

Araştırma Makalesi-Research Article

Sızıntı Sıvıları ile Yıllandırılmış Geomembranların Ara Yüzey Kayma Dayanımı Davranışları

Interface Shear Strength Behaviors of Geomembranes Aged with Leachates

İnci Develioğlu¹, Hasan Fırat Pulat^{2*}

Geliş / Received: 13/10/2023

Revize / Revised: 06/02/2024

Kabul / Accepted: 30/04/2024

ÖZ

Sızdırmazlık, koruma ve ayırma gibi çeşitli mühendislik fonksiyonlarıyla kullanılan geomembranlar (GM), uzun vadede farklı sıvıların etkilerine maruz kalabilirler. Bu süreçte kimyasal yapılarında önemli ölçüde bir değişiklik olmazken, fiziksel ve mekanik özelliklerinde farklılıklar gözlemlenebilir. Bu değişiklikler kısa vadede göz ardı edilebilir ancak uzun vadede göz ardı edilmemelidir. Bu çalışmada, farklı sızıntı sıvılarında yıllandırılan GM ve zemin arasında oluşan ara yüzeylerin kayma dayanımı davranışları incelenmiştir. Zemin olarak kum-bentonit (KB) karışımı kullanılırken, GM olarak yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) ve termoplastik poliolefin (TPO) kullanılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında, zeminin geoteknik indeks ve kayma mukavemeti parametreleri belirlenmiştir. İkinci aşamada ise, zemin – GM ara yüzeylerinin kayma mukavemeti davranışları hem yıllandırılmış hem de yıllandırılmamış GM'ler için belirlenmiştir. Saha koşullarını yansıtabilmek için laboratuvar koşullarında farklı sentetik atık sızıntı sıvıları (asidik maden drenaj sızıntı suyu (AMD), kömür yanma ürünü sızıntı suyu (CCP) ve kentsel katı atık sızıntı suyu (MSW)) hazırlanmıştır. GM'ler bu sızıntı sıvılarında 4 ve 16 ay boyunca yıllandırılmış ve ardından ara yüzey kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ara yüzey sürtünme açılarının tüm yıllandırma sıvılarından önemli ölçüde olumsuz etkilendiği tespit edilmiştir. AMD'nin GM'lerin arayüzey sürtünme açıları üzerinde en olumsuz etkiye sahip olduğu, CCP'nin ise en az hasara neden olduğu görülmüştür. Bu çalışma, tasarımlarda kullanılan ara yüzey sürtünme katsayılarının uzun vadede kimyasallara maruz kalan GM'ler için yeterli olmadığını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler- Ara Yüzey Kayma Dayanımı, Geomembran, Sızıntı Sıvısı, Yıllandırma

ABSTRACT

Geomembranes (GM), used in various engineering functions, such as sealing, protection and separation, may be exposed to the effects of various liquids in the long term. In this process, while there is no significant change in their chemical structure, changes in their physical and mechanical properties can be observed. These changes can be ignored in the short term but not in the long term. In this study, the shear strength behaviors of the interfaces between GM and soil aged in different leachates was investigated. A sand-bentonite mixture was used as soil, while high density polyethylene (HDPE) and thermoplastic polyolefin (TPO) were used as GM. In the first stage

¹İletişim: inci.develioglu@ikcu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-6594-8095>)

İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, 35620, Balatçık, Çiğli, İzmir-Türkiye

^{2*}Sorumlu yazar iletişim: hfiat.pulat@ikcu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-8298-7106>)

İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, 35620, Balatçık, Çiğli, İzmir-Türkiye

of the study, the geotechnical index and shear strength parameters of the soil were determined. In the second stage, the shear strength behavior of the soil–GM interfaces was determined for both unaged and aged GMs. Different synthetic waste leachates (acidic mine drainage leachate (AMD), coal combustion product leachate (CCP) and municipal solid waste leachate (MSW)) were prepared under laboratory conditions to simulate field conditions. The GMs were aged in these leachates for 4 and 16 months and interface direct shear tests were performed. The interface friction angles were found to be significantly adversely affected by all aging liquids. AMD was found to have the most detrimental effect on the interface friction angles of GMs, while CCP caused the least damage. This study has shown that the interface coefficients used in the designs are not sufficient for GMs exposed to chemicals in the long term.

Keywords- Aging, Geomembrane, Interface Shear Strength, Leachate

I. GİRİŞ

En yaygın termoplastik grubu olan poliolefinler, sık sık tercih edilen polipropilen ve polietilen türleriyle çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Poliolefinler, etilen, propilen, bütlen, izopren veya penten gibi basit olefinlerden, kopolimerlerden veya türev modifikasyonlarından meydana gelen polimerlerdir. Bu poliolefin türlerinden biri olan HDPE GM'ler, düzenli depolama sahalarındaki kompozit yalıtım sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemler tipik olarak bir çakıl sızıntı suyu toplama katmanı, bir geotekstil (GTX) koruma – drenaj katmanı ve bir geosentetik kil örtü (GCL) veya sıkıştırılmış kil örtü (CCL) içerir. HDPE GM'ler inorganik kirleticilere karşı etkili difüzyon bariyerleri oluşturur ve advektif akışı en aza indirir. Tipik olarak düzenli depolama sahası sızıntı suyunda bulunan çeşitli kirleticilere karşı mükemmel kimyasal direnç gösterirler. Gösterilen bu kimyasal direncin uzun vadede devam edip etmeyeceği sorusunun cevabı ise belirsizdir. Uzun vadede, HDPE GM'lerin atık depolama sahası taban kaplamalarındaki performansı öncelikle antioksidanların tükenmesinden etkilenir. Bu süreç, GM yüzeyindeki antioksidanların kimyasal reaksiyonunu veya çözünmesini ve ardından konsantrasyon gradyanları nedeniyle çekirdek yapıdan yüzeye difüzyonunu içerir. Antioksidanların kademeli kaybı GM'yi ikinci önemli bozunma olan oksidatif bozunma mekanizmasına karşı savunmasız hale getirir [1-4]. Literatürdeki çok sayıda çalışma, yaşlanmanın HDPE GM'ler üzerindeki etkilerini incelemeye odaklanmıştır. Ancak bu çalışmalar, GM'leri belirli süreler boyunca çeşitli kimyasallara maruz bırakarak oksidatif indüksiyon süresini (OIT) belirlemek ve bunun sonucunda mekanik özelliklerinde meydana gelen azalmayı değerlendirmekle sınırlı kalmıştır [5-8]. Sun vd. (2019) [9], HDPE GM'lerin saha ortamlarındaki uzun vadeli davranışlarını incelemek amacıyla analitik, mekanik ve geoelektrik sızıntı yeri testlerini kullanan kapsamlı bir çalışma yürütmüştür. Çalışmada, yıllandırılan GM'lerin deney sonuçlarını değerlendirmek amacıyla LandSim ve HELP gibi modeller kullanılmıştır. Bulgular, HDPE GM'lerin yaklaşık 8 yıllık depolama sahası işletiminden sonra faydalı ömürlerinin sonuna ulaştığını ve ardından hidrolik performanslarının hızla bozulduğunu ortaya koymuştur. Bu bozulma, sızıntı sıvısının sızmasında artışa yol açmış ve başlangıçtaki 0.05 ile 0.6 m³/gün aralığında olan sızıntı miktarı uzun vadede 27.4 ile 37.6 m³/gün aralığına yükselmiştir. Ayrıca, yeraltı suyu üzerindeki etkisinin bu değişikliklerden önemli ölçüde etkilendiği de tespit edilmiştir. Etkilenen alan 50 metreden 1000 metreye genişlemiş ve kirlilik olasılığı “neredeyse imkânsızdan” “neredeyse kesine” yükselmiştir. Bu bulgular, düzenli depolama sahalarının uzun vadeli çevresel etkilerini değerlendirirken HDPE GM'lerin yıllanmasını ve bozulmasını göz önünde bulundurulmasının hayati önemini vurgulamıştır. Bu araştırmalar her ne kadar değerli bilgiler barındırsa da düzenli depolama sahalarında, GM'ler ile kullanılan zeminler arasında bir kayma yüzeyi oluştuğunu unutmamak önemlidir. Sonuç olarak, sadece GM'lerin mekanik özelliklerinde değil, aynı zamanda yıllanmaya bağlı olarak ara yüzey kayma mukavemeti özelliklerinde de meydana gelen değişikliklerin araştırılması büyük önem taşımaktadır. Rowe vd. (2010) [10], bir HDPE'nin antioksidan kapasitesini kaybedip kaybetmediğini belirlemek için hızlandırılmış yıllandırma deneyleri (kentsel katı atık sızıntı sıvısında) gerçekleştirmişlerdir. Kompozit örtü sistemlerindeki GM'lerin yüksek basınç, sıcaklık ve sürekli sızıntı sıvısı sirkülasyonu altında yıllanmasını araştırarak antioksidan tükenme oranlarını incelemişlerdir. Çalışmada, 250 kPa'lık normal gerilmede simüle edilen düzenli depolama sahası örtüsü için antioksidan tükenme oranlarının 55, 70 ve 85°C sıcaklıklarda sırasıyla 0.05, 0.19 ve 0.41 ay⁻¹ olduğu belirlenmiştir. Bu oranlar, aynı sıcaklıklarda 0.12, 0.39 ve 1.10 ay⁻¹ olan aynı GM üzerinde geleneksel sızıntı sıvısında yıllandırma testlerinden elde edilenlerden daha düşüktür. Yıllandırma deneyleri sırasında, GM'nin kristalinitesi ve akma çekme gerilmesi başlangıçta artmış ve daha sonra çalışma boyunca çoğunlukla sabit kalmıştır, ayrıca diğer GM özelliklerinde de önemli değişiklikler görülmemiştir. Li vd. (2021) [11] sızıntı sıvısına maruz bırakılan beş farklı tür ve 4 farklı kalınlıkta (1.0, 1.5, 2.0 ve 2.5 mm) HDPE GM'nin antioksidan tükenme aşaması ömrünü araştırmışlardır. Antioksidan tükenme hızı (ADR) ve antioksidan tükenme süresi (ADT), toplanan verilerin Arrhenius modeline dayandırılarak elde edilen yaşlanma parametrelerine göre hesaplanmıştır. Ayrıca, sızıntı sıvısı 15, 20, 25, 30, 35 ve 40°C'lere ısıtılarak, maruz kalma koşullarının HDPE'nin bozunma performansı üzerindeki etkisi de analiz edilmiştir. Sonuçlar, HDPE GM kalınlığının ADT süresi üzerinde en az etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Marka/malzeme, sızıntı suyu bileşenleri ve maruz kalma ortamına karşı ADR duyarlılığı artan sıcaklıkla birlikte azalmıştır; sadece kalınlığa karşı duyarlılık

artan sıcaklıkla birlikte hafif bir artış eğilimi göstermiştir. HDPE farklı maruz kalma koşulları altındaki ADT'leri 6 yıl ile 900 yıl arasında değişmektedir, bu da HDPE GM'lerin makul maruz kalma koşulları altında düzenli depolama sahalarının hizmet süresini tamamlayabileceğini göstermektedir.

Çok sayıda araştırmacı zemin ve GM'ler arasındaki ara yüzey kayma mukavemeti davranışını incelemiş olsa da [12-16], yığandırmanın ara yüzey kayma mukavemeti üzerindeki etkisini inceleyen bir çalışma bulunmamaktadır. Chai ve Saito (2016) [12], büyük ölçekli bir kesme kutusu cihazı kullanarak GM ile killi bir zeminin ara yüzey kayma mukavemeti parametrelerini incelemişlerdir. Kuvars ve bentonit tozu, 30/70 oranında killi bir zemin ile karıştırılmıştır. Üç farklı GM türü kullanılmıştır, bunlar; polivinil klorür (PVC), polietilen (PE) ve HDPE'dir. Büyük ölçekli kesme kutusu aparatının üst çenesinin boyutu 200x450x100 mm ve alt çenesinin boyutu 200x200x70 mm'dir. Deneylerde 50, 80 ve 100 kPa normal gerilmeler kullanılmıştır. Deney sonuçları maksimum ara yüzey kayma mukavemetinin kuvars/bentonit karışımı ile PVC GM ara yüzeyinde elde edildiğini göstermiştir. Bentonit ile GM ara yüzey sürtünme açıları oldukça düşük (3° - 4°) elde edilmiştir. Kesme kutusu deneyi sırasında bentonitten su çıkışı olduğu ve GM ile bentonit partikülleri arasında bir su membranı oluştuğu, bu nedenle ara yüzey sürtünme açısının düşük elde edildiği varsayılmıştır. Tüm numuneler için ara yüzey kayma mukavemeti, zeminin kayma mukavemetinden yaklaşık %55 daha küçük elde edilmiştir. Stark ve Santoyo (2017) [13], on GM ve iki zemin arasındaki ara yüzey kayma mukavemeti davranışlarını araştırmışlardır. Yedi GM'nin yüzeyi pürüzsüz, üçünün ise pürüzlüdür ve kalınlıkları 0.75 ile 1.5 mm arasında değişmektedir. Kullanılan GM türleri PVC, HDPE, lineer düşük yoğunluklu polietilen (LLDPE), kaplamalı dokuma polietilen ve TPO'dur. Kullanılan zemin türleri killi buzul zemini ve Ottawa ince kumudur. Ara yüzey kayma mukavemeti parametreleri burulmalı halka kesme aparatı ile ölçülmüş ve kesme hızı 0.015 mm/dak olarak belirlenmiştir. Deney sonuçları, pürüzlü GM'lerin pürüzsüz GM'lerden daha büyük bir ara yüzey sürtünme açısına sahip olduğunu göstermiştir. Killi buzul zemini deneylerine göre, maksimum ara yüzey sürtünme açısı (46°) GM10'da (pürüzlü, 1.5 mm, HDPE) elde edilmiştir. Minimum ara yüzey sürtünme açısı ise (14°) GM9'da (pürüzsüz, 1.5 mm, HDPE) elde edilmiştir. Ottawa ince kumu üzerinde yapılan deneylere göre, maksimum ara yüzey sürtünme açısı (31°) yine GM10'da (pürüzlü, 1.5 mm, HDPE) elde edilmiştir. Minimum ara yüzey sürtünme açısı ise (15°) GM2'de (pürüzsüz, 1.5 mm, LLDPE) elde edilmiştir. Ayrıca, killi buzul zemin ile GM ara yüzeylerinin Ottawa kumu ile GM ara yüzeylerinden daha yüksek ara yüzey sürtünme açılarına sahip olduğu tespit edilmiştir.

Bu çalışmada ise, zemin ve GM arasında oluşan ara yüzeyin sürtünme açısını belirlemek amacıyla orta ölçekli bir kesme kutusu cihazı kullanılmıştır. Kullanılan GM türleri pürüzsüz yüzeye sahip 1.5 mm kalınlığında TPO ve HDPE'dir. Bu GM türlerinin kullanılmasının nedeni, HDPE'nin tehlikeli atık depolama sahalarında en çok tercih edilen GM olması, TPO'nun ise sınırlı kullanıma sahip olmasına rağmen HDPE'ye kıyasla düşük maliyetli ve çevreci olmasıdır. Kum-bentonit karışımı (80/20) düzenli depolama sahalarında en yaygın olarak kullanılan zemin türü olduğu için çalışmaya dahil edilmiştir. Katı atık depolama sahalarında bulunan koşulları daha iyi simüle etmek için, GM'ler laboratuvar ortamında 4 ve 16 aylık bir süre boyunca sentetik olarak hazırlanmış üç farklı sentetik sızıntı sıvıları içinde yığandırılmıştır. Bu sıvılar kentsel katı atık depolama, kömür arama ya da kömür atığı depolama ve maden arama ya da maden atıkları depolama tesislerinin sızıntı sıvılarını temsil etmektedir. Çalışmanın ilk aşamasında, zeminlerin geoteknik indeks parametreleri ve içsel sürtünme açıları (ϕ) belirlenmiştir. Daha sonra, yığandırılmamış ve yığandırılmış GM'ler ile zemin arasındaki ara yüzeylerin ara yüzey sürtünme açıları (δ) belirlenmiştir.

II. MALZEMELER VE YÖNTEMLER

Bu bölümde, çalışmada kullanılan malzemeler ve deney yöntemleri detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

A. Malzemeler

Ara yüzey kesme kutusu deneylerinde zemin olarak %20 bentonit ve %80 kırma kum karışımı kullanılmıştır. Kullanılan bentonit türü Sodyum bentonittir. Bu zemin türünün kullanılma nedeni atık depolama sahalarında GM altında ya da üstünde en sık tercih edilen zemin türü olmasıdır. Kullanılan KB karışımının fiziksel görünüşü Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. KB zemin fiziksel görünüşü

Tablo 1'de laboratuvar deneyleriyle elde edilen, KB'nin geoteknik indeks özellikleri sunulmaktadır. Ayrıca, ASTM D2487 [17] standardına uygun olarak Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemi (USCS) kullanılarak tanımlanan zemin sınıfı da Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. KB zeminin geoteknik indeks özellikleri

Özellik	KB
Özgül ağırlık, G_s	2.46
İnce dane oranı, FC (%)	23.1
Silt içeriği (%)	7.5
Kil içeriği (%)	15.6
Likit limit, LL (%)	60.7
Plastik limit, PL (%)	30.2
Maks. kuru birim hacim ağırlık, $\gamma_{kuru,maks}$ (kN/m ³)	17.5
Optimum su içeriği, w_{opt} (%)	13.2
Maksimum dane çapı (mm)	2.0
D_{10}	-
D_{30}	0.20
D_{60}	1.50
USCS	SC
pH	9.3

Bu çalışmada iki farklı GM türü kullanılmıştır, bunlar TPO ve HDPE'dir. Her iki GM'nin de yüzeyi pürüzsüzdür ve 1.5 mm kalınlığa sahiplerdir. Farklı GM türlerinin kullanılmasının amacı, GM türünün ara yüzey kayma mukavemeti üzerindeki etkisini araştırmaktır. Ayrıca, tüm dünyada katı atık depolama tesislerinde en çok kullanılan GM türü olan HDPE'ye alternatif başka bir GM kullanılabilir mi sorusuna da cevap vermektedir. Bu nedenle HDPE gibi yalıtım amacıyla kullanılan ancak HDPE'ye göre hem daha ekonomik hem de daha çevreci olan TPO tercih edilmiştir.

HDPE, yüksek yoğunluklu polietilenin ekstrüzyon işlemiyle üretilen ve düzgün bir biçimde homojen olarak şekillendirildikten sonra geosentetik sistemlerde astar görevi gören bir GM türüdür. Polietilen (PE) adını, polietilen oluşturmak için çeşitli yöntemlerle polimerizasyona uğrayan monomer etilenden alır. HDPE kendine, kentsel katı atık depolama sahaları, maden atık depolama sahaları, asit tankları, göletler ve sulama kanalları gibi geçirimsizliğin çok önemli olduğu projelerde uygulama alanı bulmaktadır. Bu çalışmada kullanılan HDPE, Geoplas firmasından temin edilmiş ve teknik özellikleri Tablo 2'de listelenmiştir.

Tablo 2. HDPE'nin temel özellikleri

Temel Özellikler	Birim	Değer
Kalınlık	mm	1.5
Kırılma anında çekme gerilmesi	N/mm ²	>26
Akma uzaması	%	>12
Akma dayanımı	%	>700
Statik zımbalama dayanımı	N/mm ²	>16
Oksidasyon dayanımı	%	<25
Gerilme çatlağı dayanımı	h	>200
Su geçirimsizliği	m ³ /m ² d	<10 ⁻⁶

TPO bileşikler; polipropilen (PP), çapraz bağlanmamış etilen propilen dien monomer (EPDM) kauçuk ve polietilen karışımından oluşur. TPO GM'ler mükemmel darbe direnci, düşük yoğunluk ve güçlü kimyasal direnci ile bilinirler. 1980'lerde geliştirilen TPO, çatı kaplama ve su yalıtım endüstrisinde en hızlı büyüyen GM olarak ortaya çıkmıştır. Diğer GM'lerin aksine, TPO toksik veya zararlı maddeler içermez, bu da onu çevre dostu bir ürün haline getirir. Yüksek enerji verimliliğini destekleyen mükemmel ısı direnci de dahil olmak üzere birçok avantajlı özelliğe sahiptir. Ayrıca, TPO geri dönüştürülebilir olduğundan çevreye etkisi minimum düzeydedir. Özellikle, TPO esneklik için plastikleştiricilere ihtiyaç duymaz, bu da poliolefin yapısı sayesinde kullanım ömrü boyunca dayanıklılığını ve elastikiyetini artırır. Bu çalışmada kullanılan TPO GM, BTM Yalıtım şirketi tarafından sağlanmış ve teknik özellikleri Tablo 3'te listelenmiştir.

Tablo 3. TPO'nun temel özellikleri

Temel Özellikler	Birim	Değer
Kalınlık	-	1.5
Geçirimsizlik	-	Geçirimsiz
Yangına karşı direnç	-	E sınıfı
Birleşim yeri soyulma dayanımı	N/50 mm	≥ 300
Birleşim yeri kayma dayanımı	N/50 mm	≥ 800
Çekme gerilmesi	N/50 mm	≥ 1100
Kopma uzaması	%	≥ 20
Darbe dayanımı	mm	≥ 700
Statik yükleme direnci	kg	≥ 20
Yırtılma direnci	N	≥ 300
UV dayanımı	-	Dayanıklı
Su ve kimyasallara karşı direnç	-	Dayanıklı

GM'ler kullanım ömürleri boyunca, örneğin atık depolama tesislerinde sızıntı sızıları nedeniyle, birçok farklı kimyasallara maruz kalmaktadır. Uzun yıllar maruz kalan ve yüksek oranda asidik kimyasallar içeren bu sızıntı sızıları nedeniyle, GM'lerin fiziksel ve kimyasal yapılarında bozulma meydana gelebilir. Bu bozulmanın GM'ler ile zeminler arasındaki ara yüzey kayma davranışında bir azalmaya neden olup olmadığının belirlenmesi amacıyla, bu çalışma kapsamında GM'ler farklı sızıntı sızılarında yıllandırılmıştır. Bu sızıntı sızıları doğrudan doğal ortamdan elde edilmemiş, laboratuvarında sentetik olarak hazırlanmıştır. Sızıntı sızılarının doğal ortamdan alınmayıp, sentetik olarak hazırlanmasının nedeni, deneylerin tutarlı özelliklere sahip yapılmasını sağlamak, güvenilir ve kontrollü deney koşullarına olanak tanımadır. Bu çalışmada kullanılan sızıntı sızıları; maden arama veya maden depolama tesislerinin sızıntı sızıları olan asidik maden drenajı sızıntı sızıları (AMD), kömür çıkarma veya kömür atığı depolama tesislerinin sızıntı sızıları olan kömür yanma ürünü sızıntı sızıları (CCP) ve kentsel katı atık depolama sahalarının sızıntı sızıları olan kentsel katı atık sızıntı sızılarıdır (MSW).

AMD ağır metaller içeren yüksek asitli bir sızıntı sıvısıdır. Maden arama sahaları ya da maden atıkları depolama sahalarında yağmur suyu drenajı ile oluşurlar. Sonuçlanan sıvılar son derece zehirli olabilir ve yeraltı suyu, yüzey suyu ve zeminle karıştırıldığında insanlar, hayvanlar ve bitkiler üzerinde zararlı etkilere sahip olabilirler. Çalışmada kullanılan AMD, Tablo 4'te belirtildiği gibi çeşitli kimyasal bileşiklerin damıtılmış su ile karıştırılmasıyla laboratuvarında sentetik olarak üretilmiştir. AMD sıvısının bileşimi, Gulec vd. (2005) tarafından yapılan çalışmadan elde edilmiştir. Bu karışım içerisinde metallerin (Fe, Zn, Cu ve Ca) seçimi, göreceli konsantrasyonları ve türleri belirlenmiştir [6]. Ek olarak pH ölçümleri sızıntı sıvısının hazırlandığı gün, 4, 8 ve 16 aylık aralıklarla kaydedilmiş ve sırasıyla 0.95, 0.97, 1.12 ve 1.29 olarak elde edilmiştir. Ayrıca, elektriksel potansiyeli ve viskozite değerleri ölçülmüş ve sırasıyla 308 mV ve 2.02 yüzde poise (cP) sonuçları elde edilmiştir.

Tablo 4. AMD'nin kimyasal içeriği [6]

Bileşik adı	Kimyasal formül	Miktar (mg/l)
Bakır (II) sülfat	CuSO ₄	88
Çinko sülfat heptahidrat	ZnSO ₄ .7H ₂ O	864
Sülfirik asit	H ₂ SO ₄	886
Demir (II) sülfat heptahidrat	FeSO ₄ .H ₂ O	4076
Kalsiyum sülfat	CaSO ₄	681

Kömür yakma ürünleri (CCPs), aynı zamanda kömür yakma kalıntıları (CCR) veya kömür yanma atıkları (CCW) olarak da adlandırılırlar. Bunlar genellikle çimento, yapısal dolgu, zemin iyileştirme, grout ve ahşap ürünü için bağlayıcı olarak kullanılırken, kullanılmayan kısmı katı depolama tesislerinde bertaraf edilir. CCP sızıntı sıvısı ise bu atık depolama tesislerinde oluşan sızıntı sıvılarından. Çalışmada kullanılan CCP sızıntı sıvıları, Benson vd. (2018) tarafından yapılan çalışmadan elde edilmiştir [8]. Bu veri tabanı, ana katyon ve anyonların konsantrasyonları, iyonik güç, tek değerlikli ve çok değerlikli katyonların nispi bolluğu, pH ve elektriksel iletkenlik (EC) hakkında bilgi sağlamıştır. Ek olarak pH ölçümleri CCP sızıntı suyunun hafif alkali bir yapıya sahip olduğunu göstermiştir (pH 7.67). Sonraki pH ölçümleri 4., 8. ve 16. aylarda sırasıyla 7.67, 7.70 ve 7.81 değerlerini vermiştir. Ayrıca, elektriksel potansiyeli ve viskozite ölçümleri yapılmış ve sırasıyla 26 mV ve 1.68 cP değerleri elde edilmiştir. CCP sızıntı sıvısının kimyasal bileşimi Tablo 5'te listelenmiştir.

Tablo 5. CCP'nin kimyasal içeriği [8]

Bileşik adı	Kimyasal formül	Miktar (mg/l)
Potasyum sülfat	K ₂ SO ₄	161
Sodyum klorit	NaCl	51
Kalsiyum klorit	CaCl ₂	58
Sodyum sülfat	Na ₂ SO ₄	722
Kalsiyum sülfat	CaSO ₄	987
Magnezyum sülfat	MgSO ₄	146

Kentsel katı atıklar (MSW), yaygın olarak çöp olarak bilinirler, ambalajlar, giysiler, ev artıkları, mobilyalar, aletler, şişeler, boyalar, gazeteler, piller ve benzeri gibi kullandığımız ve daha sonra atılan günlük eşyaları içerirler. MSW sızıntı sıvısı ise bu atıkların depolandığı kentsel katı atık depolama tesislerinin sızıntı sıvılarından. Bu çalışmada kullanılan MSW sızıntı sıvısı, Hrapovic ve Rowe (2002) tarafından yapılan çalışmadan elde edilen çeşitli kimyasal bileşikler (Tablo 6) kullanılarak laboratuvarında sentetik olarak üretilmiştir. Hazırlanan MSW sızıntı sıvısının, anaerobik bozulmanın mineralizasyon aşamasında yer alan asetojenik, metanojenik ve sülfidojenik bakterilerin büyümesi ve sürdürülmesi için elverişli olduğu bulunmuştur [18]. Sızıntı sıvısının pH değeri hazırlandığı gün, 4, 8 ve 16 ay sonra ölçülmüş ve sırasıyla 1.73, 1.76, 1.77 ve 1.82 değerleri elde edilmiştir. Elektriksel potansiyeli ve viskozite değerleri ölçülmüş ve sırasıyla 280 mV ve 1.89 cP sonuçları elde edilmiştir.

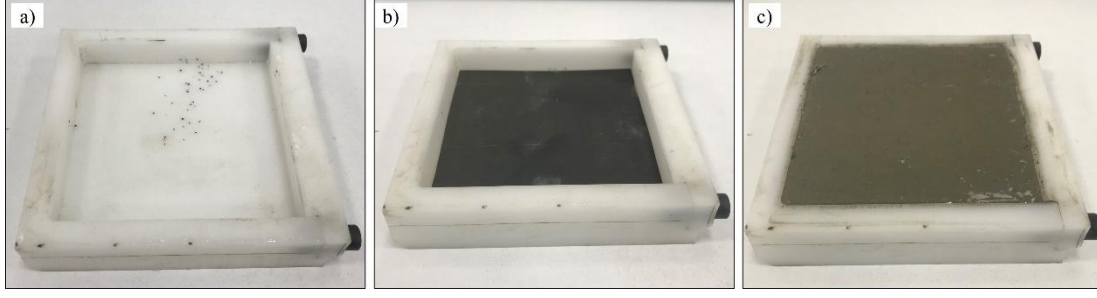
Tablo 6. MSW'nin kimyasal içeriği [18]

Bileşik adı	Kimyasal formül	Miktar (mg/l)
Asetik asit	CH ₃ COOH	7 mL
Propiyonik asit	CH ₃ CH ₂ CO ₂ H	5 mL
Bütirik asit	C ₄ H ₈ O ₂	1 mL
Dipotasyum fosfat	K ₂ HPO ₄	30 mg
Potasyum bikarbonat	KHCO ₃	312 mg
Potasyum karbonat	K ₂ CO ₃	324 mg
Sodyum klorit	NaCl	1440 mg
Sodyum nitrat	NaNO ₃	50 mg
Soda bikarbonatı	NaHCO ₃	3012 mg
Kalsiyum klorit	CaCl ₂	2882 mg
Magnezyum klorür heksahidrat	MgCl ₂ .6H ₂ O	3114 mg
Magnezyum sülfat	MgSO ₄	156 mg
Amonyum bikarbonat	NH ₄ HCO ₃	2439 mg
Üre	CO(NH ₂) ₂	695 mg
Eser metal çözeltisi*	-	1 mL
Sodyum sülfat nanohidrat	Na ₂ S.9H ₂ O	E _h -120-180 mV
Sodyum hidroksit	NaOH	pH 5.8-6.0
Saf su	H ₂ O	1 L için
*Eser metal çözeltisinin kimyasal içeriği		
Demir sülfat	FeSO ₄ .7H ₂ O	2000
Borik asit	H ₃ BO ₃	50
Çinko sülfat heptahidrat	ZnSO ₄ .7H ₂ O	50
Bakır sülfat pentahidrat	CuSO ₄ .5H ₂ O	40

B. Yöntem

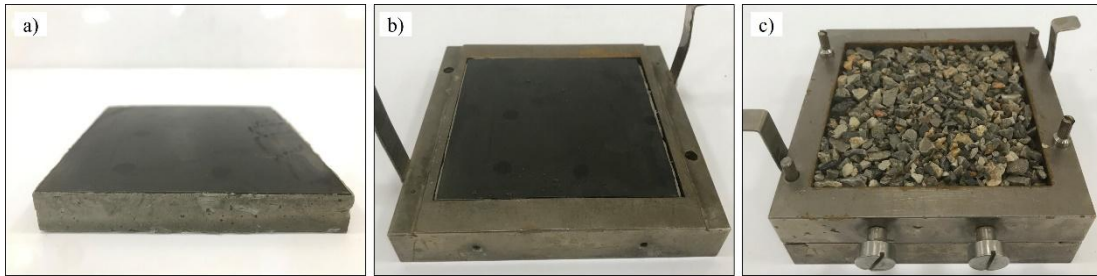
Zemin numunelerinin içsel sürtünme açısı değerleri, ASTM D3080'e uygun olarak gerçekleştirilen geleneksel kesme kutusu deneyleri ile belirlenmiştir [19]. Deneyler 100x100x40 mm boyutlarında orta ölçekli bir kesme kutusu kullanılarak yapılmıştır. "Orta ölçekli" terimi, literatürde kesme kutuları için benzer boyutlar kullanan önceki çalışmalara dayanarak kullanılmıştır [20-23]. Kesme kutusu deneyleri, bilgisayar kontrollü tam otomatik bir kesme kutusu cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aşırı boşluk suyu basıncı oluşumunun önlenmesi amacıyla 0.1 mm/dk'lık bir kesme hızı ayarlanmıştır. Ayrıca, konsolidasyon deneyleri yapılarak da kesme hızları belirlenmiş ve seçilen kesme hızına oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. Zemin numuneleri optimum su içeriğinde hazırlanmış ve maksimum kuru birim hacim ağırlık sıklığında kesme kutusuna yerleştirilmiştir. Numune hazırlandıktan sonra, direk kesme kutusu içerisinde doygunluğa ulaşması için 24 saat boyunca suda bekletilmiştir. Doygunluğa ulaştığını teyit etmek için, birkaç farklı numunenin su içeriği belirlenmiş ve minimum %97 doygunluğa ulaştıkları tespit edildikten sonra kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Deneyler literatürde de önerildiği şekilde 49, 98 ve 196 kPa'lık normal gerilme değerleri altında gerçekleştirilmiştir [24-26].

GM'ler ve zemin arasındaki ara yüzey kayma mukavemeti parametrelerini belirlemek için ara yüzey kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Ara yüzey kayma parametreleri belirlenirken kesme kutusu deneyinin tercih edilmesinin nedeni, aşırı yük basıncı altında GM yüzeyinde oluşacak kayma gerilmelerini belirlemek ve bu kayma gerilmelerinin yüzeyde neden olabileceği deformasyonları tespit etmektir. Ara yüzey kesme kutusu deneyleri için öncelikle, kesme kutusunun alt kısmının boyutlarına uyacak şekilde Derlin malzemesi kullanılarak kalıp imal edilmiştir (Şekil 2a). GM, kalıbın alt kısmına yerleştirilmiş (Şekil 2b) ve ardından C30 reçetesine göre hazırlanan beton kalıba dökülmüştür (Şekil 2c). Betonun 24 saat boyunca priz almasına izin verilmiştir.



Şekil 2. GM yapıştırılmış beton blok üretim adımları

Daha sonra, üst yüzeyine GM yapıştırılmış beton blok (Şekil 3a) kesme kutusunun altına yerleştirilirken (Şekil 3b), zemin kesme kutusunun üst kısmına yerleştirilmiştir (Şekil 3c). Altta beton blok kullanılmasının nedeni, GM ve alttaki zeminin genellikle temeller, istinat duvarları ve tüneller gibi çeşitli inşaat mühendisliği yapılarıyla birlikte çalışmasıdır. Ek olarak, altta rijit bir malzemenin kullanılmasının bir diğer nedeni üstten uygulanan normal gerilme nedeniyle alt kısımda deformasyonların oluşmasını önleyerek deney boyunca GM'nin hep ara yüzeyde kalmasını sağlamaktır. Ara yüzey kesme kutusu deneyleri ASTM D5321'e göre gerçekleştirilmiştir [27]. Tüm deneylerde, zemin optimum su içeriğinde hazırlanmış ve zemin – zemin ara yüzey kesme kutusu deneylerinde olduğu gibi maksimum kuru birim ağırlıkta kutunun içine yerleştirilmiştir. Ayrıca, %100 doygunluk elde etmek için numuneler her deneyden önce 24 saat boyunca su içine bekletilmiştir. Ara yüzey kesme kutusu deneyleri 49, 98 ve 196 kPa normal gerilme değerleri altında gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler ile yllandırılmamış GM – zemin ara yüzeylerinin ara yüzey sürtünme açısı (δ) değerleri belirlenmiştir. Ardından 4 ve 16 ay boyunca kür tanklarında çeşitli sızıntı sıvılarında yllandırılmış GM'ler ile birebir aynı prosedürler izlenerek ara yüzey kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler ile yllandırılmış GM – zemin ara yüzeylerinin ara yüzey sürtünme açısı (δ) değerleri belirlenmiştir.



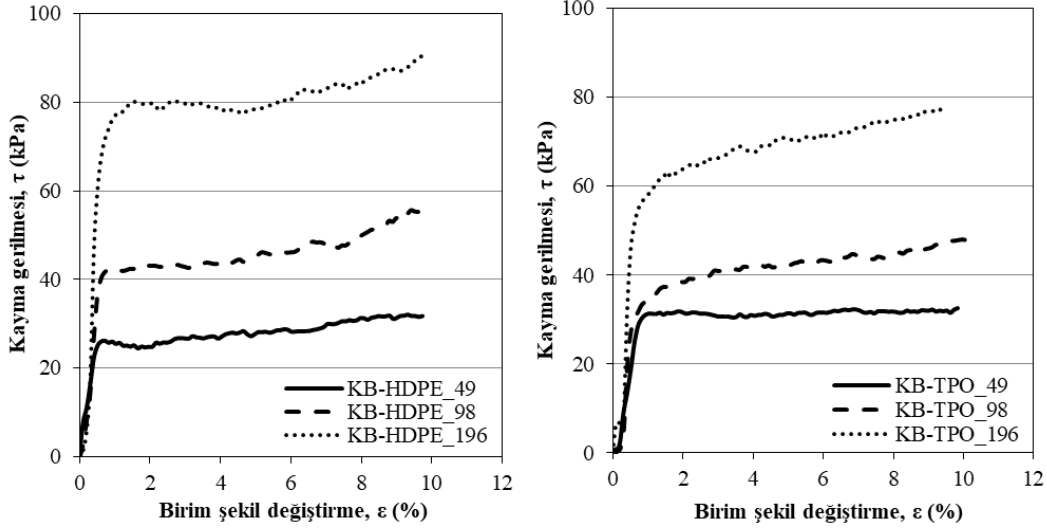
Şekil 3. Ara yüzey kesme kutusu deneyleri numune hazırlama adımları

III. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

A. Yllandırılmamış GM – Zemin Kesme Kutusu Deney Sonuçları

İlk olarak kıyaslama yapılabilmesi amacıyla KB zeminin içsel sürtünme açısı (ϕ) belirlenmiş ve 22.8° elde edilmiştir. Yllandırmanın, zemin ve GM arasındaki ara yüzey kayma mukavemeti üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla yapılan kesme kutusu deneylerinin ilk aşaması, yllandırılmamış numuneler ile ara yüzey kesme kutusu deneyleridir. Yllandırılmamış HDPE – KB ve yllandırılmamış TPO – KB ara yüzeylerinin kayma gerilmesi – birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 4'te gösterilmiştir. Şekil 4 incelendiğinde, KB – HDPE ara yüzeylerinin kayma gerilmelerinin çok küçük deformasyon değerlerinde pik yaptığı, ardından ya hafif bir artış yaptığı ya da sabit kaldığı görülmektedir. Bunun nedeni şu şekilde açıklanmaktadır: düşük normal gerilmelerde zemin – GM ara yüzeyinde öncelikle hâkim olan mekanizma kaymadır. Daha yüksek normal gerilmelerde, kayma gerilmesi – birim şekil değiştirme eğrileri dik bir başlangıç eğimi sergiler, ardından zirveye ulaşana kadar eğimde bir azalma olur. Daha sonra, kayma gerilmesinde bir düşüş meydana gelir ve sonunda sabit bir değere ulaşır. Bunun nedeni ise zemin danelerinin GM yüzeyine tutunması ve kayma yerine danelerin yuvarlanma ve gömülme hareketi yapmasıdır [27]. KB – TPO ara yüzlerinde ise başlangıçtaki dik eğim, daneler ve GM arasındaki sürtünmenin harekete geçmesinin yanı sıra GM yüzeyinde parçacıkların neden olduğu plastik deformasyonlara da bağlanmaktadır. Normal gerilme arttıkça, ara yüzeydeki her bir parçacık üzerindeki gerilme artar ve sonunda polimerin akma gerilmesini aşar [29]. Normal gerilmedeki bu artış polimerin yüzeyinde bir oyulmaya neden olur. Bu oyulma nedeniyle, GM yüzeyini kesmek ve gömülen zemin danelerini yerinden çıkarmak için önemli miktarda

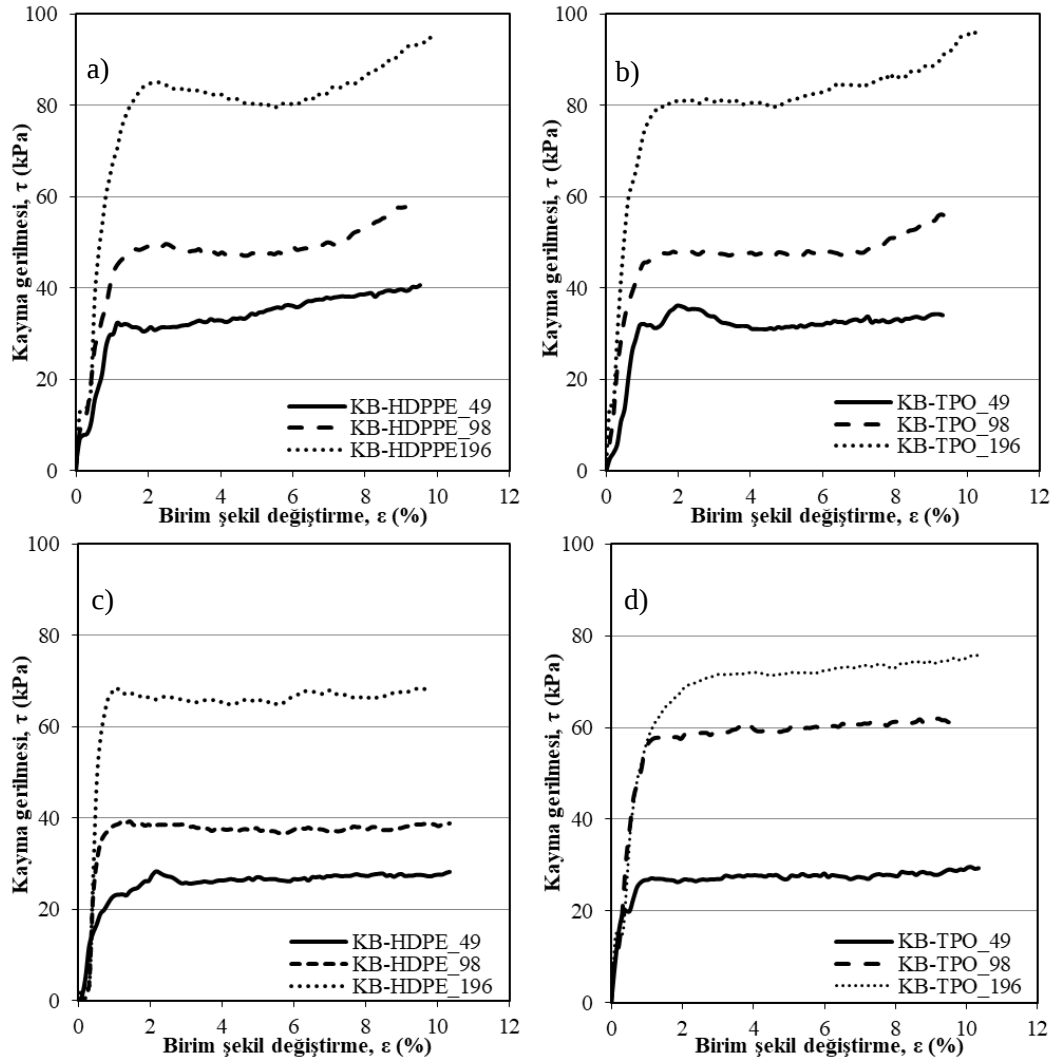
kayma kuvveti gerekir. Bu mekanizmanın TPO'da daha belirgin olma nedeni ise TPO'nun HDPE'ye göre daha yumuşak bir yapıda olmasıdır.



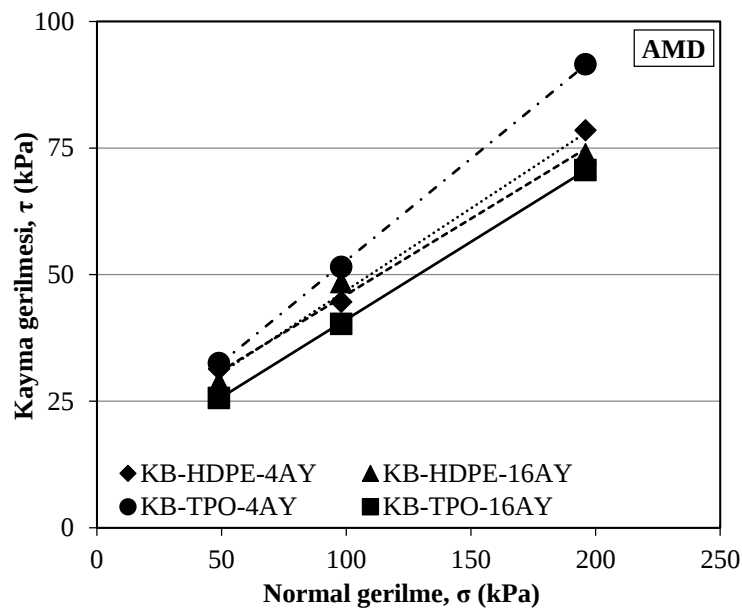
Şekil 4. Yıllandırılmamış GM – zemin ara yüzeylerinin kayma gerilmesi (τ)-birim şekil değiştirme (ϵ) eğrileri

B. Yıllandırılmış GM – Zemin Kesme Kutusu Deney Sonuçları

Şekil 5'te AMD'de 4 ve 16 ay boyunca yıllandırılmış GM'lerin ara yüzey kayma gerilmesi – birim şekil değiştirme eğrileri gösterilmiştir. Şekil 6'da ise bu eğrilerden elde edilen Mohr-Coulomb yenilme zarfları gösterilmiştir. Eğriler incelendiğinde davranış olarak yıllandırılmamış numuneler ile benzer davranışlar sergilediği gözlenmektedir. 4 aylık yıllandırma sonucunda kayma mukavemetlerinde kayda değer bir azalma olmazken, 16 ay sonundan özellikle TPO'da kayda değer bir azalma olmuştur. TPO'nun kayma mukavemetinde HDPE'ye göre daha fazla azalma meydana gelmesinin nedeni ise, polipropilenin kimyasal bağ yapısındaki negatif yüklü (-1) CH_3 metil grubunun, AMD'de bulunan diğer bileşiklerle elektron alışverişi yaparak kimyasal yapısının bozulabilmesidir. Aynı durumun polietilende meydana gelme olasılığı daha düşüktür çünkü kimyasal yapısı sadece C ve H içerir (Şekil 7). Ara yüzey kayma mukavemetlerinde meydana gelen azalmaların diğer nedenleri ise GM'lerin AMD'ye maruz kaldığında tipik olarak polimer yapısının değişmesi ve kimyasal bozulmanın başlamasıdır. Sonuçta GM'lerin mühendislik özelliklerinde değişikliklere yol açar [30]. Polimer, moleküler ağırlıkta dalgalanmalar, gevrekleşme, katkı maddelerinin ve plastikleştiricilerin kaybı, serbest radikallerin oluşumu ve şeffaflıkta azalma gibi çeşitli yaygın değişikliklere uğrar [31]. Bu değişiklikler AMD'de bulunan asidik koşullardan ve yüksek metal konsantrasyondan kaynaklanmaktadır. Literatürdeki araştırmalar asidik koşulların GM'lerin polimer bileşenlerinde küçük mukavemet azalmalarına yol açtığını göstermiştir [32-34].

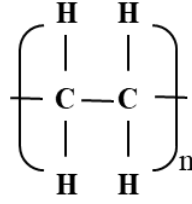


Şekil 5. AMD’de yllandırılmış ara yüzey kayma gerilmesi (τ)-birim şekil değıştirme (ϵ) eğrileri; a) 4 ay yllandırılmış HDPE-KB, b) 4 ay yllandırılmış TPO-KB, c) 16 ay yllandırılmış HDPE-KB, d) 16 ay yllandırılmış TPO-KB

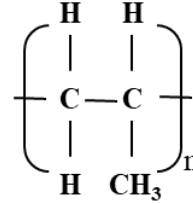


Şekil 6. AMD’de yllandırılmış ara yüzeylerin Mohr-Coulomb yenilme zarfları

Polyethylene

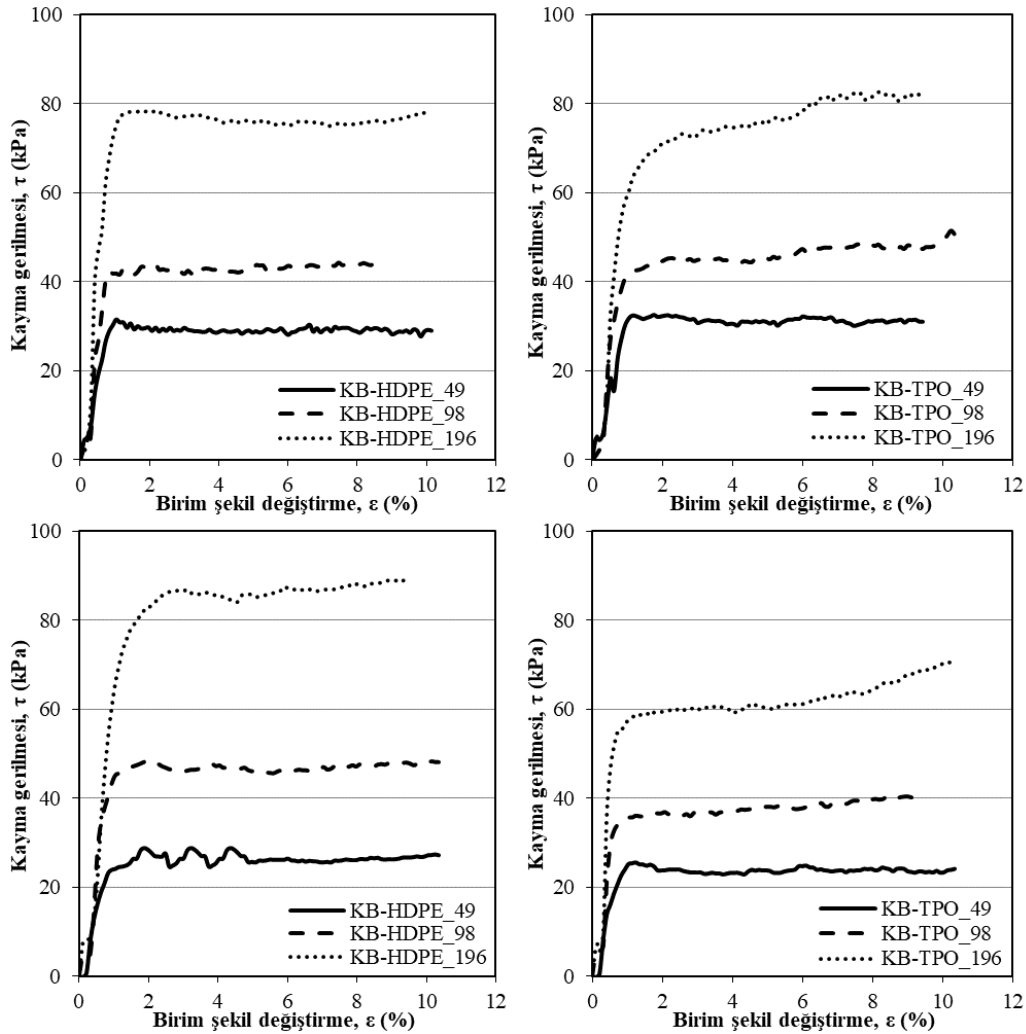


Polypropylene

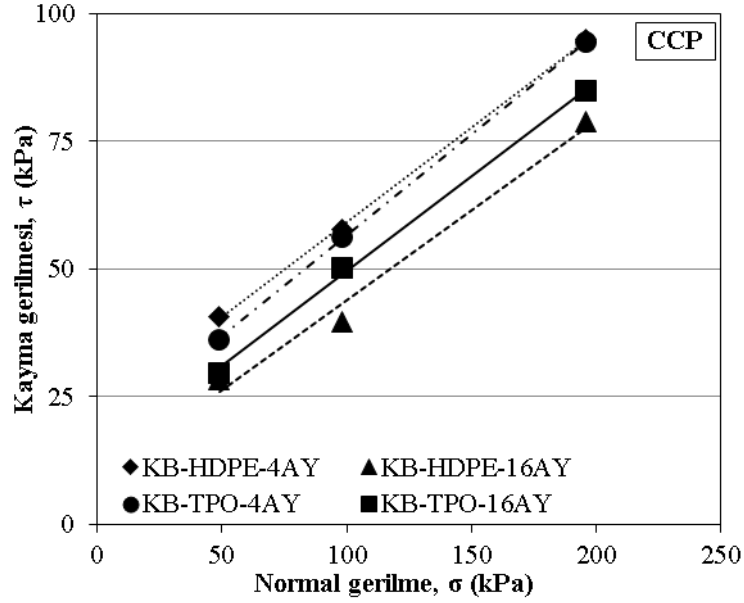


Şekil 7. Polietilen ve polipropilenin kimyasal bağ yapısı

Şekil 8’de CCP’de 4 ve 16 ay boyunca yllandırılmış GM’lerin ara yüzey kayma gerilmesi – birim şekil değıştirme eğrileri gösterilmiştir. Şekil 9’da ise bu eğrilerden elde edilen Mohr-Coulomb yenilme zarfları gösterilmiştir. Genel olarak eğriler incelendiğinden CCP’nin AMD’ye göre zarar verici etkisinin daha az olduğı gözlenmiştir. CCP, elektrik veya buhar üretmek için kömürün yakılmasından elde edilen kalıntılardır. Uçucu kül, taban külü, baca gazı kükürt giderme malzemeleri, püskürtmeli kurutucu külü ve diğerleri gibi çeşitli malzemeleri kapsarlar [35]. CCP’lerden kaynaklanan sızıntı sıvıları ağırlıklı olarak inorganiktir ve genellikle daha yüksek konsantrasyonda çok değerlikli katyon içerir ve AMD’deye kıyasla daha yüksek iyonik bağ sergiler [36-37]. Ayrıca, CCP sızıntı sıvılarının pH değeri AMD’ninkinden önemli ölçüde daha yüksektir. Sonuç olarak, bu nedenlerden ötürü CCP’nin GM’lerin mekanik özelliklerine zarar verme potansiyeli AMD’ye kıyasla düşüktür.

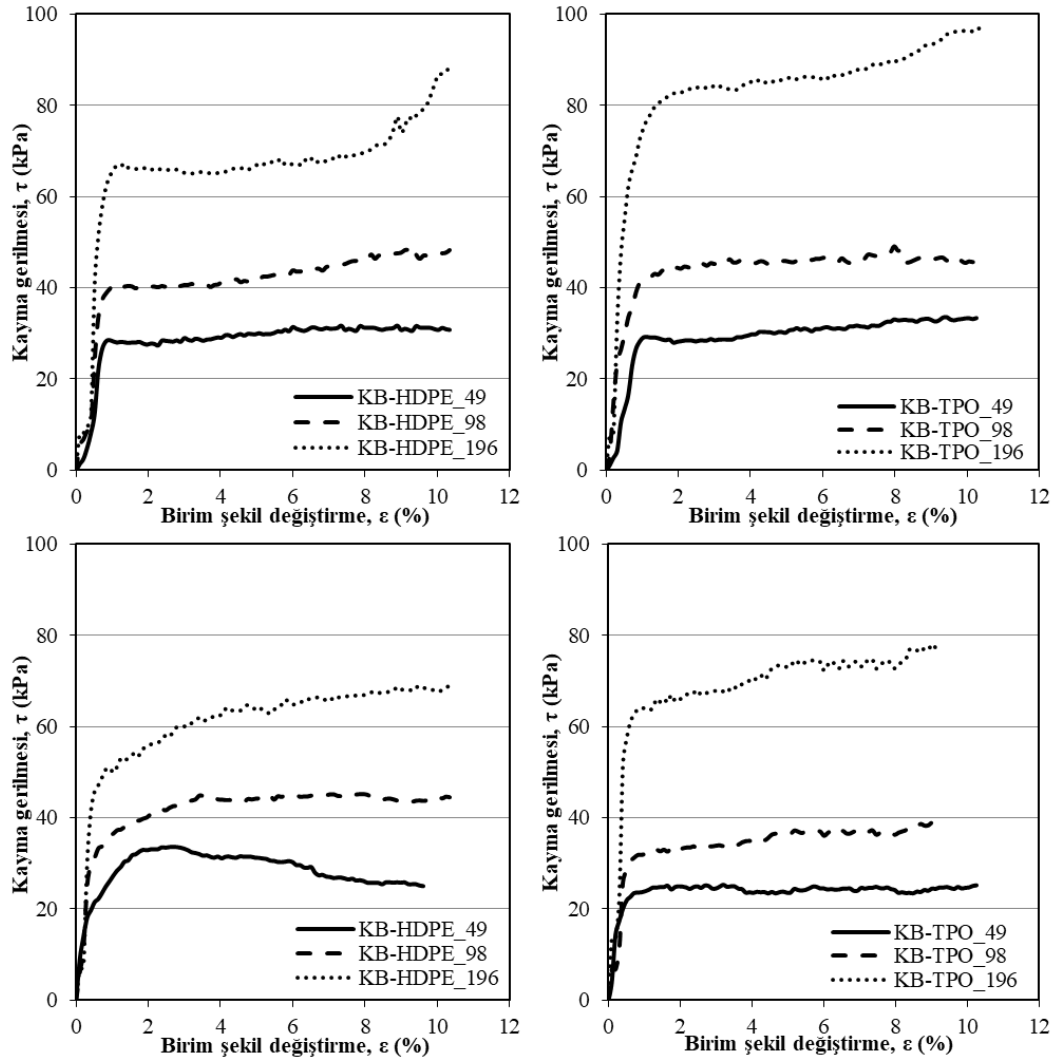


Şekil 8. CCP’de yllandırılmış ara yüzey kayma gerilmesi (τ)-birim şekil değıştirme (ϵ) eğrileri; a) 4 ay yllandırılmış HDPE-KB, b) 4 ay yllandırılmış TPO-KB, c) 16 ay yllandırılmış HDPE-KB, d) 16 ay yllandırılmış TPO-KB

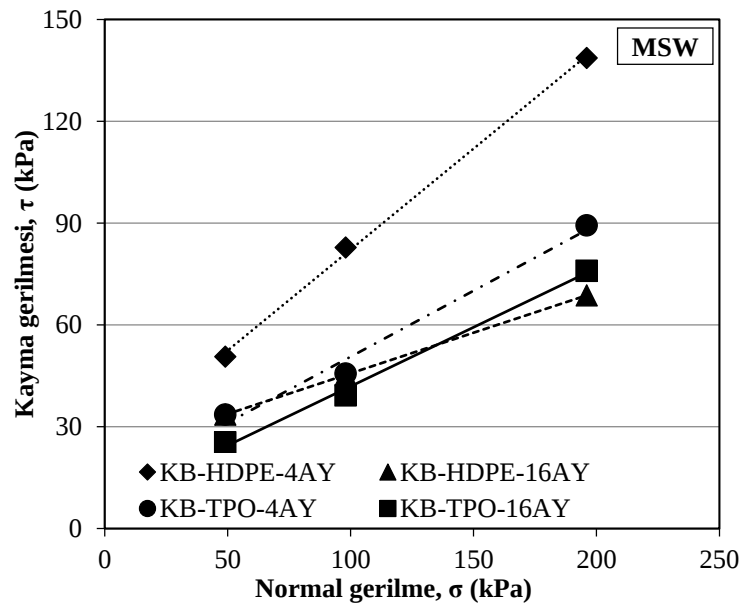


Şekil 9. CCP’de yllandırılmış ara yüzeylerin Mohr-Coulomb yenilme zarfları

Şekil 10’da MSW’de 4 ve 16 ay boyunca yllandırılmış GM’lerin ara yüzey kayma gerilmesi – birim şekil değıştirme eğrileri gösterilmiştir. Şekil 11’de ise bu eğrilerden elde edilen Mohr-Coulomb yenilme zarfları gösterilmiştir. Eğriler incelendiğinde genel olarak MSW’nin zarar verici etkisinin AMD’den daha az CCP’den ise daha fazla olduğu belirlenmiştir. MSW’nin zarar verme nedeni ise, GM’lerin uzun bir süre boyunca MSW’ye maruz kaldığında, oksidatif bozunmasının başlamasıdır. Oksidatif bozunma süreci Viebke ve diğerleri (1994) [38] ve Hsuan ve Koerner (1998) [30] tarafından üç aşamalı bir ilerleme olarak tanımlanmıştır. Aşama I’de GM’lerin mühendislik özelliklerinde önemli ölçüde bir değışiklik gözlenmez. Aşama II, antioksidanların tükenmesinden sonra başlayan oksidatif indüksiyon dönemini temsil eder. İkinci aşamanın sonu oksidasyonun başlangıcı ile aynı zamana denk gelir. Aşama III’de GM’lerin fiziksel ve mekanik özelliklerinde kayda değer değışiklikler meydana gelir ve nihayetinde yenilmelerine yol açar. Bu bağlamda yenilme, gerilme-çatlama direnci ve çekme-kopma gerilmesi gibi belirli mühendislik özelliklerinin önceden tanımlanmış bir eşik değerine düşmesi anlamına gelmektedir [10].

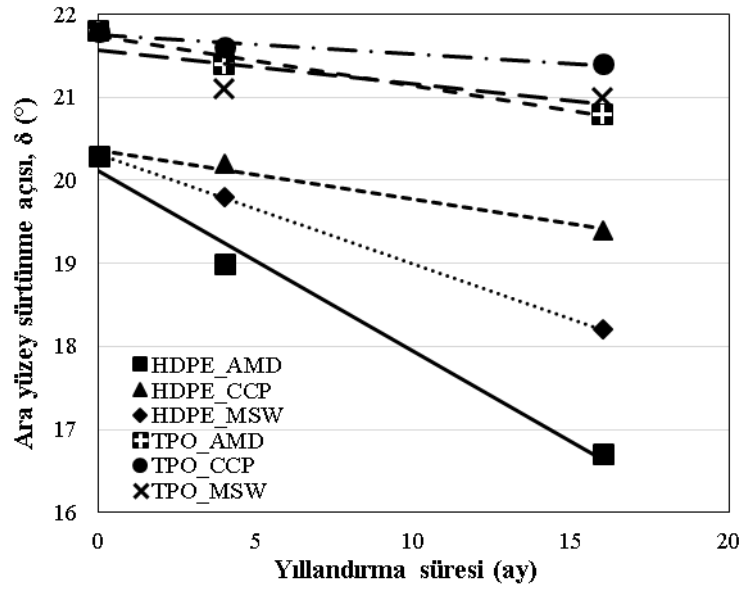


Şekil 10. MSW’de yıllandırılmış ara yüzey kayma gerilmesi (τ)-birim şekil değiştirme (ϵ) eğrileri; a) 4 ay yıllandırılmış HDPE-KB, b) 4 ay yıllandırılmış TPO-KB, c) 16 ay yıllandırılmış HDPE-KB, d) 16 ay yıllandırılmış TPO-KB



Şekil 11. MSW’de yıllandırılmış ara yüzeylerin Mohr-Coulomb yenilme zarfları

Ara yüzey sürtünme açılarının belirlenmesi amacıyla Mohr-Coulomb yenilme zarfları [39-40] çizilmiş ve her bir ara yüzey için açılar belirlenmiştir. Yıllandırma süresi ile ara yüzey kayma açıları arasındaki ilişkiyi gösteren doğrular Şekil 12’de verilmiştir. Yıllandırma süresi ile ara yüzey sürtünme açısı arasında bir korelasyonun olup olmadığının belirlenmesi amacıyla her bir doğrunun R^2 değeri ve eğimleri elde edilmiş ve Tablo 7’de sunulmuştur. Şekil 12 incelendiğinde, Yıllandırma süresi arttıkça ara yüzey sürtünme açısındaki azalma net bir şekilde görülmektedir. Eğim değerleri irdelendiğinde, HDPE’nin eğim değerlerinin TPO’dan daha büyük olduğu görülmektedir, bu da daha önce nedenlerinin de açıklandığı şekilde, HDPE’nin yıllandırmadan daha fazla etkilendiğini göstermektedir. Ayrıca sızıntı sıvılarının eğim değerleri büyükten küçüğe sıralandığında hem TPO hem HDPE için AMD, MSW ve CCP şeklindedir. Yine aynı şekilde bunun anlamı AMD’nin en zarar verici etkiye, CCP’nin en az zarar verici etkiye sahip olduğunun göstergesidir. Öte yandan R^2 değerleri incelendiğinde, bir ara yüzey hariç (TPO_MSU), değerlerin 1’e oldukça yakın olduğu görülmektedir. Yani bu çalışma sonucu elde edilen Yıllandırma sıvısı ile ara yüzey sürtünme açısı arasındaki korelasyonlar oldukça tutarlı bir sonuç vermiştir.



Şekil 12. Ara yüzey sürtünme açısı-yıllandırma süresi ilişkisi

Tablo 7. Ara yüzey sürtünme açısı-yıllandırma süresi korelasyonlarının R^2 ve eğim değerleri

Ara yüzey	R^2	Eğim
HDPE_AMD	0.99	0.22
HDPE_MSU	1.00	0.13
HDPE_CCP	0.98	0.06
TPO_AMD	0.97	0.06
TPO_MSU	0.60	0.04
TPO_CCP	0.92	0.02

C. Literatür Çalışmaları ile Karşılaştırma

Bu çalışmadan elde edilen sonuçların doğruluğunun, tutarlılığının ve uyumluluğunun kontrolü amacıyla zemin – GM ara yüzey sürtünme açılarının tespiti ile ilgili literatürde yapılmış çalışmalar taranmış ve kapsamlı bir özet oluşturulmuştur. Bu çalışmada kullanılan zemin kum ve bentonit karışımı olduğu için literatür çalışmalarından kum ve kil zemin ile çalışmış araştırmalar seçilmiştir. Ayrıca bu çalışmada pürüzsüz HDPE ve TPO ile deneyler gerçekleştirildiği için yine literatürde pürüzsüz HDPE ve TPO ile yapılmış deney sonuçları derlenmiş ve Tablo 3’te özetlenmiştir. Tablo 3’te bu çalışmadan yalnızca yıllandırılmamış ara yüzey sürtünme açıları eklenmiştir çünkü literatürde yıllandırılıp ardından ara yüzey sürtünme açılarının elde edildiği çalışma bulunmamaktadır. Tablo 3 incelendiğinde, ilk göze çarpan en çok kullanılan GM HDPE olurken, TPO’nun kullanımı oldukça sınırlı olduğudur. Ancak mevcut çalışma göstermiştir ki hem TPO’nun ara yüzey sürtünme açısı daha yüksektir hem de

kimyasal ile yıllandırmaya daha dayanıklıdır. Ayrıca daha önce bahsedildiği gibi hem daha ekonomik hem de daha çevrecidir. Bu sebeple hem Türkiye’de hem de dünyada TPO GM’nin kullanılması araştırmacılar tarafından teşvik edilmelidir. Bir diğer husus ise mevcut çalışmadan elde edilen sonuçlar ile literatürden elde edilen sonuçların uyumlu olduğu, ara yüzey sürtünme açılarında afaki bir fark olmadığıdır.

Tablo 2. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ile literatürde elde edilen sonuçların karşılaştırılması

Çalışma	Ara yüzey	Ara yüzey sürtünme açısı, δ (°)
Mevcut çalışma	HDPE – Kum-Bentonit	20.3
	TPO – Kum-Bentonit	21.8
Welker ve Josten, 2005 [41]	HDPE – Killi kum	19.0
Fleming vd., 2006 [42]	HDPE – Ottawa kumu	21.0
	HDPE – Siltli kum	15.4
	HDPE – Kum/bentonit	21.1
Sharma vd., 2007 [43]	HDPE – Kum	14.1
Effendi, 2012 [44]	HDPE – Ottawa kumu	13.6
Frost vd., 2012 [45]	HDPE – Ottawa kumu	24.5
Monteiro vd., 2013 [46]	HDPE – Kum	29.6
Vangla ve Gali, 2016 [47]	HDPE – Köşeli kum	27.1
	HDPE – Yuvarlak kum	18.7
Punetha vd., 2017 [48]	HDPE – Dere kumu	23.7
	HDPE – Dere kumu	20.8
	HDPE – Ottawa kumu	20.0
	TPO – Ottawa kumu	25.0
Cen vd., 2018 [49]	HDPE – İnce kum	29.0
Markou ve Evangelou, 2018 [50]	HDPE – Yuvarlak kum	17.0
	HDPE – Köşeli kum	32.5
	TPO – Yuvarlak kum	26.3
	TPO – Köşeli kum	33.8
Ari, 2020 [51]	HDPE – Dere kumu	22.0
	HDPE – Kırmı kum	25.0
Zhou vd., 2020 [14]	HDPE – Kum	24.2
	HDPE – Kil	18.8

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada zemin – GM ara yüzey kayma mukavemeti parametreleri araştırılmıştır. Zemin – GM arayüzey sürtünme açıları orta ölçekli bir kesme kutusu cihazı ile elde edilmiştir. Testlerde tek tür zemin (kum/bentonit karışımı) ve iki tür pürüzsüz GM (HDPE ve TPO) kullanılmıştır. Ayrıca, sızıntı sıvılarının (AMD, CCP, MSW) GM’lerin ara yüzey kayma mukavemeti parametreleri üzerindeki etkilerinin irdelenmesi amacıyla 4 ve 16 ay yıllandırılmış GM numuneleri ile ara yüzey kesme kutusu deneyleri de gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda:

- HDPE – zemin ara yüzeylerinde kayma gerilmesinin belirli bir yatay yer değiştirmeye kadar arttığı ve daha sonra sabit kaldığı tespit edilmiştir.
- Genel olarak, GM’lerin ara yüzey kayma mukavemeti parametrelerini en olumsuz etkileyen sızıntı sıvısının AMD, en az etkileyen sızıntı sıvısının ise CCP olduğu tespit edilmiştir.
- Ara yüzey kayma mukavemeti parametreleri açısından, TPO’nun kimyasal yıllandırmadan HDPE’ye göre daha az etkilendiği tespit edilmiştir.

- Kullanım alanı oldukça sınırlı, ekonomik ve çevreci olan TPO'nun atık depolama tesislerinde en çok tercih edilen, pahalı ve çevreye zarar veren HDPE'den daha yüksek ara yüzey kayma mukavemeti parametrelerine sahip olması bu çalışmadan çıkarılabilecek en önemli sonuç olmuştur.
- Sonuç olarak 16 ay gibi kısa bir sürede dahi hem HDPE'nin hem de TPO'nun ara yüzey kayma mukavemeti parametrelerinde kayda değer bir düşüş gözlenmiştir. Yapılacak atık depolama sahaları tasarımlarında bu durumun göz önünde bulundurulması hem maddi açıdan hem de can kaybı açısından oldukça önem arz etmektedir.

TEŞEKKÜR

Katkıları ve desteklerinden ötürü BTM Yalıtım'a ve GEOPLAS Geosynthetics'e teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

- [1] Grassie, N., & Scott, G. (1985). *Polymer Degradation and Stabilization*. Cambridge University Press, Cambridge.
- [2] Barroso, M., Touze-Foltz, N., Maubeuge, K., & Pierson, P. (2006). Laboratory investigation of flow rate through composite liners consisting of a geomembrane, a GCL and a soil liner. *Geotextiles and Geomembranes*, 24, 139-155.
- [3] Rowe, R. K., Quigley, R. M., Brachman, R. W. I., & Booker, J. R. (2004). *Barrier systems for waste disposal facilities 2nd Ed.* E&FN Spon, London, UK.
- [4] Rowe, R. K., Islam, M. Z., & Hsuan, Y. G. (2008). Leachate chemical composition effects on OIT depletion in an HDPE geomembrane. *Geosynthetics International*, 15(2), 136-51.
- [5] Mueller, W., & Jakob, I. (2003). Oxidative resistance of high-density polyethylene geomembranes. *Polymer Degradation and Stability*, 79, 161-172.
- [6] Gulec, S. B., Benson, C. H., & Edil, T. B. (2005). Effect of acidic mine drainage on the mechanical and hydraulic properties of three geosynthetics. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(8), 937-950.
- [7] Rowe, R. K., Rimal, S., & Sangam, H. (2009). Ageing of HDPE geomembrane exposed to air, water and leachate at different temperatures. *Geotextiles and Geomembranes*, 27(2), 137-151.
- [8] Benson, C. H., Chen, J. N., Edil, T. B., & Likos, W. J. (2018). Hydraulic conductivity of compacted soil liners permeated with coal combustion product leachates. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(4).
- [9] Sun, X., Xu, Y., Liu, Y., Nai, C., Dong, L., & Liu, J. (2019). Evolution of geomembrane degradation and defects in a landfill: Impacts on long-term leachate leakage and groundwater quality. *Journal of Clean Productions*, 224, 335-345.
- [10] Rowe, R. K., Islam, M. Z., & Hsuan, Y. G. (2010). Effects of thickness on the aging of HDPE geomembranes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(2), 299-309.
- [11] Li, W., Xu, Y., Huang, Q., Liu, Y., & Liu, J. (2021). Antioxidant depletion patterns of high-density polyethylene geomembranes in landfills under different exposure conditions. *Waste Management*, 121, 365-372.
- [12] Chai, J. C., & Saito, A. (2016). Interface shear strengths between geosynthetics and clayey soils. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2, 1-9.
- [13] Stark, T. D., & Santoyo, R. F. (2017). Soil/geosynthetic interface strengths from torsional ring shear tests. *Geotechnical Frontiers*, GSP 280, 260 - 268.
- [14] Zhou, L., Zhu, Z., Yu, Z., & Zhang, C. (2020). Shear Testing of the Interfacial Friction Between an HDPE Geomembrane and Solid Waste. *Materials*, 13, 1-16.
- [15] Chen, W., Xu, T., & Zhou, W. (2021). Microanalysis of smooth Geomembrane-Sand interface using FDM-DEM coupling simulation. *Geotextiles and Geomembranes*, 49, 276-288.
- [16] Develiöğlu I., & Pulat H. F. (2022). Effect of Grain Size, Angularity and Curing on Interfacial Shear Behavior Between Soil and Geomembrane. *4th International Göbeklitepe Scientific Research Congress*, 7-8 Ekim, Şanlıurfa.
- [17] ASTM D2487-17 (2017). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). *ASTM International*, West Conshohocken, PA, USA.
- [18] Hrapovic, L., & Rowe, R. K. (2002). Intrinsic degradation of volatile fatty acids in laboratory-compacted clayey soil. *Journal of Contamination Hydrology*, 58, 221-242.
- [19] ASTM D3080-04 (2012). Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. *ASTM International*, West Conshohocken, PA, USA.

- [20] Dadkhah, R., Ghafoori, M., Ajalloeian, R., & 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.
- [21] Sobol, E., Sas, W., & Szymanski, A. (2015). Scale effect in direct shear tests on recycled concrete aggregate. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 37(2), 45-49.
- [22] Mohapatra, S. R., Mishra, S. R., Nithin, S., & Rajagopal, K. (2016). Effect of Box Size on Dilative Behaviour of Sand in Direct Shear Test. *India Geotechnical Conference*, Chennai, 16, 111-118.
- [23] Zahran, K., & El Naggar, H. (2020). Effect of Sample Size on TDA Shear Strength Parameters in Direct Shear Tests. *Transportation Research Record*, 2674(9), 1110-1119.
- [24] Yano, K., Usuki, A., & Okada, A. (1997). Synthesis and properties of polyimide-clay hybrid films. *Journal of Polymer Science, Part A: Polymer Chemistry*, 35, 2289-2294.
- [25] Shah, K., & Shah, D. L. (2015). Interface friction between soil and geosynthetics. *5th Indian Young Geotechnical Engineers Conference*, Vadodara, 81-82.
- [26] Angelim, R. R., Cunha, R. P., & Sales, M. M. (2016). Determining the elastic deformation modulus from a compacted earth embankment via laboratory and Ménard pressuremeter tests. *Soils and Rock*, 9(3), 285-300.
- [27] ASTM D5321-12 (2021). Standard Test Method for Determining the Shear Strength of Soil-Geosynthetic and Geosynthetic-Geosynthetic Interfaces by Direct Shear. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- [28] O'Rourke, T. D., Druschel, S. J., & Netravali, A. N. (1990). Shear strength characteristics of sand-polymer interfaces. *Journal of Geotechnical Engineering*, 116(3), 451-469.
- [29] Dove, J. E., & Frost, J. D. (1999). Peak friction behavior of smooth geomembrane-particle interfaces. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125(7), 544-555.
- [30] Hsuan, Y. G., & Koerner, R. M. (1998). Antioxidant depletion lifetime in high density polyethylene geomembranes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(6), 532-541.
- [31] Kulshreshtha, A. K. (1992). Chemical degradation. *Handbook of Polymer Degradation* Marcel Dekker, New York, USA, 55-94.
- [32] Risseuw, P., & Schmidt, H. M. (1990). *Geotextiles, Geomembranes and Related Products*. Rotterdam, The Netherlands.
- [33] Jailloux, J. M., Anderson, P. L., & Thomas, R. W. (1992). Chemical-compatibility studies of polyester filaments and yarns to be used in geocomposites. Phase 1: Tests at 95° C. *Geotextiles and Geomembranes*, 11(3), 277-290.
- [34] Salman, A., Elias, V., Juran, I., Lu, S., & Pearce, E. (1997). Durability of geosynthetics based on accelerated laboratory testing.
- [35] Zainab, B., Wireko, C., Li, D., Tian, K., & Abichou, T. (2021). Hydraulic conductivity of bentonite-polymer geosynthetic clay liners to coal combustion product leachates. *Geotextiles and Geomembranes*, 49(5), 1129-1138.
- [36] Salihoglu, H., Chen, J. N., Likos, W. J., & Benson, C. H. (2016). Hydraulic conductivity of bentonite-polymer geosynthetic clay liners in coal combustion product leachates. *Geo-Chicago*, 438-447.
- [37] Benson, C., Chen, J., & Edil, T. (2014). Engineering properties of geosynthetic clay liners permeated with coal combustion product leachates. *Report No: 3002003770, Electric Power Research Institute*, Palo Alto, CA.
- [38] Viebke, J., Elble, E., Ifwarson, M., & Gedde, U. W. (1994). Degradation of unstabilized medium-density polyethylene pipes in hot-water applications. *Polymer Engineering Science*, 34(17), 1354-1361.
- [39] Coulomb, C. A. (1774). Sur une application des regles maximis et minimis a quelques problems de statique, relatives a l'architecture. *Acad Sci Paris Mem Math Phys*, 7, 343-382.
- [40] Mohr, O. (1900). Welche Umstände bedingen die Elastizitätsgrenze und den Bruch eines Materials? *Zeit des Ver Deut Ing*, 44, 1524-1530.
- [41] Welker, A. L., & Josten, N. (2005). Interface friction of a geomembrane with a fiber reinforced soil. Slopes and retaining structures under seismic and static conditions. *Geo-Frontiers Congress*, Austin, Texas, USA, 1-8.
- [42] Fleming, I. R., Sharma, J. S., & Jogi, M. B. (2006). Shear strength of geomembrane-soil interface under unsaturated conditions. *Geotextiles and Geomembranes*, 24, 274-284.
- [43] Sharma, J. S., Fleming, I. R., & Jogi, M. B. (2007) Measurement of unsaturated soil-geomembrane interface shear-strength parameters. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(1), 78-88.
- [44] Effendi, R. (2011). Interface friction of smooth geomembranes and Ottawa sand. *INFO-TEKNIK*, 12(1), 61-72.
- [45] Frost, J. D., Evans, T. M., Hebel, G. L., & Giroud, J. P. (2012). Influence of wear mechanisms on geosynthetic interface strengths. *Geosynthetics: state of the art-recent developments proceedings of the seventh international conference on geosynthetics*, Nice, France.
- [46] Monteiro, C. B., Araújo, G. L. S., Palmeira, E. M., & Córdão Neto, M. P. (2013). Soil-geosynthetic interface strength on smooth and texturized geomembranes under different test conditions. *Conference of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris, France, 3053-3056.

- [47] Vangla, P., & Gali, M. L. (2016). Shear behavior of sand – smooth geomembrane interfaces through micro – topographical analysis. *Geotextiles and Geomembranes*, 44, 592-603.
- [48] Punetha, P., Mohanty, P., & Samanta, M. (2017). Microstructural investigation on mechanical behavior of soil-geosynthetic interface in direct shear test. *Geotextiles and Geomembranes*, 45(3), 197-210.
- [49] Cen, W. J., Wang, H., & Fe, Y. J. (2018). Laboratory investigation of shear behavior of high – density polyethylene geomembrane interfaces. *Polymers*, 10, 1-14.
- [50] Markou, I. N., & Evangelou, E. D. (2018). Shear Resistance Characteristics of Soil–Geomembrane Interfaces. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 4(4), 29-39.
- [51] Ari, A. (2020). Kum-geosentetik arayüzeyi kayma direncine fraktal boyutun etkisinin araştırılması. *Yıldız Teknik University Natural and Applied Science*, Istanbul, Turkey.