar saltwater for 4, 8, and 16 months. While the soil – TPO interface has the highest shear strength and friction angle, the soil – PVC/1.5 interface has the lowest shear strength and friction angle. The same situation was obtained for geomembranes cured in saltwater. After curing in salt water, the geomembrane whose interface friction angle decreased the most was 1.5 mm PVC, while the least decreased geomembrane was 3.0 mm PVC.

Keywords

Geomembrane;
Interface shear strength; Saltwater;
Medium scale direct shear test

1. Giriş

Geomembranlar (GM'ler), çeşitli sıvı ve gazların akışını en aza indirmede oldukça etkili olduklarından, depolama alanlarında ve diğer geoteknik yapılarda sızdırmazlık bariyeri olarak yaygın olarak kullanılmaktadır (Chai vd. 2005, Mccartney ve Zornberg 2009, Abdelaal vd. 2014). GM ve zeminin farklı özellikleri nedeniyle, GM – zemin ara yüzeyindeki gerilmeler ve deformasyonlar oldukça karmaşıktır ve ara yüzey, yenilmenin meydana geldiği yerde zayıf bir düzlem haline gelebilir (Mitchell vd. 1990, Koerner ve Soong 2000, Feng vd. 2007, Qian vd. 2011, Bonnour vd. 2015, Sabiri vd. 2020, Chen vd. 2021).

İnşaat projelerinde temel tasarımı yapılırken yapı temelinin üzerine oturduğu zeminin kayma dayanımı parametreleri girdi olarak kullanılmaktadır. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde (2018) yüzeysel temeller ve dayanma yapıları için kayma tahkiki hesaplamasında zemin-temel ara yüzeyi için $\tan\delta$ katsayısının kullanılması gerektiğini belirtilmiştir. Bu değer farklı beton türleri için 0.4 ile 0.6 arasında değişmektedir. Ancak önceki yıllarda yapılan çalışmalar göstermiştir ki bazı durumlarda sızdırmazlık amacıyla kullanılan geomembran (GM) ile zemin arasında oluşan ara yüzeyin $\tan\delta$ değeri zemin-temel ya da zemin-zemin ara yüzeylerinkinden oldukça düşüktür. Bu gibi durumlarda zeminin kayma dayanımı parametrelerinin kullanılması projeyi oldukça riskli hale getirmektedir. Ayrıca GM'ler uzun yıllar boyunca farklı kimyasal özelliklerdeki yer altı sularına, farklı sıcaklıklara ve yüksek normal gerilmelere maruz kalmaktadır.

GM – zemin ara yüzey kayma dayanımı üzerine çalışmalar 1980'li yılların başlarında yapılmıştır. Ancak bu çalışmalar akademik düzeyde kalmış ve projelerde ara yüzey kayma dayanımı bir parametre olarak kullanılmamıştır. Ancak 1988 yılında ABD'nin California eyaletinde bulunan Kettleman Hills atık depolama tesisinde meydana gelen göçme nedeniyle birçok araştırmacı GM – zemin ara yüzey davranışı üzerinde çalışmalar yapmaya başlamıştır (Seed vd. 1988, Mitchell vd. 1990, Seed vd. 1990, Byrne vd. 1992). Ancak çalışmaların sınırlı kalması,

yönetmelik ve standartlarda bu konu ile ilgili net bir bilgi olmaması nedeniyle günümüzde hala mühendisler, ders kitaplarında (Bowles 1997, Das 2007) önerildiği gibi ara yüzey sürtünme açısını elde ederken genellikle içsel sürtünme açısını ($1/2$ veya $2/3$) azaltır. Bazı araştırmacılar, çalışmalarında bu katsayıların $2/3$ 'ten küçük, hatta $1/2$ 'den küçük olabileceğini belirlemişlerdir, bu nedenle farklı zeminler ve farklı geomembranlar arasındaki ara yüzey davranışının ayrıntılı olarak incelenmesi gerekmektedir (Rinne 1989, O'Rourke ve Druschel 1990, Effendi 2011, Punetha vd. 2017). Literatürde geçirgenlik, delinme ve yırtılma ile ilgili birçok çalışma olmasına rağmen, mekanik özellikleri yanal gerilmelerin etkisi altında inceleyen çalışmalar oldukça sınırlıdır. Ayrıca GM'lerin tuzlu su ya da çeşitli kimyasallar içerisinde belirli süre kür edildikten sonra ara yüzey direk kesme deneylerine maruz tutulması ile ilgili çalışmalara rastlanılmamıştır.

Literatürde sadece zemin türünü ya da sadece geomembran türünün ara yüzey kayma davranışı üzerindeki etkisini inceleyen bazı çalışmalar bulunmaktadır. Chai ve Saito (2016) büyük ölçekli direk kesme cihazı ile GM – kil ara yüzeyi kayma mukavemeti davranışını belirlemişlerdir. Bentonit tozu ve kuvars (%30) killi zemin (%70) ile karıştırılmıştır. Çalışmada kullanılan GM türleri polivinil klorür (PVC), polietilen (PE) ve yüksek yoğunluklu polietilendir (HDPE). Direk kesme deneyleri 50, 80 ve 100 kPa normal gerilmeler altında gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları PVC – killi zemin ara yüzeyinin maksimum adezyon değerine sahip olduğunu göstermiştir. Bentonit ve diğer tüm GM'ler arasındaki ara yüzey sürtünme açısı oldukça düşüktür (3° - 4°). Bentonitten çıkan su, direk kesme deneyi sırasında ara yüzeyde biriktiğinden, GM ile bentonit partikülleri arasında bir su tabakası oluşur ve bu nedenle ara yüzey sürtünme açısı olması gerekenden daha düşük elde edilir. Ayrıca zeminin kayma dayanımı, ara yüzey kayma dayanımından yaklaşık %55 daha büyük elde edilmiştir. Efendi (2011) farklı türdeki GM'ler (pürüzsüz HDPE, çok pürüzsüz VLDPE, PVC) ile Ottawa kumunun ara yüzey kayma mukavemeti davranışlarını incelemiştir. GM kalınlıkları sırasıyla 2.03, 1.52 ve

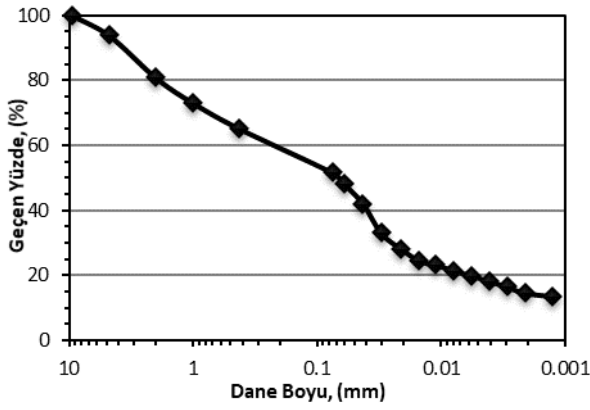
1.52 mm dir. Ara yüzey kayma dayanımı parametreleri halka kayma testi ile 50 kPa ile 200 kPa arasında değişen normal gerilme değerleri altında belirlenmiştir. Elde edilen sonuçların arasında değerlendirme yapmak amacıyla üretkenlik oranı $[E] (\tan\delta/\tan\phi)$ türetilmiştir. Çok sert ve pürüzsüz bir yüzeye sahip olan HDPE, %34 ile 45 arasında değişen değerlerle en düşük E değerlerine sahip olmuştur. Nispeten daha yumuşak yüzeyli VLDPE ile yapılan testlerde, Ottawa kumunun %44 ila 59'u arasında daha yüksek bir oran mobilize edilmiştir. PVC için E, 50 kPa ila 223 kPa arasındaki normal gerilmede Ottawa kumunun %70 ila 97'si arasında değişmiştir. Sonuç olarak, pürüzsüz GM'lerin ara yüzey kayma dayanımlarının normal gerilme seviyelerine bağlı olduğu tespit edilmiştir. Abdelaal vd. (2014) katı atık depolama sahası sızıntı sıvısının oksidasyon indüksiyon süresi (OIT) ve geomembranın fiziksel özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Sızıntı sıvısı, kentsel katı atık depolama tesisi sızıntı sıvısını temsil edecek şekilde laboratuvarında çeşitli kimyasalların karıştırılmasıyla elde edilmiştir. Toplamda 5 adet sızıntı sıvısı hazırlanmıştır (L1, L2, L3, L4, L5). L1 bir katı atık depolama tesisinin sızıntı suyunu tam olarak temsil etmektedir. Diğerlerinin ise kimyasal miktarları azaltılmıştır. L1 e L3 içerisinde tuz bulunurken diğerlerinde bulunmamaktadır. Geomembranlar farklı sıcaklıklarda (22, 40, 55, 70, 85 °C) yaklaşık 108 ay boyunca bu sızıntı sıvılarının içerisinde tutulmuştur. Kür periyodunu tamamlayan numunelere ergime indeksi, gerilme-çatlak direnci ve OIT testleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda, GM'nin mekanik özelliklere en fazla zarar veren sıvıların L1 ve L3 olduğu en fazla zarar verenin ise L1 olduğu belirlenmiştir. Burada tuz içeriğinin büyük bir etki yarattığı görülmektedir. L1 sıvısında kür edilen numunelerde, 4. ayın sonunda OIT değerinde 85 °C'de %98, 55 °C'de %40 azalma görülmüştür. 55 °C'de ergime indeksinde 25 ay sonra neredeyse 0.8'e (1.0'den) ulaşan bir düşüş olmuş ve ardından değerler 75 aylık inkübasyondan sonra zamanla ilk değerlere yükselmiştir. Diğer sıcaklıklarda da benzer eğilimler elde edilirken, 55 °C'de 80 ay, 70 °C'de 40 ay ve 85 °C'de 12 ay sonunda gerilme-çatlak direncinde keskin bir düşüş gözlenmiştir.

Bu çalışmada, orta ölçekli direk kesme cihazı kullanılarak zemin ile GM arasındaki ara yüzey sürtünme açısı belirlenmiştir. GM olarak PVC ve TPO kullanılmıştır. PVC ve TPO genellikle bina temellerinde bohçalama amacıyla kullanıldığından zemin türü olarak yerleşimin çok yoğun olduğu İzmir ili, Karşıyaka ilçesi, Mavişehir mahallesinden alınan killi zemin kullanılmıştır. Ayrıca zeminin temin edildiği bölge kıyı şeridinde yakın olduğu için deniz suyu yer altı suyuna infiltre olabilmekte ve yer altı suyundaki tuz miktarı artabilmektedir. Uzun süreler bu tuza maruz kalan GM'lerin mekanik ve kimyasal özellikleri bozulabilmektedir. Bu durumu temsil etmesi amacıyla 0.5M tuzlu su hazırlanmış ve GM'ler bu tuzlu suda 4, 8 ve 16 ay boyunca kür edilmiştir. Öncelikle zeminin geoteknik indeks parametreleri ve içsel sürtünme açısı (ϕ) belirlenmiştir. Daha sonra, kür edilmemiş ve kür edilmiş GM'ler ile zeminler arasında oluşan ara yüzeylerin sürtünme açıları (δ) belirlenmiştir. Bu çalışma ile birlikte farklı kalınlıktaki ve türdeki GM'ler ile yerleşim yerlerinde sıkça rastlanılan bir zemin türünün arasındaki ara yüzey kayma davranışı belirlenmiştir. Ayrıca literatürde daha önce hiç çalışılmamış ve bu konuda açık bulunan, tuzlu su içerisinde kür edilmiş GM'ler ile direk kesme deneyleri gerçekleştirilmiş ve bu belirsizlik giderilmeye çalışılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Zemin

Çalışmada, İzmir ili, Karşıyaka ilçesi, Mavişehir mahallesinden elde edilen düşük plastisiteli kil (CL) zemin kullanılmıştır ve makalede yerel zemin (YZ) olarak adlandırılmıştır. Bu zeminin tercih edilme nedeni PVC ve TPO GM'lerin genellikle yapıların temellerinde bohçalama amacıyla kullanılmasıdır. Kuru ve ıslak elek analizi deneylerinden elde edilen dane dağılım grafiği Şekil 1'de gösterilmiştir (ASTM D6913).



Şekil 1. Yerel zemin dane dağılım grafiği

Çeşitli laboratuvar deneylerinden ve USCS sınıflandırma sisteminden elde edilen zeminin geoteknik indeks özellikleri ise Tablo 1'de listelenmiştir (ASTM D854, ASTM D4318, ASTM D698, ASTM D422, ASTM D2487).

Tablo 1. Yerel zemin geoteknik indeks özellikleri

Parametre	Yerel Zemin (YZ)
Özgül ağırlık, G_s	2.6
Likit limit, LL (%)	30.7
Plastik limit, PL (%)	21.2
Maks. kuru birim hacim ağırlık, $\gamma_{dry,maks}$ (kN/m ³)	18.9
Optimum su içeriği, w_{opt} (%)	11.3
USCS class	CL

2.2. Geomembranlar

Bu çalışmada 1.5 mm kalınlığında PVC ve TPO, 3.0 mm kalınlığında PVC GM kullanılmıştır. Her iki GM türü de aynı amaçla (temel tabanında bohçalama ve çatılarda yalıtım) kullanılmaktadır. Ancak PVC Türkiye'de daha çok kullanılmakta ve talep fazla olduğu için daha çok üretilmektedir. TPO'nun üretim maliyeti PVC'ye göre daha düşüktür ve üretimi sırasında çevreye zararı PVC'ye göre oldukça düşüktür. Buna rağmen dünya ile kıyaslandığında Türkiye'de kullanımı oldukça sınırlıdır ve talep az olduğu için daha yüksek ücretlere satılmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada PVC ile TPO'nun kıyaslanması amaçlanmıştır. PVC GM, sentetik hammaddelerden yapılmış, sıvı ve ısı yalıtımı için kullanılan koruyucu bir tabakadır. Petrokimya tesislerinde yağ ve tuzdan üretilen bir polimer türüdür. PVC hammaddesinin yumuşatıcılar, stabilizatörler (güçlendiriciler) ve çeşitli katkı maddeleri ile bir mikserde karıştırılması,

uygun sıcaklıkta bir ekstrüzyon sistemi yardımıyla işlenmesi ve homojen bir şekilde şekillendirilmesi ile üretilirler. Çalışmada kullanılan 1.5 ve 3.0 mm PVC'nin temel özellikleri Tablo 2'de listelenmiştir.

Tablo 2. PVC geomembran temel özellikleri

Temel özellikler	Birim	1.5 mm PVC	3.0 mm PVC
Yırtılma direnci	N	150	250
Ek yeri dayanımı	N/5cm	800	1000
Çekme direnci	N/mm ²	15	15
Kopma uzaması	%	250	250
Su geçirmezlik	-	Tam	Tam
Yaşlandırma sonrası su geçirmezlik	-	Tam	Tam
Kimyasallara dayanım sonrası su geçirmezlik	-	Tam	Tam
Yangına tepki	-	Sınıf E	Sınıf E
Darbeye karşı direnç	mm	700	1500
Statik yüklere karşı direnç	kg	20	20

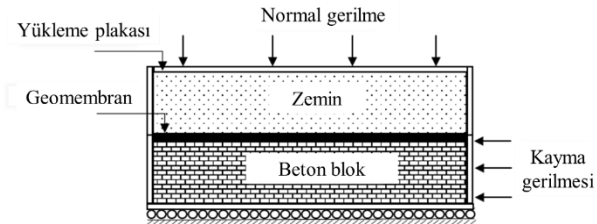
Termoplastik Polyolefin (TPO) atmosfer koşullarına ve UV ışınlarına dayanıklı zamanla yaşlanma veya sertleşme yapmayan temel bohçalama, yeşil çatı, metal çatı ve ters çatı yalıtımında kullanılan cam tülü keçe takviyeli sentetik su yalıtım örtüsüdür. Literatürde FPO (esnek Polyolefin) adıyla da anılmaktadır. İçeriğinde PVC veya plastifiyan içermediğinden çevreye zararlı madde yaymaz bu nedenle PVC GM'ye göre oldukça çevre dostu bir üründür. Çalışmada kullanılan 1.5 mm TPO'nun temel özellikleri Tablo 3'te listelenmiştir.

Tablo 3. TPO geomembran temel özellikleri

Temel özellikler	Birim	Değer
Kalınlık	mm	1.5
Yırtılma direnci	N	350
Ek yeri dayanımı	N/5 cm	300
Çekme direnci	N/mm ²	20
Kopma uzaması	%	15
Su geçirmezlik	-	Tam
UV radyasyon, yüksek sıcaklık ve su ile uzun süreli yaşlandırma	-	Sınıf 0
Yangına tepki	-	Sınıf E
Darbeye karşı direnç	mm	450
Statik yüklere karşı direnç	kg	20

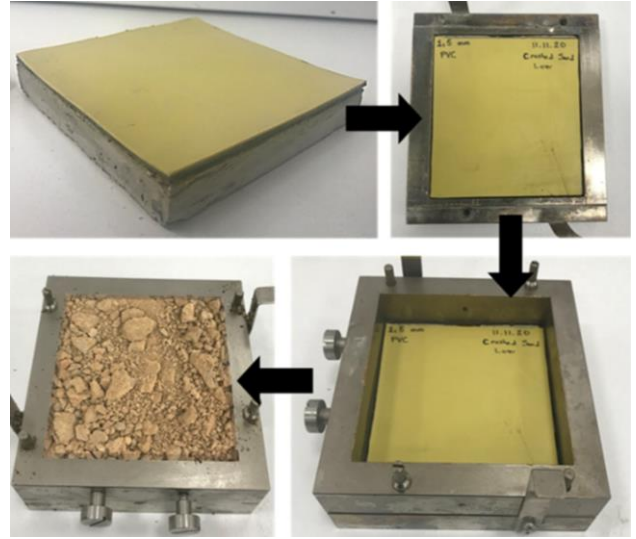
2.3. Orta ölçekli direk kesme deneyleri

Laboratuvar deneylerinin ilk aşamasında, zeminin içsel sürtünme açısı, ASTM D3080'e göre geleneksel direk kesme deneyi ile 100 x 100 mm boyutlarında direk kesme kutusu kullanılarak belirlenmiştir. Literatürde bu boyutlara sahip cihazlara orta ölçekli direk kesme cihazı adı verilmiştir (Dadkhah vd. 2010, Sobol vd. 2015, Mohapatra vd. 2016, Zahran ve Naggar 2020). Zemin – GM ara yüzeylerinin ara yüzey sürtünme açıları (δ) ise yine orta ölçekli direk kesme cihazı kullanılarak ASTM D5321'e göre elde edilmiştir. Ara yüzey direk kesme deneylerinin şematik gösterimi Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Zemin – GM ara yüzey direk kesme deneyi kurulumu

Ara yüzey direk kesme deneylerinde her bir numune için ayrı ayrı direk kesme kutusunun alt kısmının birebir boyutlarına sahip beton bloklar üretilmiş ve bu beton blok alt kutuya yerleştirilmiştir. Alt kısımda rijit bir blok kullanılmadığı takdirde normal kuvvet etkisi ile alt kısımda oturma meydana gelir ve bu nedenle GM ara yüzeyde sabit kalmaz. GM'nin deney boyunca ara yüzeyde sabit kalmasının tek yolu alt kısımda uygulanan normal kuvvet ile oturma yapmayacak bir malzeme kullanılmasıdır. Ayrıca her bir deney için beton bloğun döküm aşamasında kalıbın alt yüzeyine GM yerleştirilmiş ve beton GM'nin üstüne dökülmüştür. Böylece GM'lerin kalınlıkları farklı da olsa tüm deneylerde GM'ler tam ara yüzeyde yer almıştır. Alt kutuya yerleştirilen beton ve GM'den sonra üst kutuya ise zemin yerleştirilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. Ara yüzey direk kesme deneyleri numune hazırlama aşamaları

Optimum su içeriğinde hazırlanan numuneler maksimum kuru birim hacim ağırlık sıklığında direk kesme kutusuna yerleştirilmiştir. Deney sırasında numunelerin %100 doymun olması amaçlanmıştır bu nedenle deneyden önce numuneler yaklaşık iki saat su içerisinde bekletilmiştir. Deney sonrasında numunelerin su içerikleri belirlenmiş ve su içeriklerinde %1 ile %4 aralığında bir azalma olduğu görülmüştür.

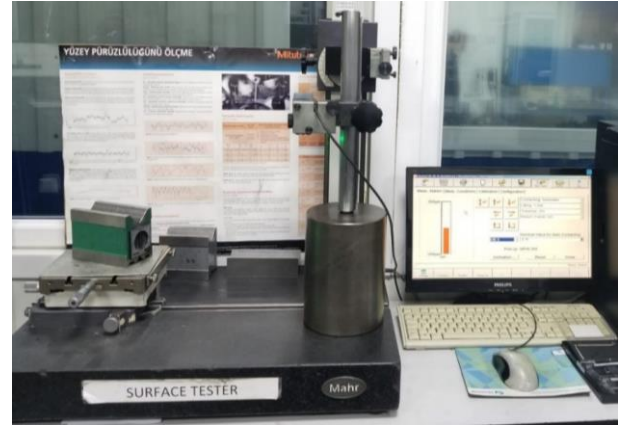
Direk kesme deneylerinin I. aşamasında, tuzlu suya maruz kalmamış GM'ler ve boşluk sıvısı olarak musluk suyu kullanılmıştır. Deneylerin II. aşamasında, GM'ler 4 ay boyunca 0.5M tuzlu suda tutulmuş ve daha sonra direk kesme deneylerinde bu GM'ler kullanılmıştır. Deneylerin III. ve IV. aşamasında ise direk kesme deneyleri bu kez 8 ve 16 ay 0.5M tuzlu suda beklemiş GM'ler ile gerçekleştirilmiştir. Orta ölçekli direk kesme deneyleri, 49, 98 ve 196 kPa'lık normal gerilme değerleri altında gerçekleştirilmiştir. Deneyler, kullanılan zeminin geçirgenliğinin düşük olması nedeniyle, aşırı boşluk suyu basınçlarının oluşmasını engellemek amacıyla 0.1 mm/dk'lık bir kesme hızıyla gerçekleştirilmiştir (Chai ve Saito 2016, Zhou vd 2020, Shi vd 2020). Oluşturulan ara yüzeyler ve gerçekleştirilen direk kesme deneyleri Tablo 4'te özetlenmiştir.

Tablo 4. Ara yüzeyler ve direk kesme deneyleri

Zemin türü	GM türü	GM kalınlığı	Kür süresi
CL	PVC	1.5 mm	0, 4, 8, 16
		3.0 mm	0, 4, 8, 16
	TPO	1.5 mm	0, 4, 8, 16

2.4. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri

Yüzey pürüzlülüğü ilk olarak, Koerner vd. (1986) tarafından imalat kalite kontrolü ve inşaat kalite güvencesi için dokusal bir indeks veya dokusal bir tanımlayıcı olarak belirtilmiştir. Bununla birlikte, günümüzde yüksek hassasiyetli ölçüm teknikleri, GM'lerin yüzey pürüzlülük ölçümlerinin sadece GM'ler için kalite tanımlayıcıları olmadığını, aynı zamanda çeşitli zemin – GM ara yüzey mekanizmalarıyla ilişkili olabileceğini kanıtlamıştır. GM yüzey pürüzlülüğünü ölçmek için kullanılan Optik Profilometre yöntemi (OPM), Gokhale ve Underwood'un (1990) teorik gelişmelerine ve Gokhale ve Drury'nin (1990) deneysel çalışmalarına dayanmaktadır. Numunelerin yüzey pürüzlülüğü, GM yüzeyinde tuzlu suyun ve kayma sırasında zeminin neden olduğu hasarı belirlemek için direk kesme testleri sonrasında bir Optik Profilometre (OPM) cihazı ile ölçülmüştür. Optik profilometre hızlı, tahribatsız ve temassız bir yüzey pürüzlülük ölçüm tekniğidir. Optik profilometre, bir lambadan gelen ışığın bir ışın ayırıcı tarafından iki yola ayrıldığı bir mikroskop türüdür. Bir yol, ışığı test edilen yüzeye, diğer yol ise ışığı bir referans aynasına yönlendirir. OPM analizi TOTOMAK Anonim Şirketinde Mahr marka profilometre cihazı ile yapılmıştır (Şekil 3). GM'nin tam orta kısmında 4 cm²'lik bir alandan hem kesme yönünde hem de kesme yönüne dik olarak ölçümler yapılmıştır. İki ölçümün ortalaması alınarak R_{maks} değeri hesaplanmıştır.

**Şekil 4.** Optik profilometre cihazı

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Geleneksel direk kesme deneyi bulguları

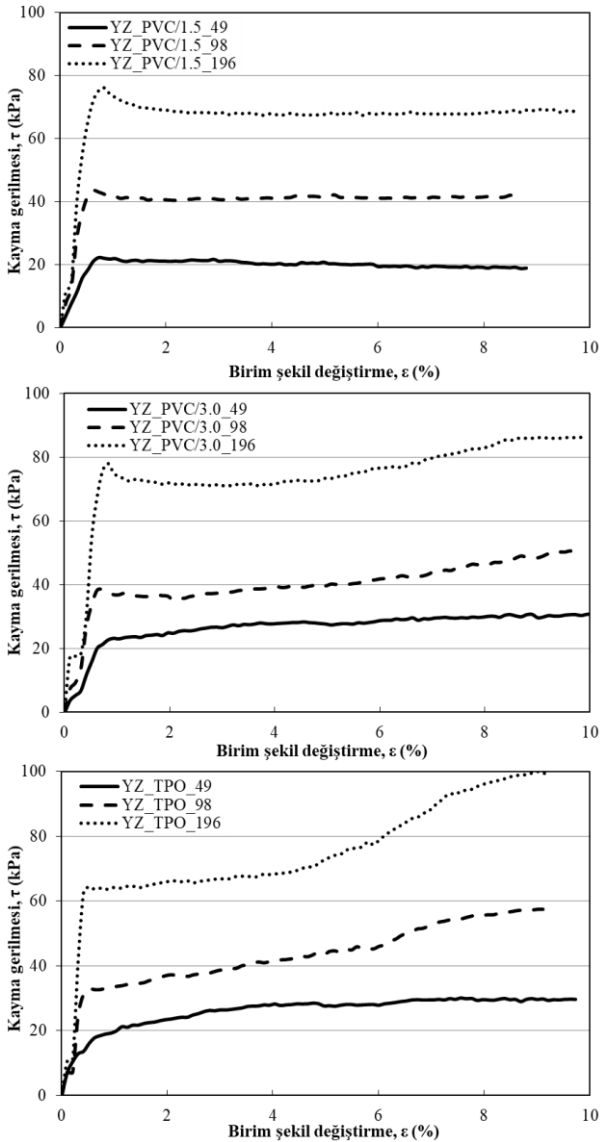
YZ'nin kayma dayanımı parametrelerini belirlemek amacıyla, maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içeriğinde hazırlanan numune ile üç normal gerilme (49, 98, 196 kPa) altında geleneksel direk kesme deneyi (zemin – zemin ara yüzeyi) gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda, YZ'nin başlangıç boşluk oranı (e_0) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) sırasıyla **0.416 ve 34.9°** elde edilmiştir.

3.2. Kür edilmemiş numunelerin ara yüzey direk kesme deneyi bulguları

GM türü ve kalınlığının zemin – GM ara yüzey kayma davranışı üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla ara yüzey direk kesme deneyleri yapılmıştır. Deneylerin tutarlılığının kontrolü için her bir numuneden iki adet deney yapılmıştır, iki deney sonucunda tutarsızlık gözlemlendiği takdirde ek deneyler yapılmış ve sonuçlar bu şekilde elde edilmiştir.. YZ – PVC/1.5, YZ – PVC/3.0 ve YZ – TPO ara yüzeylerinin kayma gerilmesi – birim şekil değiştirme grafikleri Şekil 4'te gösterilmiştir.

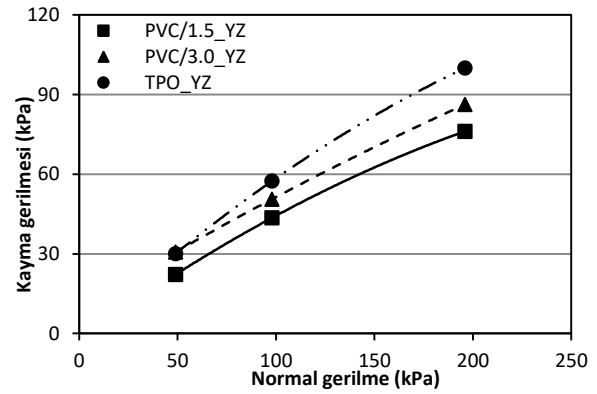
Şekil 4 incelendiğinde, PVC'ler arasında kalın olanın kayma dayanımının daha yüksek olduğu görülmektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda da aynı türde farklı kalınlıklardaki GM'lerde kalın olanın daha yüksek kayma mukavemetine sahip olduğu belirlenmiştir (Hsieh ve Hsieh 2003, Ari ve Akbulut 2022, Araujo vd. 2022). Bunun nedeni zemin danelerinin kalın GM yüzeyine daha rahat

gömülmesi ve belirli bir gömülmeden sonra zemin – GM ara yüzeyinin zemin – zemin ara yüzeyine dönüşmesidir. Bu davranış YZ_PVC/3.0_196 yüklemesinde net bir şekilde görülmektedir, yaklaşık %6 birim şekil değiştirme değerinden sonra kayma gerilmesi birden artış göstermiştir. Bu durum aynı zamanda kayma gerilmesi-birim şekil değiştirme grafiklerinin geleneksel grafiklerden farklı olmasını da açıklamaktadır. Aynı kalınlıkta farklı türdeki iki GM kıyaslandığında ise TPO'nun PVC'de daha yüksek kayma dayanımına sahip olduğu görülmektedir. Bu durum TPO'nun PVC'ye göre daha sert olması ayrıca Tablo 2 ve 3'teki bilgiler karşılaştırıldığında TPO'nun yırtılmaya karşı direnci ve çekme gerilmesinin PVC'ye kıyasla daha yüksek olması ile açıklanabilir.



Şekil 5. Kür edilmemiş numunelerin kayma gerilmesi – birim şekil değiştirme eğrileri

Zemin – PVC ve zemin – TPO ara yüzeylerinin kayma gerilmesi – birim şekil değiştirme grafiklerinden elde edilen Mohr-Coulomb yenilme zarfları Şekil 6'da gösterilmiştir. Mohr-Coulomb zarfları incelendiğinde zarfların lineer değil parabolik olduğu görülmektedir. Literatürde yapılmış çalışmalarda da kohezyonlu zeminler – GM ara yüzeylerinin kayma zarfları parabolik elde edilmiştir (Stark ve Peoppel 1994, Esterhuizen vd. 2001, Stark vd. 2005, Fleming vd. 2006). Başlangıçta normal gerilme arttıkça kayma gerilmesi de artmaktadır ancak daha yüksek normal gerilmelerde bu artış düşük normal gerilmelerdeki kadar yüksek değildir. Bunun nedeni zaman geçtikçe numunenin %100 doygunluğa yaklaşması ve konsolidasyonsuz – drenajsız (UU) davranışı göstermesidir (Esterhuizen vd. 2001).

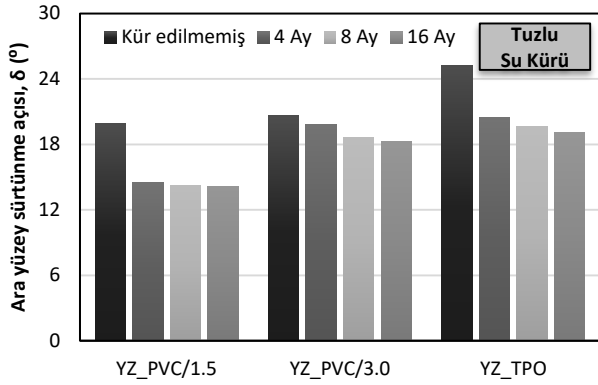


Şekil 6. Zemin – PVC (PVC/1.5_YZ, PVC/3.0_YZ) ve zemin – TPO (TPO_YZ) ara yüzeylerinin Mohr-Coulomb yenilme zarfları

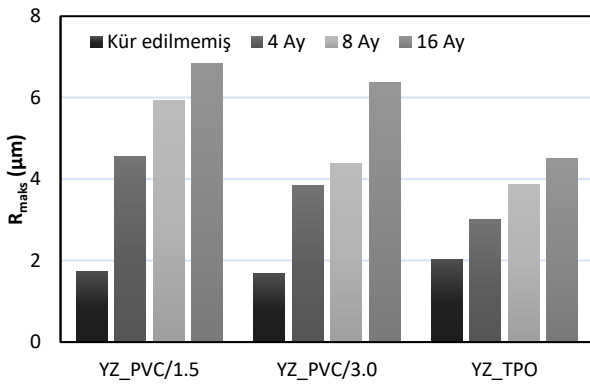
3.3. Kür edilmiş numunelerin ara yüzey direk kesme deneyi bulguları

Kıyı şeridinde yakın inşa edilen yapı temellerinde boğçalama amacıyla kullanılan GM'ler zamanla yer altı suyunda bulunan tuz nedeniyle zarar görebilirler. Bu amaçla GM'ler 4, 8 ve 16 ay boyunca hava almayan kaplarda 0.5M tuzlu su içerisinde kür edilmişler ardından ara yüzey direk kesme deneylerine tabi tutulmuşlardır. Ayrıca GM'ler üzerinde zeminin sürtünmesi nedeniyle oluşan deformasyonlar OPM cihazı ile ölçülmüş ve R_{maks} değerleri elde edilmiştir. Kür edilmiş numunelerin

ara yüzey sürtünme açıları ve R_{maks} değerleri Şekil 7 ve 8'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Kür edilmiş GM'lerin ara yüzey sürtünme açıları



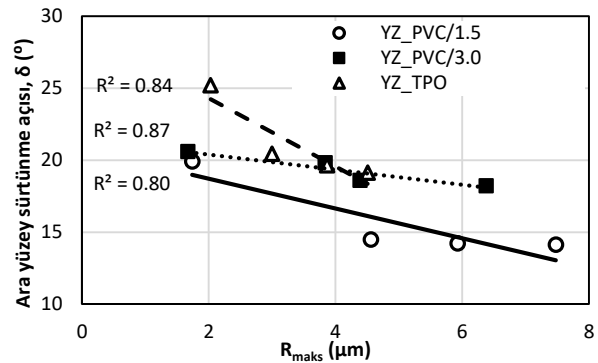
Şekil 8. Kür edilmiş GM'lerin R_{maks} değerleri

Ara yüzey sürtünme açılarındaki kür süresi arttıkça bir azalma trendi olduğu görülmektedir (Şekil 7). Kür edilmemiş ve 16 ay kür edilmiş numuneler kıyaslandığında ara yüzey sürtünme açılarındaki azalmanın sırasıyla %29, 12 ve 24 olduğu belirlenmiştir. Aynı tür farklı kalınlıklardaki iki GM karşılaştırıldığında ise kalın GM'nin tuzlu sudan negatif yönde daha fazla etkilendiği görülmektedir. Farklı türde ve aynı kalınlıktaki iki GM karşılaştırıldığında ise PVC'nin TPO'ya göre tuzlu suya karşı direncinin daha az olduğu görülmüştür. Ülkemizde en sık kullanılan GM türü PVC dir. PVC'nin tuzlu suya karşı olan direncinin TPO'ya göre daha düşük olması ve TPO'nun üretiminin daha çevre dostu olması nedeniyle PVC GM yerine TPO GM tercih edilmesi daha doğru olacaktır.

GM'ler tuzlu su vb. kimyasallara maruz kaldıklarında oksidatif bozunma oluşmaya başlar. Viebke vd. (1994) ve Hsuan ve Koerner (1998) oksidatif bozunmayı 3 aşamalı bir süreç olarak

tanımlamışlardır. İlk aşamada mühendislik özelliklerinde önemli bir değişim olmaz. İkinci aşamada oksidatif bozunmanın başladığı zamandır ve antioksidanlar tükendiği zaman başlar. Üçüncü aşamada ise oksidasyona bağlı olarak GM'nin fiziksel ve mekanik özelliklerinde önemli değişiklikler görülür. Rowe ve Shoaib (2017) çalışmalarında farklı GM türlerini 36 ay boyunca tuzlu su içerisinde bekletmiş ve oksidatif bozunma sürelerini (OIT) ölçmüşlerdir. Deney sonuçlarına göre 4. ay sonunda OIT yaklaşık %16, 8. ay sonunda yaklaşık %24, 16. ay sonunda ise yaklaşık %38 azalmıştır. Mills vd. (2019) tuzlu su içerisinde yüksek sıcaklıkta (90°C) HDPE GM'yi kür etmişler ve OIT ölçümü yapmışlardır. Deney sonuçlarında 4. ay sonunda OIT'in yaklaşık %48, 8. ay sonunda yaklaşık %76, 16. ay sonunda ise yaklaşık %80 azaldığı belirlenmiştir. Bu çalışmada tuzlu suda kür edilen numunelerin ara yüzey sürtünme açılarındaki azalmanın nedeni de GM'de oluşmuş olabilecek oksidatif bozunma ile açıklanabilir. Şekil 8 incelendiğinde, ara yüzey sürtünme açısı en yüksek olan 4 ay kür edilmiş numunelerin R_{maks} değerlerinin en düşük olduğu, ara yüzey sürtünme açısı en düşük olan 16 ay kür edilmiş numunelerin R_{maks} değerlerinin en yüksek olduğu görülmektedir. Bu da oksidatif bozunmanın fiziksel yönde bir göstergesi olmuştur.

Ara yüzey sürtünme açıları ile R_{maks} değerleri arasında bir korelasyon oluşturmak amacıyla Şekil 9 elde edilmiştir.



Şekil 9. Ara yüzey sürtünme açısı - R_{maks} ilişkisi

Şekil 9'da görüldüğü üzere ara yüzey sürtünme açısı - R_{maks} korelasyonunun R^2 değerleri 1'e oldukça yakın elde edilmiştir. Bu eğrilerden elde edilen üç adet denklemin katsayılarının ortalaması alınmış ve bir denklem elde edilmiştir (Denklem 1).

$$\delta = -1.31R_{maks} + 23.76 \quad (1)$$

Denklem 1 kullanılarak ara yüzey sürtünme açısı girdi olarak alınıp tahmini R_{maks} değerleri ve hata payları hesaplanmış ve Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Tahmini R_{maks} değerleri ve hata payları

Ara yüzey		Kür süresi			
		0	4	8	16
YZ_PVC/1.5	R _{maks} tahmin	2.94	7.07	7.28	7.33
YZ_PVC/3.0		2.41	3.01	3.93	4.22
YZ_TPO		-1.10	2.52	3.13	3.53
YZ_PVC/1.5	Hata değeri	1.20	2.51	1.35	-0.15
YZ_PVC/3.0		0.74	-0.83	-0.46	-2.16
YZ_TPO		-3.13	-0.48	-0.74	-0.98

Hata paylarının 0.15 ile 3.13 aralığında değiştiği belirlenmiştir. Sonraki çalışmalarda deney sayısının arttırılması hata paylarını minimuma indirebilir ve daha kesin bir denklem elde edilmesini sağlayabilir.

4. Sonuç

Bu çalışmada zemin – GM ara yüzeyinin kayma dayanımı davranışı incelenmiştir. Zemin – GM ara yüzey sürtünme açıları orta ölçekli direk kesme cihazı ile belirlenmiştir. GM türü ve kalınlığının ara yüzey kayma davranışı üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amacıyla aynı tür (PVC) farklı kalınlıkta (1.5 ve 3.0 mm) ve farklı tür (PVC ve TPO) aynı kalınlıkta (1.5 mm) üç farklı GM kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre en büyük kayma dayanımı ve sürtünme açısı zemin – TPO ara yüzeyinde elde edilmiştir. En düşük kayma dayanımı ve sürtünme açısı ise zemin – PVC/1.5 ara yüzeyinde elde edilmiştir. Aynı durum tuzlu suda kür edilmiş GM'ler için de geçerlidir. Ancak tuzlu sudan en fazla zarar gören GM 1.5 mm PVC iken en az zarar gören 3.0 mm PVC dir. Yani aynı kalınlıkta TPO PVC ye göre tuzlu suya karşı daha dayanıklıdır. Aynı tür GM'ler içinde ise kalın olan tuzlu suya karşı daha dirençlidir. Elde edilen bu çıkarımlar yapılan yüzey pürüzlülük deneyleri ile de desteklenmiştir.

Bu çalışmadan çıkarılacak en önemli sonuç, kıyı şeridinde yakın inşa edilen yapılarda, temelde bohçalama amacıyla kullanılan PVC ve TPO'nun ara

yüzey sürtünme açısında 16 ay sonunda en az %12 en fazla %29 luk bir azalma olduğudur. Bu nedenle bundan sonra yapılacak çalışmalarda ve projelerde bu azalma göz önünde bulundurulmalı ve yalnızca zeminin kayma dayanımı parametrelerine göre projelendirme yapılmamalıdır. Ayrıca günümüzde, ülkemizde bohçalama amacıyla PVC çok sık tercih edilmektedir. Ancak çalışma sonucu göstermiştir ki TPO'nun ara yüzey kayma dayanımı parametreleri daha yüksektir.

Teşekkür

Katkıları ve yardımları için "TOTOMAK Makina ve Yedek Parça Sanayi ve Ticaret Anonim" ve "BTM" şirketlerine teşekkür ederiz. Bu çalışma TUBITAK 2211-A eğitim burs programı kapsamında desteklenmektedir.

5. Kaynaklar

- Abdelaal, F., Rowe, R.K. and Brachman, R.W.I., 2014. Brittle rupture of an aged HDPE geomembrane at local gravel indentation under simulated field conditions. *Geosynthetic International*, **21(1)**, 1-23.
- Araujo, G.L.S., Sanchez, N.P., Palmeira, E.M. and Almeida, M.G.G., 2022. Influence of micro and macroroughness of geomembrane surfaces on soil-geomembrane and geotextile-geomembrane interface strength. *Geotextiles and Geomembranes*, **50(4)**, 751-763.
- Ari, A. and Akbulut, S., 2022. Evaluation of sand–geomembrane interface behavior using discrete element method. *Granular Matter*, **24(1)**, 1-9.
- ASTM D2487-17, 2017. Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System), ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- ASTM D3080/3080M-11, 2012. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- ASTM D422-63 (2007)e2, 2016. Standard test method for particle-size analysis of soils (Withdrawn 2016), ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.

- ASTM D4318-17e1, 2018. Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- ASTM D5321/5321M – 20, 2020. Standard Test Method for Determining the Shear Strength of Soil – Geosynthetic and Geosynthetic – Geosynthetic Interfaces by Direct Shear, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- ASTM D6913/D6913M-17, 2017. Standard test methods for particle-size distribution (Gradation) of soils using sieve analysis, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- ASTM D698-12, 2014. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)), ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- ASTM D854-14, 2016. Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- Bonnour, H., Barral, C. and Touze-Foltz, N., 2015. Altered geosynthetic clay liners: effect on the hydraulic performance of composite liners. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, **19(9)**, 1155-1176.
- Bowles, J.E., 1997. Foundation analysis and design. Fifth edition, McGraw-Hill.
- Byrne, J.R., Kendall, J. and Brown, S., 1992. Cause and Mechanism of Failure of Kettleman Hills Landfill B19, Phase IA. *Geotechnical Special Technical Publication*, **2**, 1188-1215.
- Chai, J.C., Miura, N. and Hayashi, S., 2005. Large-scale tests for leachate flow through composite liner due to geomembrane defects. *Geosynthetic International*, **12(3)**, 134–144.
- Chai, J.C. and Saito, A., 2016. Interface shear strengths between geosynthetics and clayey soils. *International Journal of Geosynthetic and Ground Engineering*, **2(19)**, 3-9.
- Chen, W., Xu, T. and Zhou, W., 2021. Microanalysis of smooth Geomembrane–Sand interface using FDM–DEM coupling simulation. *Geotextiles and Geomembranes*, **49**, 276-288.
- Dadkhah, R., Ghafoori, M., Ajalloeian, R. and Lashkaripour, G.R., 2010. The effect of scale direct shear test on the strength parameters of clayey sand in Isfahan City, Iran. *Journal of Applied Science*, **10(18)**, 2027-2033.
- Das B.M., 2007. Principles of foundation engineering. Sixth edition, Thomson.
- Effendi, R., 2011. Interface friction of smooth geomembranes and Ottawa sand. *Info Teknik*, **12(1)**, 61-72.
- Esterhuizen, J.J.B., Filz, G.M. and Duncan, J.M., 2001. Constitutive behavior of geosynthetic interfaces. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **127**, 834–840.
- Feng, S.J., Chen, Y.M. and Gao, G.Y., 2007. Analysis on translational failure of landfill along the underlying liner system. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, **29(1)**, 15-20.
- Fleming, I.R., Sharma, J.S. and Jogi, M.B., 2006. Shear strength of geomembrane–soil interface under unsaturated conditions. *Geotextiles and Geomembranes*, **24**, 274–284.
- Gokhale, A.M. and Drury, W.J.A., 1990. General Method for Estimation of Fracture Surface Roughness: Part II. Practical Considerations. *Metallurgical Transactions A*, **21A**, 1201-1207.
- Gokhale, A.M. and Underwood, E.E.A., 1990. General Method for Estimation of Fracture Surface Roughness: Part I. Theoretical Aspects. *Metallurgical Transactions A*, **21A**, 1193-1199.
- Grubb, D., Cheng, S. and Diesing, W., 1999. High altitude exposure testing of geotextiles in the Peruvian Andes. *Geosynthetic International*, **6(2)**, 119-144.
- Hsieh, C. and Hsieh, M.W., (2003). Load plate rigidity and scale effects on the frictional behavior of sand/geomembrane interfaces. *Geotextiles and Geomembranes*, **21(1)**, 25-47.
- Hsuan, Y. and Koerner, R., 1998. Antioxidant depletion lifetime in high density polyethylene geomembranes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **124(6)**, 532-541.

- Koerner, R.M., Martin, J.P. and Koerner, G.R., 1986. Shear strength parameters between geomembranes and cohesive soils. *Geotextiles and Geomembranes*, **4(1)**, 21-30.
- Koerner, R.M. and Soong, T.Y., 2000. Stability assessment of ten large landfill failures. *Advances in transportation and geoenvironmental systems using geosynthetics*, 1–38.
- Mccartney, J.S. and Zornberg, J.G., 2009. Analysis of a large database of GCL-geomembrane interface shear strength results. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **135(2)**, 209-223.
- Mills, A., Fraser, B. and Beaumier, D., 2019. Long-term performance of HDPE geomembranes exposed to a high temperature brine solution. *Geosynthetics Conference, Houston, Texas*.
- Mitchell, J.K., Seed, R.B. and Seed, H.B., 1990. Kettleman Hills waste landfill slope failure. I: Liner-System Properties. *Journal of Geotechnical Engineering*, **116(4)**, 647-668.
- Mohapatra, S.R., Mishra, S.R., Nithin, S. and Rajagobal, K., 2016. Effect of Box Size on Dilative Behaviour of Sand in Direct Shear Test. *Indian Geotechnical Conference, Chennai, India*, **16**, 111-118.
- O'Rourke, T.D. and Druschel, S.J., 1990. Shear Strength Characteristics of Sand-Polymer Interfaces. *Journal of Geotechnical Engineering*, **116(5)**, 451-469.
- Punetha, P., Mohanty, P. and Samanta, M., 2017. Microstructural investigation on mechanical behavior of soil – geosynthetic interface in direct shear test. *Geotextiles and Geomembranes*, **45**, 197-210.
- Qian, X.D., Shi, J.Y., Hui, L. and Zhu, Y.B., 2011. Failure interface behavior of multilayer landfill liner system. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, **33(6)**.
- Rinne, N.F., 1989. Evaluation of Interface Friction between Cohesionless Soils and Common Construction Materials. Master Science Thesis, Civil Engineering Department of University of British Columbia, Vancouver, Canada, 90.
- Rowe, R.K. and Shoaib, M., 2017. Effect of brine on long-term performance of four HDPE geomembranes. *Geosynthetic International*, **24(5)**, 508-523.
- Sabiri, N.E., Caylet, A., Montillet, A., Le Coq, L. and Durkheim, Y., 2020. Performance of nonwoven geotextiles on soil drainage and filtration. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* **24(5)**, 670-688.
- Seed, R.B., Mitchell, J.K. and Seed, H.B., 1988. Slope Stability Failure Investigation: Landfill Unit B-19, Phase I-A, Chemical Waste Management, Inc. Facility, Kettleman Hills, California. *Report of Investigation, Department of Civil Engineering, University of California*, Berkeley, June 29.
- Seed, R.B., Mitchell, J.K. and Seed, H.B., 1990. Kettleman Hills Waste Landfill Slope Failure. II: Stability Analyses. *Journal of Geotechnical Engineering*, **116(4)**, 669-690.
- Shi, J., Shu, S., Qian, X. and Wang, Y., 2020. Shear strength of landfill liner interface in the case of varying normal stress. *Geotextiles and Geomembranes*, **48**, 713-723.
- Sobol, E., Sas, W. and Szymanski, A., 2015. Scale effect in direct shear tests on recycled concrete aggregate. *Studia Geotechnica et Mechanica*, **37(2)**, 45-49.
- Stark, T.D. and Poeppl, A.R., 1994. Landfill liner interface strengths from torsional-ring-shear tests. *Journal of Geotechnical Engineering*, **120**, 597–615.
- Stark, T.D., Niazi, F.S. and Keuscher, T.C., 2015. Strength envelopes from single and multi-geosynthetic interface tests. *Geotechnical and Geological Engineering*, **33**, 1351-1367.
- TBDY, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Resmi Gazete, Tarih: 18 Mart 2018, Sayı: 30364, 2018.
- Viebk, J., Elble, E., Ifwarson, M. and Gedde, U.W., 1994. Degradation of unstabilized medium-density polyethylene pipes in hot-water applications. *Polymer Engineering Science*, **34(17)**, 1354-1361.
- Zahran, K. and El Naggar, H., 2020. Effect of Sample Size on TDA Shear Strength Parameters in Direct Shear Tests. *Transportation Research Record*, **2674(9)**, 1110-1119.
- Zhou, L., Zhu, Z., Yu, Z. and Zhang, C., 2020. Shear Testing of the Interfacial Friction Between an HDPE Geomembrane and Solid Waste. *Materials*, **13**, 1-16.