Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

İNŞAAT YIKINTI ATIĞI DEPOLAMA SAHALARINDA GEOSENTETİK KİL ÖRTÜ (GKÖ) PERFORMANSI: GKÖ TİPİNİN ETKİSİ

PERFORMANCE OF GEOSYNTHETİC CLAY LİNERS (GCLS) IN CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE LANDFILLS: EFFECT OF GCL TYPE

Tuğçe ÖZDAMAR KUL[1], Nilhan DEMİRCİ[2], Çağrı ÇETİK[3], Okan ÖNAL[4], A.Hakan ÖREN[5]

ÖZET

Afetler sonrası oluşan büyük miktardaki inşaat yıkıntı atıklarının (İYA) yönetimi, sızıntı sularının yeraltı sularına karışmasını önlemek açısından ciddi çevresel sorunlara yol açmaktadır. Bu çalışmada, İYA depolama alanlarında bariyer malzemesi olarak kullanılabilecek geosentetik kil örtülerin (GKÖ) performansı deneysel olarak incelenmiştir. Araştırma kapsamında, sodyum bentonit esaslı Na-GKÖ ve membran kaplı M-GKÖ sıkıştırılmış killi kum üzerinde İYA yüklemesine maruz bırakılmıştır. İYA parçalarının oluşturabileceği yerel temas koşullarını temsil etmek amacıyla üç boyutlu (3B) yazıcı ile İYA başlıkları üretilmiş ve GKÖ'ler 25, 50 ve 100 kPa düşey gerilmeler altında hidrasyona bırakılmıştır. Hidrasyon sonrasında 100 kPa altında yüklenmiş GKÖ'ler, sentetik İYA sızıntı suyu kullanılarak hidrolik iletkenlik deneylerine tabi tutulmuştur. Hidrasyon sonuçları, artan düşey gerilmenin her iki GKÖ'nün nihai su içeriğini genel olarak azalttığını ve ulaşılan su içeriğinin GKÖ tipine göre farklılık gösterebildiğini göstermiştir. Hidrolik iletkenlik ve permittivite sonuçları, yerel deformasyonlara rağmen GKÖ'lerin bariyer davranışını büyük ölçüde koruyabildiğini ortaya koymuştur. Bulgular, GKÖ'lerin İYA yüklemesi altındaki bariyer performansının değerlendirilmesinde hidrasyon, yerel deformasyon ve GKÖ tipinin birlikte dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.
Anahtar Kelimeler: *İnşaat ve yıkıntı atığı, geosentetik kil örtü, hidrasyon, hidrolik iletkenlik, düşey gerilme*

ABSTRACT

Managing large quantities of construction and demolition waste (C&DW) generated after disasters poses significant environmental challenges, particularly in preventing leachate from contaminating groundwater. In this study, the performance of geosynthetic clay liners (GCLs) used as barrier materials in C&DW storage areas was experimentally investigated. Within the scope of the research, sodium bentonite-based Na-GCL and membrane-laminated M-GCL were subjected to C&DW loading on compacted clay sand. To represent the localized contact conditions that C&DW particles may create, C&DW indenters were produced using a three-dimensional (3D) printer, and the GCLs were left for hydration under vertical stresses of 25, 50, and 100 kPa. After hydration, GCLs loaded under 100 kPa vertical stress were subjected to hydraulic conductivity tests with synthetic C&DW leachate. The hydration results showed that increasing vertical stress generally reduced the final water content of both GCLs, and the achieved water content could vary depending on the GCL type. Hydraulic conductivity and permittivity results revealed that, despite localized deformations, the GCLs largely

[1]Dr. Öğr. Üyesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, tugce.ozdamar@deu.edu.tr (Sorumlu yazar)
[2]Doktora Öğrencisi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, n.demirci@ogr.deu.edu.tr
[3]Doktora Öğrencisi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, cagri.cetik@deu.edu.tr
[4]Prof. Dr., Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, okan.onal@deu.edu.tr
[5]Prof. Dr., Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, ali.oren@deu.edu.tr

preserved their barrier behavior. The findings indicate that hydration, local deformation and GCL type should be considered together when evaluating the barrier performance of GCL under C&DW loading.
Keywords: *Construction and demolition waste, geosynthetic clay liner, hydration, hydraulic conductivity, vertical stress*

1. GİRİŞ

Afetlerden sonra oluşan inşaat yıkıntı atıklarının (İYA) kısa sürede güvenli bir şekilde depolanması, özellikle büyük depremler sonrasında önemli bir mühendislik problemi hâline gelmektedir. 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrasında ortaya çıkan büyük atık hacmi, İYA depolama sahalarının yalnızca lojistik açıdan değil, çevresel güvenlik açısından da değerlendirilmesi gerektiğini göstermiştir (Doğdu ve Alkan, 2023; Mavroulis vd., 2023). İYA kütlesi beton, tuğla, metal, ahşap ve cam gibi bileşenlerin yanında ağır metaller, asbestli malzemeler ve farklı kimyasal kirleticiler de içerebilmektedir (Akhtar ve Sarmah, 2018; Mavroulis vd., 2023; Chen vd., 2022; Lee vd., 2024). Yağış sularının bu atık kütlesinden süzülmesiyle oluşabilecek sızıntı sularının pH'si ve iyonik gücü yüksek olabileceği gibi içerisinde yüksek konsantrasyonda kalsiyum ve sülfat ile düşük konsantrasyonda iz elementler bulunabilir (Cristelo vd., 2018; Butera vd., 2014; Jang ve Townsend, 2003). Bu nedenle İYA depolama sahalarında atığın doğrudan zeminle temas etmesini sınırlandıracak bariyer sistemlerinin inşa edilmesi önemlidir.

Sıkıştırılmış kil tabakaları ve geomembranlar atık depolama sahalarında yaygın olarak kullanılan geçirimsizlik elemanlarıdır. Ancak afet sonrası koşullarda kil malzemesinin temini, serilmesi ve sıkıştırılması operasyonel zorluk içermenin yanında oldukça zaman alan bir unsurdur. Geomembranların kullanımında ise bindirme bölgelerinin ısıl işlemle kaynaklanması gerekirken, keskin/köşeli atık parçalarının geomembrana hasar verme riski de oldukça yüksektir (Joshi, 2016). Bu nedenle geosentetik kil örtüler (GKÖ), hızlı uygulanabilmeleri ve düşük hidrolik iletkenlik sağlayabilmeleri nedeniyle İYA depolama sahaları için pratik bir alternatif olarak değerlendirilebilir (Koerner, 2005; Ören ve Demirkıran, 2015; Özdamar Kul ve Ören, 2018; Özdamar Kul ve Ören, 2019). GKÖ'lerin bu performansı, iki geotekstil arasında yer alan bentonitin hidrate olarak şişmesine bağlıdır. Bentonitin şişmesi yalnızca geçirimsizliğe değil; aynı zamanda belirli hasar durumlarında kendini onarma davranışına da katkı sağlar (Mazzieri ve Pasqualini, 2000; Li ve Rowe, 2020; Li ve Rowe, 2022).

GKÖ'nün sahadaki davranışı, yalnızca üretici tarafından verilen hidrolik iletkenlik değeriyle açıklanamaz. GKÖ'nün serildiği alt zemin, bariyer performansını doğrudan etkileyen temel unsurlardan biridir. Alt zeminin su içeriği, dane dağılımı, geçirimliliği ve gözenek suyu kimyası bentonitin ne kadar ve hangi kimyasal koşullarda hidrate olacağını belirler (Rayhani vd., 2011; Anderson vd., 2012; Bradshaw vd., 2013; Rowe ve Li, 2020; Rowe ve Li, 2021; Karakuş vd., 2022). Özellikle kalsiyum ve magnezyum gibi iki değerlikli katyonlar, sodyum bentonitte katyon değişimine neden olarak şişme kapasitesini azaltabilir ve GKÖ'nün hidrolik davranışını olumsuz etkileyebilir (Kolstad vd., 2004; Rowe ve Li, 2021). Bu durum, İYA depolama sahaları açısından önemlidir; çünkü sahada kullanılan alt zemin her zaman ideal, düşük iyonik güçte ve düzgün bir yüzey olmayabilir.

Bunun yanında, İYA depolama sahalarında GKÖ kullanılması durumunda beton, tuğla, seramik ve benzeri köşeli parçalar GKÖ'de yerel deformasyonlara, bentonitin GKÖ içinde yer değiştirmesine veya sızıntı yollarının oluşmasına neden olabilir. Literatürde GKÖ'lerin iri daneli zeminler, geomembran kırışıklıkları veya düzensiz yüzeyler altında deformasyona uğrayabildiği ve bu durumun hidrolik performansı etkileyebildiği gösterilmiştir (Fox vd.,

2000; Dickinson ve Brachman, 2006). Bu nedenle GKÖ performansını değerlendirirken alt zemin etkisi ile GKÖ tipinin birlikte ele alınması gerekir. Çünkü farklı GKÖ tipleri, bentonit miktarı, katkı içeriği, geotekstil yapısı ve iğneleme özellikleri bakımından birbirinden ayrılır ve aynı alt zemin koşullarında farklı bariyer davranışı gösterebilir (Özdamar Kul ve Ören, 2018; Özdamar Kul ve Ören, 2019; Polat vd., 2021; Demir Sürer vd., 2024).

Bu çalışmada, İYA depolama sahalarında kullanılabilecek GKÖ'lerin performansı GKÖ tipi açısından değerlendirilmiştir. Çalışmanın temel amacı, İYA depolama sahalarında GKÖ seçiminin yalnızca malzeme özelliklerine göre değil, uygulanacağı alt zeminin fiziksel ve kimyasal koşullarıyla birlikte yapılması gerektiğini ortaya koymaktır. Bu yönüyle çalışma, afet sonrası geçici veya uzun süreli İYA depolama sahalarında uygun bariyer seçimi için deneysel bir değerlendirme sunmayı amaçlamaktadır.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Malzemeler

Geosentetik Kil Örtü

Çalışma kapsamında yerel bir üreticiden temin edilen iki farklı GKÖ (Na-GKÖ ve M-GKÖ) kullanılmıştır. İğnelenmek suretiyle imal edilen GKÖ'lerin bir yüzünde örgülü, diğer yüzünde ise örgüsüz geotekstil bulunmaktadır. GKÖ'lerden birinin (M-GKÖ) örgülü geotekstil bulunan yüzü 0,04 mm kalınlığında geomembranla kaplıdır. Na-GKÖ içinde sodyum bentonit (Na-bentonit) ve M-GKÖ içinde polimerle modifiye edilmiş bentonit bulunmaktadır. GKÖ'lerin rulo genelindeki birim alan başına bentonit kütlesi (BABBK) Na-GKÖ için 3,3-5,6 kg/m^2, M-GKÖ için 4,4-6,4 kg/m^2 belirlenmiştir.

Tablo 1. Geosentetik kil örtülerin bazı fiziko-kimyasal özellikleri

GKÖ özelliği	Na-GKÖ	M-GKÖ	İlgili Standart
Bentonit ağırlığı/Alan (kg/m^2)	3,3-5,6	4,4-6,4	ASTM D5993–99 (2010)
Serbest şişme indeksi (mL/2g)	22,5	40	ASTM D5890 − 25 (2025)
Likit limit (%)	231	289	ASTM D4318-17e1 (2017)

Alt Zemin

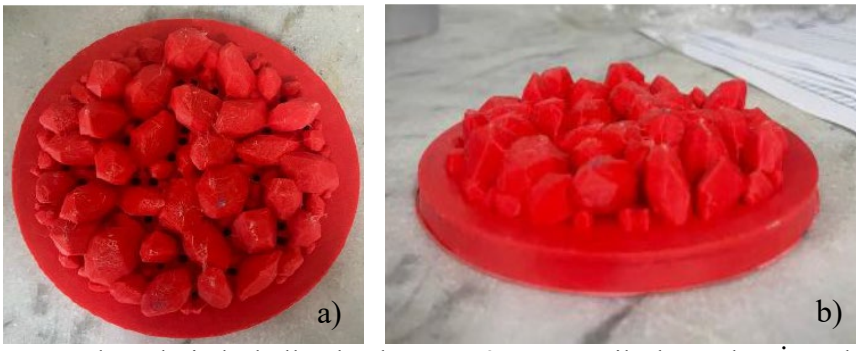
İnşaat yıkıntı atıklarının depolanacağı alanlarda bulunacak zeminleri temsil etmek için, çalışma kapsamında laboratuvarda mevcut olan doğal zemin alt zemin malzemesi olarak kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan zemin, ASTM D 2487-17 (USCS)'ye göre killi kum (SC) olarak sınıflandırılmıştır. Alt zemin malzemesinin standart Proctor enerjisi altında elde edilen optimum su içeriği (ω_{opt}) ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_{maks}) sırasıyla %12 ve 19,7 kN/m^3'dir.

2.2. Yöntemler

Hidrasyon Deneyleri için İnşaat ve Yıkıntı Atıklarını Temsil Edecek Üç Boyutlu (3B) Yazıcıda Bastırılan İYA Başlık Hazırlanması

Laboratuvarda gerçekleştirilen hidrasyon deneylerinde İYA yüklemesinin temsil edilmesi hedeflenmiştir. Böylece İYA'nın düzgün olmayan yüzeylerinin GKÖ'leri deforme etmesi planlanmıştır. Bunu sağlayabilmek için İYA parçacıklarını içeren, 100 mm çapında ve 19 mm kalınlığında üç boyutlu bir başlık modellenmiştir. Modellemede kullanılacak danelerin

zemin mekaniğinde standart kabul edilen küresellik ve yuvarlaklık değerleri için 0,3-0,7 aralığında yarı köşeli/yarı yuvarlak olacak şekilde rastgele seçilmesi; her bir danenin 3B uzayda rastgele döndürülerek doğadaki dizilimi taklit etmesi kurgulanmıştır.
Modellemede İYA danelerinden iyi derecelenmiş bir yapı oluşturmak için dört fazda dane boyu seçilmiştir. Dane boyutları, iskelet fazı için nispeten iri danelerden oluşacak şekilde iki fazda 15-19,5 mm ve 9,5-15 mm; dolgu (matris) fazı için ise yine iki fazda 7-9,5 mm ve 4,75-7 mm çapında seçilmiştir. Başlıkların hidrolik iletkenlik deneylerinde de kullanılabilmesi için taşları temsil eden çıkıntıların arasında kalan kısımlara 3 mm çapında içi boş silindirler modellenmiştir. Başlıkta yaklaşık 100 adet benzersiz danenin birbirine kenetlenecek şekilde yerleştirilmesini sağlayacak Python kodu oluşturulmuştur. Oluşturulan kod Google Colab platformunda çalıştırılarak başlığın üç boyutlu modeli elde edilmiştir. Daha sonra oluşturulan başlık modeli 3B yazıcı kullanılarak PLA filament ile basılmıştır. Çalışma kapsamında modellenen ve 3B yazıcı ile basılan başlıkların görünümü Şekil 1'de verilmiştir.



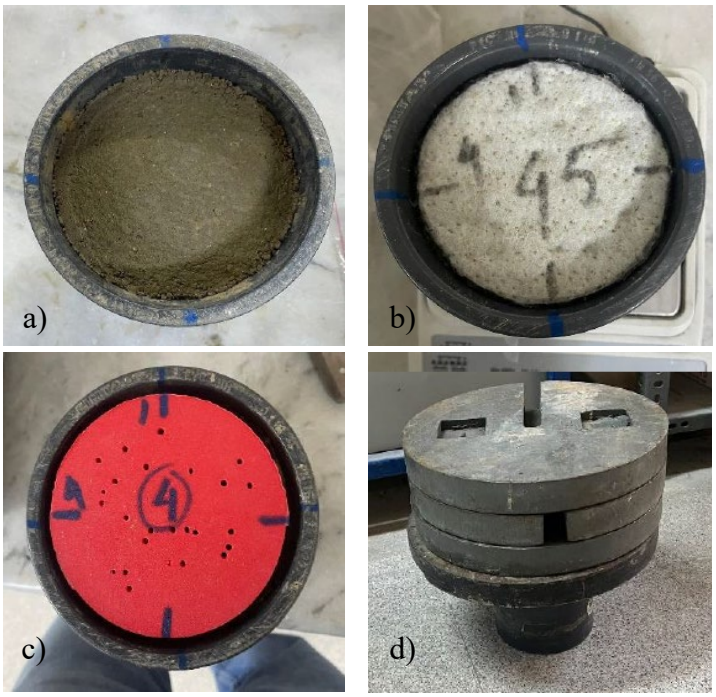
Şekil 1. Hidrasyon deneylerinde kullanılmak üzere 3B yazıcı ile bastırılan İYA başlık modeli: a) üstten ve b) yandan görünüşü

Hidrasyon Deneyleri

Hidrasyon deneyleri için alt zemin, standart Proctor enerjisinde optimum su içeriğinin %2 ıslak kısmında hazırlandıktan sonra ASTM D698-12 standardında belirtilen prosedür izlenerek otomatik kompaktör ile sıkıştırılmıştır. Zemin örnekleri hedeflenen su içeriğine ulaşabilmek için püskürtücü yardımıyla yavaş yavaş ıslatılmıştır. Bu işlem sırasında zemin sürekli karıştırılarak suyun zemin içinde homojen şekilde dağılması sağlanmıştır. Sıkıştırma işlemi, 110 mm çapında ve 127 mm yüksekliğindeki PVC kalıplarda gerçekleştirilmiştir.

Sıkıştırma işlemi sırasında kalıp içerisinde GKÖ'nün yerleştirileceği bir boşluk oluşturmak için kalıbın tabanına 20 mm kalınlığında düz polioksimetilen disk yerleştirilmiştir. Sıkıştırma işleminden sonra kalıp ters çevrilerek disk çıkarılmıştır (Şekil 2a). Kalıp içerisinde kalan boşluğa, GKÖ'nün örgülü yüzü zemin ile temas edecek şekilde yerleştirilmiş (Şekil 2b) ve üstüne 3B yazıcıda bastırılan başlığın İYA'lı yüzünü temsil eden pürüzlü kısmı GKÖ'nün örgüsüz yüzeyine temas edecek şekilde konumlandırılmıştır (Şekil 2c). Kullanılan kalıplar, GKÖ örnekleri ve 3B yazıcıda bastırılan İYA başlıkları hidrasyon deneyleri sırasında yapılacak ölçümlerden sonra aynı noktalara konumlandırmanın sağlanabilmesi için belirli noktalardan mavi boya ile işaretlenmiştir. Oluşturulan sistem üzerine GKÖ'nün İYA yüklemesi altında maruz kalacağı deformasyonların ve hidrasyon davranışının gözlemlenmesi amacıyla farklı düşey gerilmeler (25, 50, 100 kPa) uygulanmıştır (Şekil 2d). Örnekler 45 güne kadar uygulanan düşey gerilmeler altında İYA yüklemesine maruz bırakılmıştır. Bu süreç içerisinde GKÖ'ler belirli aralıklarla PVC

kalıplardan çıkarılmış ve su içeriği değişimlerinin belirlenebilmesi için ağırlık ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 2. Hidrasyon deneyleri için numune hazırlama aşamaları: a) zeminin PVC kalıp içerisinde sıkıştırılması, b) GKÖ'nün sıkıştırılmış zemin üzerine yerleştirilmesi; c) 3B yazıcıda bastırılmış İYA'lı başlığın GKÖ üzerine konumlandırılması ve d) düşey gerilmenin uygulanması

Hidrolik İletkenlik Deneyleri

Hidrasyondan sonra kalıplardan çıkarılan örneklerin hidrolik iletkenlik davranışlarının belirlenmesi için, esnek duvarlı permeametre hücrelerinde ASTM D6766-20'de de belirtildiği şekilde, düşen seviyeli hidrolik iletkenlik deneyleri yapılmıştır.

Hidrasyon sırasında İYA yüklemesine bağlı olarak GKÖ'nün alt ve üst yüzeylerinde oluşan deformasyonların korunabilmesi için, hidrolik iletkenlik deneylerinde GKÖ'ye temas eden malzeme düzeni mümkün olduğunca korunmuştur. Bu amaçla, hidrasyon sonrası sıkıştırılmış alt zemin örneğinin yalnızca GKÖ ile temas eden üst 30 mm'lik kısmı kesilerek alınmış ve GKÖ numunesi bu zemin tabakası ile 3B yazıcıda bastırılmış İYA başlığı arasına yerleştirilmiştir. Hazırlanan sistem esnek duvarlı permeametre hücresinin alt ve üst başlıkları arasına konumlandırılmıştır (Şekil 3a). Kenar sızmalarını önlemek için numune çevresi plastik kıvamda hazırlanan Na-bentonit ile sıvanmış, ardından lateks membran geçirilerek O-halkalarla sabitlenmiştir (Şekil 3b). Akış bağlantıları tamamlandıktan sonra permeametre hücresi kapatılmış ve su ile doldurulmuştur (Şekil 3c).

Hidrolik iletkenlik deneylerinde uygulanan hücre basıncı, hidrasyon aşamasındaki maksimum düşey gerilmeye eşit olacak şekilde 100 kPa olarak ayarlanmıştır. Süzdürme sıvısı olarak İYA sızıntı suyunu temsil etmek amacıyla literatürde raporlanan İYA sızıntı suyu bileşimleri esas alınarak hazırlanan sentetik bir çözelti kullanılmıştır. Çözeltide Ca^{2+} ve SO_4^{2-} baskın iyonlar olarak seçilmiş; Na^+, K^+ ve Mg^{2+} bileşenleri literatürde verilen konsantrasyon aralıklarını temsil edecek şekilde eklenerek iyonik gücü (I) 96 mM olan sentetik bir İYA sızıntı suyu hazırlanmıştır (Townsend vd., 1999; Jang ve Townsend, 2003;

Lopez Meza vd., 2008; Butera vd., 2014). Deneyler süresince hidrolik eğimde önemli değişimler olmaması için düşü seviyeleri sınırlı tutulmuştur. Deneylerin sonlandırılması için fiziksel denge koşulu olan, örnek içerisinden çıkan sıvı hacminin örnek içerisine giren sıvı hacmine oranının ($Q_{çıkış}/Q_{giriş}$) 1±0,25 olması ve kimyasal denge koşulu olan, çıkış ve giriş sıvılarının pH ve elektriksel iletkenlik oranlarının ($pH_{çıkış}/pH_{giriş}$ ve $EI_{çıkış}/EI_{giriş}$) 1±0,1 olması koşulları aranmıştır.



Şekil 3. Hidrolik iletkenlik deneyleri için örnek hazırlama aşamaları: a) GKÖ'nün sıkıştırılmış alt zemin tabakasının üst 30 mm kalınlığındaki kısmı ve 3B yazıcıda bastırılan İYA başlık arasında permeametre başlıkları arasına yerleştirilmesi, b) numune çeperinin Na-bentonit ile sıvanması ve c) hidrolik iletkenlik öncesi GKÖ numunesinin nihai hali

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

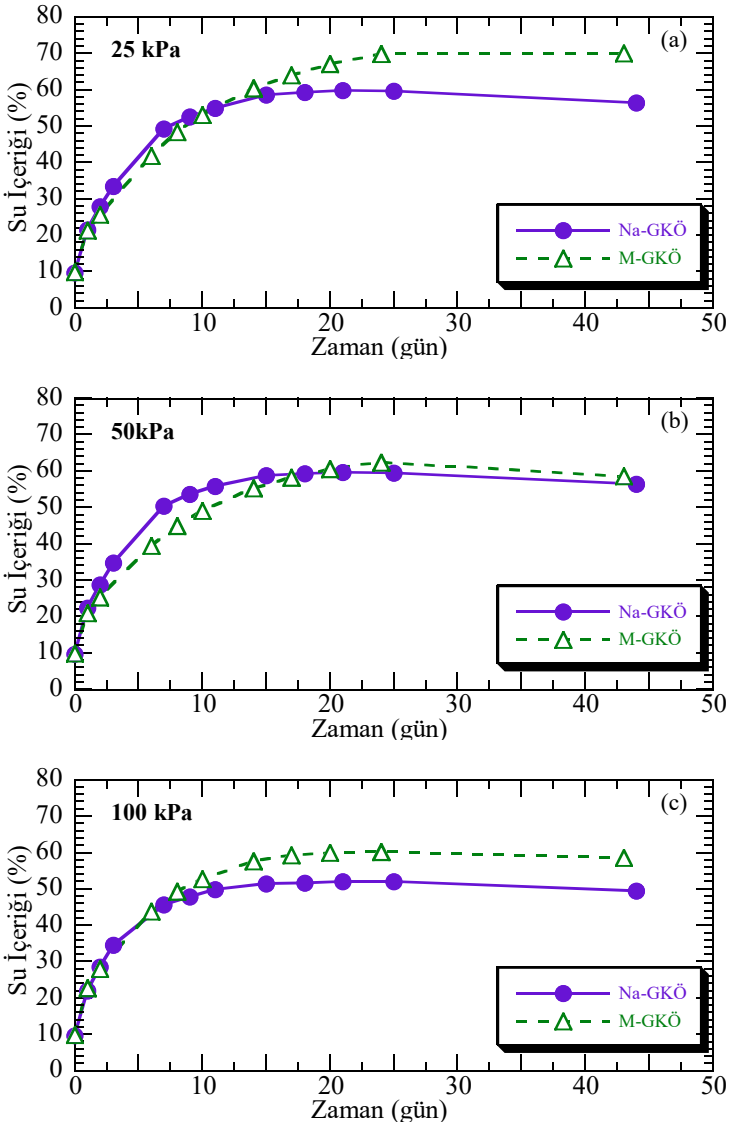
3.1. İnşaat Yıkıntı Atığı Sahalarında Geosentetik Kil Örtülerin Hidrasyon Davranışı

GKÖ tipinin hidrasyon davranışı üzerindeki etkisi, sıkıştırılmış killi kum zemin üzerinde hidrate edilen Na-GKÖ ve M-GKÖ numuneleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu kapsamda numuneler, İYA yüklemesini temsil eden 25, 50 ve 100 kPa düşey gerilmeler altında hidrate edilmiş ve zamana bağlı su içeriği değişimleri Şekil 4'te verilmiştir.

Genel olarak bakıldığında her iki GKÖ'nün de su içeriği değerlerinin hidrasyon deneylerinin ilk günlerinde hızlı biçimde arttığı, daha sonra bu artış hızının azalarak belirli bir denge seviyesine ulaştığı gözlemlenmiştir. Şekil 4a'da 25 kPa düşey gerilme altında GKÖ'lerin hidrasyon davranışı görülmektedir. Bu gerilme seviyesinde Na-GKÖ ve M-GKÖ'nün su içeriği değerleri deneylerin ilk günlerinde birbirine oldukça yakın bir artış eğilimi göstermiştir. Yaklaşık ilk 7–10 gün içinde her iki numunede de su içeriği %50 seviyesine yaklaşmıştır. İlerleyen süreçte M-GKÖ'nün su içeriği artmaya devam etmiş ve yaklaşık %70 seviyesine ulaşmıştır. Buna karşılık Na-GKÖ'nün hidrasyon sonu su içeriğinin ~%60 mertebesinde dengelendiği gözlemlenmiştir.

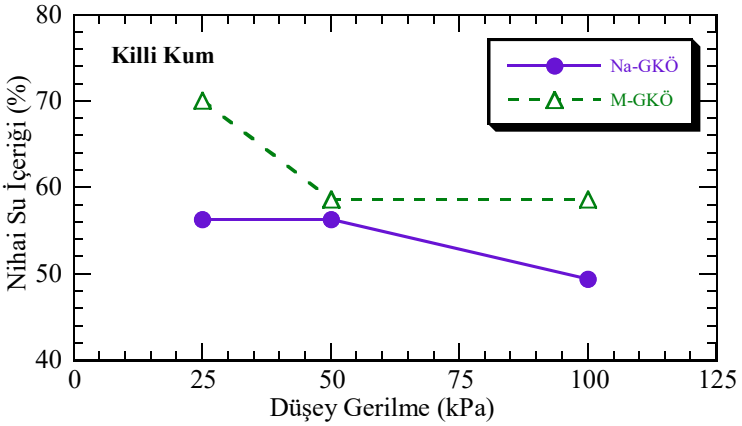
Şekil 4b'de 50 kPa düşey gerilme altında GKÖ'lerin hidrasyon davranışı karşılaştırılmıştır. Bu gerilme seviyesinde Na-GKÖ başlangıçta M-GKÖ'ye göre biraz daha hızlı su almış, ancak ~15–20 gün sonunda iki numunenin su içerikleri birbirine yaklaşmıştır. Şekil 4c'de ise 100 kPa düşey gerilme altında elde edilen sonuçlar verilmiştir. Bu koşulda iki GKÖ tipi arasındaki fark yeniden belirginleşmiştir. Deneyin erken döneminde Na-GKÖ ve M-GKÖ benzer bir hidrasyon eğilimi gösterse de ilerleyen süreçte M-GKÖ'nün su içeriği ~%60 seviyesine ulaşırken Na-GKÖ'nün su içeriği ~%50 civarında kalmıştır. Yüksek düşey gerilme altında M-GKÖ'nün daha yüksek su içeriğini koruması bu GKÖ tipinin ve

içeriğindeki polimer katkısının yüksek gerilme koşullarında daha fazla su tutabildiğini düşündürmektedir.



Şekil 4. Sıkıştırılmış killi kum üzerinde hidrate edilen Na-GKÖ ve M-GKÖ numunelerinin İYA yüklemesini temsil eden farklı düşey gerilmeler altında zamana bağlı hidrasyon davranışı: a) 25 kPa, b) 50 kPa ve c) 100 kPa

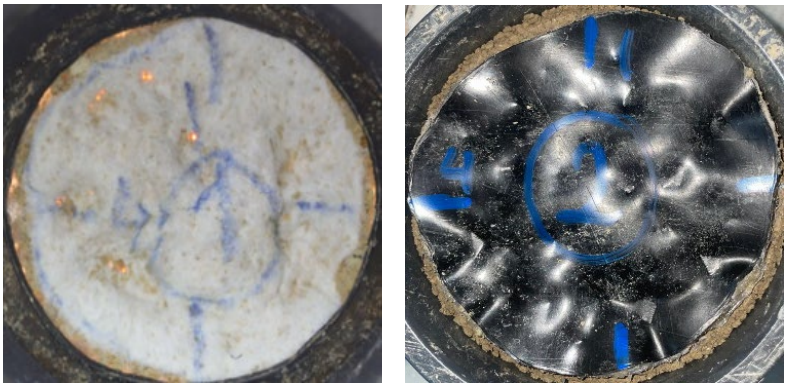
Şekil 5'de nihai su içeriği değerleri düşey gerilmeye bağlı olarak karşılaştırıldığında, her iki GKÖ tipinde de uygulanan gerilmenin artmasıyla genel olarak su içeriğinde azalma eğilimi görülmektedir. M-GKÖ örneklerinde 25 ve 100 kPa gerilme seviyelerinde Na-GKÖ'ye kıyasla daha yüksek nihai su içerikleri elde edilirken, 50 kPa'da iki GKÖ tipi benzer değerler göstermiştir. Bununla birlikte, özellikle 50 kPa'daki yakın değerlerin ve gerilme seviyeleri arasındaki farklılıkların numuneler arası değişkenlikten etkilenmiş olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Genel olarak sonuçlar, düşey gerilmenin her iki GKÖ'nün hidrasyonunu sınırlandırdığını, ancak elde edilen nihai su içeriği değerlerinin GKÖ tipine göre farklılık gösterebildiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 5. İYA yüklemesini temsil eden düşey gerilmenin GKÖ nihai su içeriğine etkisi

3.2. İnşaat Yıkıntı Atığı Sahalarında Geosentetik Kil Örtülerin Hidrolik İletkenlik Davranışı

Hidrasyon sürecinden sonra, 100 kPa düşey gerilme altında İYA yüklemesine maruz bırakılan Na-GKÖ ve M-GKÖ numuneleri önce görsel olarak incelenmiştir (Şekil 6), daha sonra hidrolik iletkenlik deneylerine alınmıştır. Şekil 6'da görüldüğü gibi, yükleme sonrasında numune yüzeylerinde, özellikle 3B baskı başlıklarının temas ettiği bölgelerde, yerel izler, sıkışmalar ve yüzey formunda değişimler oluşmuştur. Bu görünüm, İYA içindeki köşeli ve düzensiz parçaların GKÖ üzerinde oluşturabileceği temas etkisinin deney düzeneğinde belirli ölçüde temsil edilebildiğini göstermektedir.



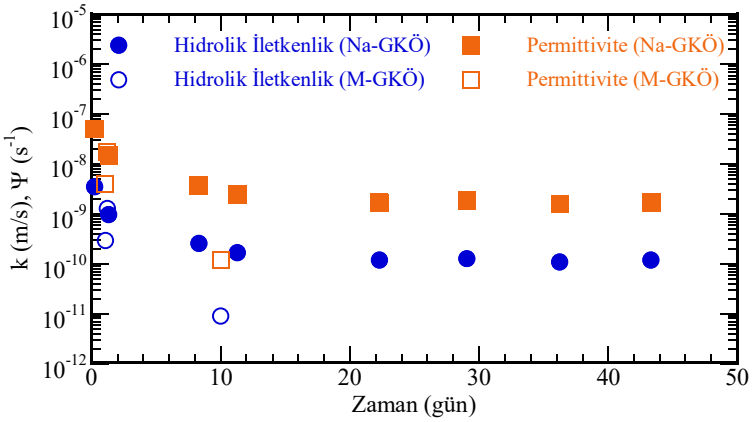
Şekil 6. 100 kPa düşey gerilme altında hidrasyon sonrası numunelerinin yüzey görünümü: a) Na-GKÖ ve b) M-GKÖ

Bu tür yerel deformasyonlar nedeniyle bariyer performansının yalnızca hidrolik iletkenlik üzerinden irdelenmesinin yeterli olmayabileceği değerlendirilmiştir. Çünkü GKÖ kalınlığı yükleme sonrasında her noktada aynı kalmamaktadır. Bazı bölgelerde bentonit tabakası daha fazla sıkışırken, bazı bölgelerde yer değiştirme veya yüzey düzensizliği oluşabilmektedir. Bu nedenle çalışmada hidrolik iletkenlik (k) değerlerine ek olarak permittivite (Ψ) değerleri de verilmiştir. Permittivite, kalınlık değişimi etkisini ortadan kaldırdığı için özellikle deformasyona uğramış GKÖ numunelerinde hidrolik performansın daha sağlıklı yorumlanmasına yardımcı olmaktadır.

Şekil 7'de Na-GKÖ ve M-GKÖ numunelerinin sentetik İYA sızıntı suyu ile yapılan deneylerindeki hidrolik iletkenlik ve permittivite davranışları zamana bağlı olarak

verilmiştir. Deneyin ilk aşamalarında her iki GKÖ tipinde de daha yüksek hidrolik iletkenlik değerleri ölçülmüştür. Bu başlangıç değerleri, Şekil 6'de görülen yerel deformasyonlar ve İYA temas koşulları altında GKÖ'de oluşabilecek hasar veya süreksizliklerle ilişkilendirilebilir. Ancak süzdürme işlemi ilerledikçe hidrolik iletkenlik değerlerinin azaldığı ve daha düşük seviyelerde dengelenme eğilimi gösterdiği görülmektedir. Bu durum, deney sırasında bentonitin su almaya ve şişmeye devam etmesiyle, başlangıçta oluşan yerel akış yollarının zamanla daralması veya kapanmasıyla açıklanabilir.

Hidrolik iletkenlik değerleri Na-GKÖ'de deneyin ilerleyen aşamalarında genel olarak 10^{-10} m/s mertebesinde kalmıştır; M-GKÖ'de ise daha düşük seviyelere indiği ve 10^{-11} m/s mertebesine ulaştığı görülmektedir. Bu sonuçlar, 100 kPa altında yüklenmiş ve yüzeyinde yerel deformasyonlar oluşmuş olmasına rağmen her iki GKÖ'nün de sentetik İYA sızıntı suyu karşısında düşük geçirgenlik davranışı gösterebildiğini ortaya koymaktadır. Permittivite sonuçları da bu değerlendirmeyi desteklemektedir. İYA yüklemesinin etkisi altında numunelerin genelinde kalınlık farklılıkları oluşmasına rağmen, permittivite değerleri düşük seviyelerde kalmıştır. Bu durum, bentonitin hidrasyon ve şişme davranışının yükleme sırasında oluşan yerel düzensizliklerin etkisini kısmen sınırlamış olduğunu düşündürmektedir. Bununla birlikte, hidrolik iletkenlik deneyleri halen devam etmekte olduğundan, burada sunulan değerler mevcut deney süresindeki davranışı temsil etmekte olup zaman içerisinde değişim gösterebilir.



Şekil 7. İYA yüklemesini temsil eden koşullar altında Na-GKÖ ve M-GKÖ'nün sentetik İYA sızıntı suyuna karşı hidrolik iletkenlik ve permittivite davranışları

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, İYA depolama sahalarında kullanılabilecek iki farklı GKÖ'nün İYA yüklemelerini temsil eden düşey gerilmeler altında hidrasyon davranışı ile deformasyon sonrası sentetik İYA sızıntı suyuna karşı bariyer performansı deneysel olarak incelenmiştir.

Hidrasyon sonuçları, her iki GKÖ tipinde de düşey gerilmenin artmasıyla nihai su içeriğinin genel olarak azaldığını göstermiştir. M-GKÖ, 25 ve 100 kPa'da Na-GKÖ'ye göre daha yüksek nihai su içeriğine ulaşırken, 50 kPa'da iki GKÖ için de birbirine yakın değerler elde edilmiştir. Gerilme seviyeleri arasında gözlenen farklılıkların numuneler arası değişkenlikten de etkilenebileceği dikkate alındığında, sonuçlar düşey gerilmenin her iki GKÖ'nün hidrasyonunu sınırlandırdığını, ancak ulaşılan nihai su içeriğinin GKÖ tipine göre farklılık gösterebildiğini ortaya koymaktadır.

İYA yüklemesi koşullarını temsil eden 3B başlıklar GKÖ yüzeylerinde yerel deformasyonlar oluşturmuştur. Buna rağmen, sentetik İYA sızıntı suyu ile yapılan hidrolik iletkenlik deneylerinde her iki GKÖ de düşük geçirgenlikli bariyer davranışını korumuştur. Mevcut aşamada, M-GKÖ'nün daha düşük hidrolik iletkenlik ve permittivite değerleri göstermesi, membranlı yapının ve içeriğindeki polimer katkısının İYA yüklemesi altında avantaj sağlayabileceğini düşündürmektedir.

Genel olarak, GKÖ tipinin İYA yüklemesi altındaki hidrasyon ve hidrolik davranış üzerinde etkili olduğu, ancak bu etkinin uygulanan gerilme ve oluşan yerel deformasyonlarla birlikte değerlendirilmesi gerektiği belirlenmiştir. Hidrolik iletkenlik deneyleri devam ettiğinden, elde edilen sonuçlarda ilerleyen süre içerisinde farklılıklar oluşabileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, UDAP Projesi (Proje No. 124R037) kapsamında TÜBİTAK ve AFAD tarafından finansal olarak desteklenmiştir. Yazarlar TÜBİTAK ve AFAD tarafından sağlanan finansal destek için teşekkürlerini sunarlar.

KAYNAKLAR

Akhtar, A., Sarmah, A. K. (2018). Construction and Demolition Waste Generation and Properties of Recycled Aggregate Concrete: A Global Perspective. *Journal of Cleaner Production*, 186, 262–281.

Anderson, R., Rayhani, M. T., Rowe, R. K. (2012). Laboratory investigation of GCL hydration from clayey sand subsoil. *Geotextiles and Geomembranes*, 31, 31–38.

ASTM D2487-17. (2017). Standard Practice for Engineering Purposes (Unified
Soil Classification System). *ASTM International*.

ASTM D4318-17e1. (2017). Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. *ASTM International*.

ASTM D5890-25. (2025). Standard Test Method for Swell Index of Clay Mineral Component of Geosynthetic Clay Liners. *ASTM International*.

ASTM D5993–99. (2010). Standard Test Method for Measuring Mass Per Unit of Geosynthetic Clay Liners. *ASTM International*.

ASTM D6766-20. (2020). Standard Test Method for Evaluation of Hydraulic Properties of Geosynthetic Clay Liners Permeated with Potentially Incompatible Aqueous Solutions. *ASTM International*.

ASTM D698-12. (2021). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)). *ASTM International*.

Bradshaw, S. L., Benson, C. H., Scalia, J. (2013). Hydration and Cation Exchange During Subgrade Hydration and Effect on Hydraulic Conductivity of Geosynthetic Clay Liners. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(4), 526–538.

Butera, S., Christensen, T. H., & Astrup, T. F. (2014). Composition and leaching of construction and demolition waste: Inorganic elements and organic compounds. *Journal of Hazardous Materials*, 276, 302–311.

Chen, Z., Feng, Q., Yue, R., Chen, Z., Osama, M., Soliman, A., Hammad, A., An, C. (2022). Construction, Renovation, and Demolition Waste in Landfill: A Review of Waste

Characteristics, Environmental Impacts, and Mitigation Measures. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 46509–46526.

Cristelo, N., Fernández-Jiménez, A., Vieira, C., Miranda, T., Palomo, Á. (2018). Stabilisation of Construction and Demolition Waste with a High Fines Content Using Alkali Activated Fly Ash. *Construction and Building Materials*, 170, 26–39.

Demir Sürer, A., Özdamar Kul, T., Ören, A. H. (2024). Hydraulic Conductivity of Geosynthetic Clay Liners to Trona Ash Leachate: Effects of Mass per Unit Area, Bundles of Fiber Existence, and Prehydration Conditions. *Waste Management*, 174, 351–361.

Dickinson, S., & Brachman, R. W. I. (2006). Deformations of a Geosynthetic Clay Liner Beneath a Geomembrane Wrinkle and Coarse Gravel. *Geotextiles and Geomembranes*, 24(5), 285–298.

Doğdu, G., Alkan, S. N. (2023). Deprem Sonrası Oluşan İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Değerlendirilmesi: 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremleri. *Artvin Çoruh Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 1(1), 38–50.

Fox, P. J., De Battista, D. J., Mast, D. G. (2000). Hydraulic Performance of Geosynthetic Clay Liners Under Gravel Cover Soils. *Geotextiles and Geomembranes*, 18, 179–201.

Jang, Y.-C., & Townsend, T. G. (2003). Effect of Waste Depth on Leachate Quality from Laboratory Construction and Demolition Debris Landfills. *Environmental Engineering Science*, 20(3), 183–196.

Joshi, P. (2016). Hydraulic Performance of Geosynthetic Liners in Landfills and Tailings Storage Facilities. *Queen's University*.

Karakuş, Y., Taşkesti, B. E., Ören, A. H. (2022). Combined influence of subsoil water content and mass per unit area on cation exchange behavior of geosynthetic clay liners. *Geotextiles and Geomembranes*, 50(1), 174–182.

Koerner, R. M. (2005). *Designing with Geosynthetics* (5th ed.). Pearson Prentice Hall.

Kolstad, D. C., Benson, C. H., & Edil, T. B. (2004). Hydraulic Conductivity and Swell of Nonprehydrated Geosynthetic Clay Liners Permeated with Multispecies Inorganic Solutions. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130(12), 1236-1249. https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2004)130:12(1236)

Lee, S., Chang, H., Lee, J. (2024). Construction and demolition waste management and its impacts on the environment and human health: Moving forward sustainability enhancement. *Sustainable Cities and Society*, 115, 1–18.

Li, T. K., & Rowe, R. K. (2020). GCL Self-healing: Fully Penetrating Hole/Slit Hydrated with RO Water and 10 mM Na Solution. *Geosynthetics International*, 27(1), 34–47.

Li, T. K., & Rowe, R. K. (2022). Self-healing of Laboratory Eroded Defects in a GCL on Silty Sand. *Geosynthetics International*, 29(1), 43–65.

Lopez Meza, S., Garrabrants, A. C., van der Sloot, H., & Kosson, D. S. (2008). Comparison of the release of constituents from granular materials under batch and column testing. *Waste Management*, 28(10), 1853–1867.

Mavroulis, S., Mavrouli, M., Vassilakis, E., Argyropoulos, I., Carydis, P., Lekkas, E. (2023). Debris Management in Turkey Provinces Affected by the 6 February 2023 Earthquakes: Challenges during Recovery and Potential Health and Environmental Risks. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13, 8823, 1–34.

Mazzieri, F., Pasqualini, E. (2000). Permeability of Damaged Geosynthetic Clay Liners. *Geosynthetics International*, 7(2), 101–118.

Ören, A. H., Demirkıran, H. (2015). Geosentetik Kil Örtülerin Hidrolik İletkenliklerinin Laboratuvarda Belirlenmesi Üzerine Bir Çalışma. *Teknik Dergi*, 7191–7214.

Özdamar Kul, T., Ören, A. H. (2018). Liquid Limit Based Assessment of Geosynthetic Clay Liners Subject to Hydration and Hydraulic Conductivity Testings. *Geotextiles and Geomembranes*, 46, 436–447.

Özdamar Kul, T., Ören, A. H. (2019). Hydration of Geosynthetic Clay Liners (GCLs) on Compacted Zeolite. *Geosynthetics International*, 26(1), 81–91.

Polat, F., Özdamar Kul, T., Ören, A. H. (2021). Influence of Mass per Unit Area on the Hydraulic Conductivity of Geosynthetic Clay Liners (GCLs). *European Journal of Science and Technology*, 28, 1269–1273.

Rayhani, M. T., Rowe, R. K., Brachman, R. W. I., Take, W. A., Siemens, G. (2011). Factors Affecting GCL Hydration Under Isothermal Conditions. *Geotextiles and Geomembranes*, 29(6), 525–533.

Rowe, R. K., & Li, T. K. (2020). Self-healing of Circular and Slit Defects in GCLs upon Hydration from Silty Sand under Applied Stress. *Geotextiles and Geomembranes*, 48(5), 667–683.

Rowe, R. K., & Li, T. K. (2021). Influence of Pore Water Chemistry on GCL Self-healing with Hydration from Silica Sand. *Geotextiles and Geomembranes*, 49(4), 871–894.

Townsend, T. G., Jang, Y., Thurn, L. G., Simulation Of Construction and Demolition Waste Leachate. Journal ofEnvironmental Engineering, 125(11), 1071–1081, 1999.