Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

İNŞAAT YIKINTI ATIĞI (İYA) İYA YÜKÜ ALTINDA GEOSENTETİK KİL ÖRTÜ (GKÖ) BARİYER PERFORMANSININ ALT ZEMİN SU İÇERİĞİ İLE İLİŞKİSİ

RELATIONSHIP BETWEEN SUBSOIL WATER CONTENT AND BARRİER PERFORMANCE OF GEOSYNTHETİC CLAY LINERS (GCLS) UNDER CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE (C&DW) LOADING

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

ÖZET

İnşaat ve yıkıntı atıkları (İYA), özellikle afetler sonrasında büyük miktarlarda ortaya çıkmakta ve çoğunlukla geçici veya kalıcı depolama alanlarında biriktirilmektedir. Acil müdahale gereği bu alanlarda yeterli mühendislik önlemlerinin alınamaması, yağış etkisiyle oluşan İYA kaynaklı sızıntı sularının yeraltı suyuna karışma riskini artırmaktadır. Bu riski azaltmak üzere, hızlı uygulanabilir ve düşük geçirgenlik özelliklerine sahip geosentetik kil örtülerin (GKÖ) İYA'ların depolandığı sahalarda bir bariyer malzemesi olarak kullanılabileceği değerlendirilmektedir. Ancak GKÖ performansının hidrasyon sırasında İYA'dan kaynaklanan mekanik hasarlardan önemli ölçüde etkilenmesi beklenmektedir. Sunulan çalışmada, GKÖ'ler %8, %11 ve %14 su içeriğine sahip alt zeminler üzerine yerleştirildikten sonra 100 kPa İYA gerilmesine maruz bırakılarak hidrasyon sırasında GKÖ üzerinde meydana gelecek hasar durumu incelenmiştir. Bu süreçte GKÖ'nün su içeriği izlenmiş, ardından numuneler esnek duvarlı permametreye yerleştirilerek hidrolik iletkenlik deneyleri İYA sızıntı suyunu temsil eden sentetik sızıntı suyu kullanılarak tatbik edilmiştir. Alt zemin su içeriği arttıkça GKÖ'nün nihai su içeriğinin arttığı ve buna bağlı olarak permittivitenin azaldığı görülmüştür. Yeterli hidrasyonun sağlandığı takdirde, GKÖ'nün hasar alsa dahi düşük geçirgenliğini koruyabildiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: *İnşaat ve yıkıntı atıkları (İYA), geosentetik kil örtü (GKÖ), hidrasyon, hidrolik iletkenlik*

ABSTRACT

Construction and demolition waste (C&DW) is generated in large quantities, particularly following disasters, and is commonly stockpiled at temporary or permanent disposal sites. The lack of adequate engineering measures at these sites, due to the need for emergency response, increases the risk of C&DW leachate generated by precipitation infiltrating groundwater. To mitigate this risk, geosynthetic clay liners (GCLs), owing to their rapid installation and low permeability, are considered a potential barrier material for C&DW disposal sites. However, GCL performance is expected to be significantly affected by mechanical damage caused by C&DW during hydration. In this study, GCLs were placed over subsoils with water contents of 8%, 11%, and 14% and subjected to a C&DW-induced stress of 100 kPa to investigate the damage occurring during hydration. During this process, the water content of the GCLs was monitored. Subsequently, the specimens were placed in a

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

flexible-wall permeameter, and hydraulic conductivity tests were conducted using synthetic leachate representative of C&DW leachate. The final water content of the GCLs increased with increasing subsoil water content, resulting in a decrease in permittivity. The results showed that, once sufficient hydration was achieved, the GCLs maintained low permeability despite mechanical damage.
Keywords: *Construction and demolition waste (C&DW), geosynthetic clay liner (GCL), hydration, hydraulic conductivity*

1. GİRİŞ

6 Şubat 2023 tarihinde Kahramanmaraş merkezli meydana gelen 7,7 ve 7,6 büyüklüğündeki depremler, 11 ili etkileyerek yaklaşık 500.000 binanın yıkılmasına veya ağır hasar görmesine neden olmuştur (Temelli vd., 2023). Bu depremler sonucunda bölgede yaklaşık 100 milyon ton (120 milyon m³) inşaat ve yıkıntı atığı (İYA) oluştuğu tahmin edilmektedir (Presidency of Strategy and Budget, 2023). Arama ve kurtarma çalışmalarının etkin bir şekilde yürütülebilmesi için İYA'nın hızla kaldırılması ve belirlenen uygun geçici depolama alanlarına hızlıca taşınması gerekmektedir. Ancak zaman kısıtı nedeniyle bu alanlarda depolama öncesinde zemin yüzeyine herhangi bir koruyucu bariyer sistemi inşa edilememiştir. Bunun sonucunda milyonlarca ton İYA doğrudan doğal zemin üzerine taşınarak geçici olarak depolanmıştır (Mavroulis vd., 2023).

Geçici depolama alanlarında depolanan İYA içerisinden yağış sularının süzülmesiyle oluşan sızıntı suları, çözünmüş iyonlar, ağır metaller ve organik kirleticiler içerebilmekte ve alt zemin ile yeraltı suyu açısından önemli çevresel riskler oluşturabilmektedir (Diotti vd., 2021). Bu nedenle, sızıntı suyunun alt zemine ve yeraltı suyuna ulaşmasını önlemek amacıyla hızlıca uygulanabilecek etkin bariyer sistemlerine ihtiyaç vardır (Rowe vd., 2004). Bu kapsamda, sıkıştırılmış kil tabakaları, geomembranlar ve geosentetik kil örtüler (GKÖ) gibi farklı bariyer sistemleri kullanılabilmektedir. Ancak sıkıştırılmış kil tabakalarının inşasının zaman alması, geomembranların bindirme bölgelerinde kaynak gerektirmesi ve mekanik hasarlara karşı hassas olmaları, afet sonrası acil uygulamalarda kullanımını sınırlandırmaktadır. GKÖ, bentonitin şişme davranışı sayesinde düşük hidrolik iletkenliğe ve kendini onarma (self-healing) kapasitesine sahip olması GKÖ'lerin İYA depolama alanları için uygun bir malzeme olabileceğini göstermektedir (Koerner, 2005; Özdamar Kul & Ören, 2018). Ayrıca, kolay taşınmaları ve hızlı uygulanmaları nedeniyle afet sonrası uygulamalar için önemli bir bariyer alternatifi oluşturmaktadır.

GKÖ'lerin hidrolik bariyer performansı büyük ölçüde alt zeminden gerçekleşen hidrasyona bağlıdır (Chevrier vd., 2012).Hidrasyon süreci, alt zemin su içeriği, düşey gerilme, birim alan başına bentonit kütlesi ve alt zemin tipi gibi birçok faktörden etkilenmektedir (Rayhani vd., 2011). Bu faktörler arasında alt zemin su içeriği, bentonitin su alımını ve şişme davranışını doğrudan etkileyerek GKÖ'nün hidrolik performansında belirleyici bir rol oynamaktadır.

Afet sonrası İYA depolama alanlarında GKÖ'ler yeterli hidrasyon gerçekleşmeden kısa sürede atık yüklerine maruz kalabilmektedir. İYA içerisindeki düzensiz ve keskin parçalar, GKÖ'de deformasyonlara, hasarlara ve bentonit tabakasında incelmelere neden olarak sızıntı suyunun geçişini kolaylaştıran tercihli akış yolları oluşturabilmektedir. Düşük alt zemin su içeriği bentonitin şişmesini sınırlandırırken, yeterli hidrasyon sağlandığında bentonit hasarlı bölgelere göç ederek akış yollarını kapatabilmekte ve GKÖ'nün düşük geçirgenliğini korumasına katkı sağlamaktadır (Li & Rowe, 2017). Ancak yüksek iyonik güce sahip sızıntı suları bentonitin şişmesini azaltarak bu olumlu etkiyi sınırlandırabilmektedir (Kolstad vd., 2004).

Geçici veya kalıcı İYA depolama alanları mevcut doğal zemin üzerine kurulduğundan, alt zemin su içeriği bölgenin iklimi, mevsimsel koşullar ve zemin özelliklerine bağlı olarak önemli ölçüde değişebilmektedir. GKÖ'nün hidrasyonu alt zeminden sağlanan suya bağlı olduğundan, alt zemin su içeriğinin hidrasyon davranışını doğrudan etkilemesi beklenmektedir (Karakuş vd., 2022). Bu nedenle, farklı alt zemin su içeriklerinin GKÖ'nün hidrasyon davranışı ve hidrolik performansı üzerindeki etkisinin belirlenmesi önem taşımaktadır. Bu nedenle, sunulan çalışmada %8, %11 ve %14 su içeriğine sahip sıkıştırılmış alt zeminler üzerinde, İYA kaynaklı mekanik hasarı temsil eden epoksi başlıklar kullanılarak hidrate edilen GKÖ'lerin hidrasyon davranışı ve sentetik İYA sızıntı suyu altındaki hidrolik performansı araştırılmıştır.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Malzeme

Geosentetik Kil Örtü (GKÖ)

Bu çalışmada, sodyum ile zenginleştirilmiş bentonit içeren, iğneleme yöntemiyle üretilmiş ve yerel bir üreticiden temin edilen bir GKÖ kullanılmıştır. Na-bentonit içeren GKÖ'nün birim alan başına bentonit kütlesi 5,14 kg/m^2–5,9 kg/m^2 arasında değişmektedir. GKÖ'nün başlangıç su içeriği yaklaşık %10'dur. Demir Sürer (2023) tarafından bentonitin likit limitinin %231, plastik limitinin %61 ve buna karşılık gelen plastisite indisinin (PI) %170 olduğu belirlenmiştir (ASTM D4318-17e1, 2017). Bentonitin özgül ağırlığı ASTM D854 − 23 (2023) standardına göre 2,70 olarak belirlenmiştir. Ayrıca, ASTM D5890-25 (2025) standardına göre belirlenen şişme indisi 22,5 mL/2g olup, bentonitin yüksek şişme kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir.

Alt Zemin

Bu çalışmada GKÖ'nün hidrate edildiği alt zemin, Aydın'da bulunan katı atık depolama sahasına komşu bir yamaçtan alınmıştır. Özdamar Kul & Ören (2018) bu zeminin likit limitinin %31 olduğunu, plastiklik göstermediğini ve USCS'ye göre siltli kum (SM) olarak sınıflandırıldığını bildirmiştir. Standart Proctor enerjisi kullanılarak yapılan kompaksiyon deneyine göre zeminin optimum su içeriği %12, maksimum kuru birim hacim ağırlığı ise 19 kN/m^3 olarak belirlenmiştir (ASTM D698-12, 2021).

Sentetik İYA Sızıntı Suyu

Hidrolik iletkenlik deneylerinde, İYA'nın sızıntı suyunu temsil etmesi amacıyla laboratuvar ortamında hazırlanan sentetik bir sızıntı suyu kullanılmıştır. Sentetik çözeltide yer alan bileşenlerin molar konsantrasyonları, daha önce yayımlanmış İYA sızıntı suyu karakterizasyon çalışmalarından derlenmiştir (Butera vd., 2014; Jang & Townsend, 2003). Bu çalışmalar, İYA sızıntı sularında baskın çözünmüş bileşenlerin kalsiyum ve sülfat olduğunu, sodyum, potasyum, magnezyum ve klorürün ise genellikle daha düşük konsantrasyonlarda bulunduğunu göstermektedir. Bu doğrultuda sentetik sızıntı suyunun hazırlanmasında sülfat tuzları tercih edilmiştir. En yüksek molar konsantrasyonda $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ kullanılırken, Na_2SO_4, K_2SO_4, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, $Cr_2(SO_4)_3 \cdot xH_2O$, $PbSO_4$ ve $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ literatürde bildirilen konsantrasyonları temsil edecek şekilde çözeltiye ilave edilmiştir. Hazırlanan sentetik sızıntı suyunun iyonik gücü (I) 96 mM, tek değerlikli ve çift değerlikli katyonların oranı (RMD) ise 0,034 $M^{0,5}$ olarak belirlenmiştir.

2.2. Yöntem

Hidrasyon Deneyleri için İYA'lı Başlıkların Hazırlanması

İYA depolama alanlarına serilen GKÖ'lerde, İYA yükü altında oluşabilecek deformasyonları incelemek amacıyla hidrasyon deney düzeneği hidrasyon sırasında GKÖ üzerine İYA'nın yerleştirilmesinin etkisini temsil edecek şekilde tasarlanmıştır. Hidrasyon süresi boyunca tutarlı ve tekrarlanabilir deformasyonlar elde edebilmek için, İYA kaynaklı hasarın GKÖ yüzeyinde sabit konumlarda uygulanması gerekli görülmüştür. Bu sebeple, İYA parçaları içeren epoksi başlıklar hazırlanmış ve İYA parçalarının konumları deney boyunca sabit kalarak aynı mekanik yüklemeyi ve hasarı oluşturmaları sağlanmıştır.

Kentsel dönüşüm kapsamında yıkılan bir binadan toplanarak laboratuvara getirilen İYA üç farklı dane boyu grubuna ayrılmıştır. Bu gruplar arasından, hidrasyon deneylerinde kullanılan epoksi başlıkların hazırlanmasında 9,5–19,5 mm boyut aralığındaki en büyük dane grubu seçilmiştir. Yüksek düşey gerilmeler altında bütünlüklerini koruyabilmeleri nedeniyle, yalnızca bu boyut aralığındaki beton parçaları kullanılmıştır. İki bileşenli epoksi karışımı için epoksi reçinesi ve sertleştirici 2:1 oranında karıştırılarak hazırlanan karışım, 110 mm çapındaki dairesel kalıplara dökülmüş; seçilen beton parçaları kürlenme tamamlanmadan önce epoksi içerisine yerleştirilmiştir. Laboratuvar koşullarında tamamen sertleşen İYA'lı epoksi başlık, GKÖ üzerinde İYA'nın oluşturabileceği hasarı temsil etmek amacıyla kullanılmıştır (Şekil 1). Bu amaçla, deneylerde kullanılmak üzere aynı yöntemle ve benzer özelliklerde 3 adet İYA'lı epoksi başlık hazırlanmıştır.



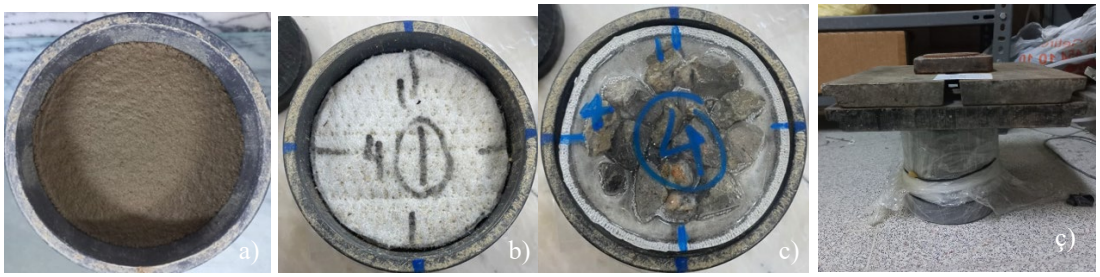
Şekil 1. Hidrasyon deneylerinde kullanılan İYA'lı epoksi başlık

Hidrasyon Deneyleri

Bu çalışmada, farklı alt zemin su içeriklerinin GKÖ'nün hidrasyon davranışı üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla 3 hidrasyon deneyi gerçekleştirilmiştir. Hidrasyon deneylerinde alt zemin, 110 mm çapında ve 127 mm yüksekliğindeki PVC kalıplar içerisinde Standart Proctor enerjisi kullanılarak sıkıştırılmıştır. Deneylerde, optimum su içeriğinin (%12) kuru ve yaş tarafını temsil edecek şekilde %8, %11 ve %14 olmak üzere 3 farklı alt zemin su içeriği seçilmiştir. Alt zemin sıkıştırılırken, kalıp içerisinde gerekli boşluğu oluşturmak amacıyla polioksimetilen (POM) başlık kullanılmıştır. Sıkıştırma işleminin ardından POM başlığı çıkarılmış, GKÖ örgülü yüzeyi alt zemin ile temas edecek şekilde yerleştirilmiş ve

üzerine, GKÖ'nün örgüsüz yüzeyi ile temsil edecek şekilde, İYA kaynaklı hasarı temsil eden epoksi başlık konumlandırılmıştır.

Deney süresince, İYA başlığının GKÖ üzerinde her tartım sonrasında aynı konumda aynı hasarı oluşturmasını sağlamak amacıyla PVC kalıp, GKÖ ve İYA başlığı işaretlenmiş; böylece her tartımın ardından GKÖ ve epoksi başlık aynı şekilde yerleştirilmiştir. Daha sonra, geçici İYA depolama sahalarında oluşabilecek en olumsuz yükleme koşullarını temsil etmek amacıyla numunelere 100 kPa düşey gerilme uygulanmıştır. Bu değer, İYA'nın sahada üst üste depolanmasıyla artan yığın yüksekliğinin GKÖ üzerinde oluşturabileceği yüksek düşey gerilmeler dikkate alınarak belirlenmiştir. Bu yük altında GKÖ'ler yaklaşık 35 gün süreyle hidrate edilmiştir. Hidrasyon süresi boyunca numuneler belirli aralıklarla düzeneğinden çıkarılarak tartılmış, su içerikleri hesaplanmış ve kaydedilmiştir.



Şekil 2. Hidrasyon testi düzeneği: a) sıkıştırılmış alt zemin, b) GKÖ'nün yerleştirilmesi, c) epoksi başlığın yerleştirilmesi ve ç) düşey gerilmenin uygulanması

Hidrolik İletkenlik Deneyleri

Hidrasyon deneylerinin tamamlanmasının ardından GKÖ'ler esnek duvarlı permametreye yerleştirilerek hidrolik iletkenlik deneylerine tabi tutulmuştur. Hidrasyon sırasında GKÖ'lerde oluşan deformasyonun korunabilmesi amacıyla hidrolik iletkenlik deneylerinde, hidrasyon deneylerinde kullanılan aynı epoksi başlık GKÖ'nün üzerine yerleştirilmiştir. Deney sırasında sızıntı suyunun akışına izin vermek için epoksi başlıkta el matkabı yardımıyla delikler açılmıştır. Ayrıca GKÖ'nün alt yüzeyinde oluşan deformasyonun korunması amacıyla alt zeminin üst kısmından yaklaşık 30 mm kalınlığında bir tabaka kesilerek GKÖ'nün altında olacak şekilde permametreye yerleştirilmiştir. Alt zemin, GKÖ ve epoksi başlık, permametrenin alt ve üst başlıkları arasına sırasıyla yerleştirildikten sonra, numune düzeneğinin etrafı bentonit sıvasıyla çevrilmiş ve üzerine lateks membran geçirilmiş ve membran alt ve üst başlıklara O-halkalar yardımıyla tutturulmuştur.

Hidrolik iletkenlik deneyleri sırasında, GKÖ'ye hidrasyon sırasında uygulanan düşey gerilmeyi temsil edecek şekilde 100 kPa hücre basıncı uygulanmıştır. Deneyler (ASTM D5887/D5887M-23, 2023) standardına uygun olarak, düşen seviyeli ve sabit çıkış seviyeli olarak yapılmıştır (Yöntem B). Deneylerde düşen seviye cam büretlerden okunurken, çıkış sıvısı ölçekli mezürlerde sabit seviyeli çıkış altında toplanmıştır. Sentetik İYA sızıntı suyunun akış yönü yukarıdan aşağıya doğru olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında sentetik İYA sızıntı suyu kullanılmıştır.

Eposki başlığın oluşturduğu deformasyon nedeniyle GKÖ kalınlığı numune boyunca değiştiğinden, hidrolik performans sonuçları numune kalınlığına bağlı olarak değişen hidrolik iletkenlik (k, m/s) yerine kalınlıktan bağımsız olarak hesaplanan permittivite (Ψ, s^{-1}) cinsinden değerlendirilmiştir. Dickinson & Brachman (2010), ASTM D5887/D5887M-23 (2023)'e atıfta bulunarak permittivitenin düşen seviyeli deney düzenekleri için de

hesaplanabileceğini göstermiştir. Kendi çalışmalarında düşen giriş seviyesi ve artan çıkış seviyesi için verilen denklem kullanılmıştır (Yöntem C). Bu çalışmada ise ASTM D5887/D5887M-23 (2023)'te verilen denklemlerden düşen giriş seviyesi ve sabit çıkış seviyeli olan ve Denklem 1'de gösterilen denklem kullanılmıştır (Yöntem B):

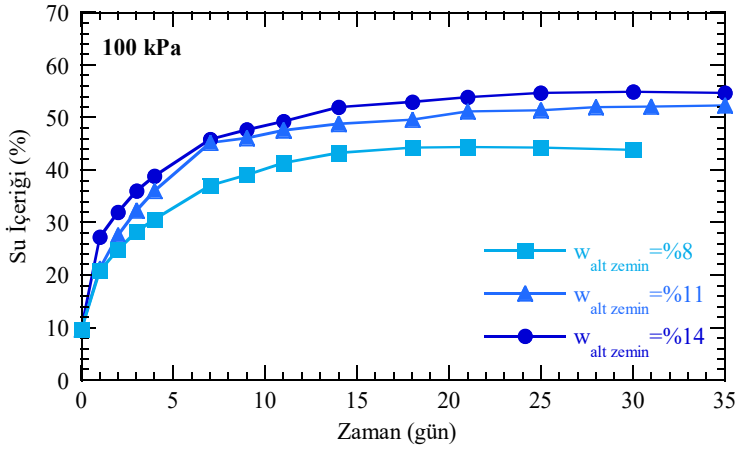
$$\psi = \frac{a}{A\Delta t} \ln \frac{H_t}{H_{t+\Delta t}} \quad (1)$$

Burada ψ permittiviteyi (s^{-1}), a büretin enkesit alanını (m^2), H_t ve $H_{t+\Delta t}$ hidrolik yükü (m) ve A numunenin enkesit alanını (m^2) ifade etmektedir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Hidrasyon Deneyi

Şekil 3'te, %8, %11 ve %14 alt zemin su içeriklerinde 100 kPa düşey gerilme altında hidrate edilen GKÖ'lerin su içeriklerinin zamanla değişimi gösterilmektedir. Tüm numunelerde hidrasyon başlangıçta alt zeminden hızlı su alımıyla başlamış, daha sonra su alma hızı azalmıştır. Bununla birlikte, alt zemin su içeriğinin artması GKÖ'nün nihai su içeriğini önemli ölçüde artırmıştır. Hidrasyon süresi sonunda GKÖ'nün su içeriği, %8, %11 ve %14 alt zemin su içerikleri için sırasıyla yaklaşık %43,8, %52,3 ve %54,6 olarak belirlenmiştir. Bu durum, daha yüksek alt zemin su içeriğinin bentonitin su alımını ve şişmesini artırarak GKÖ'nün daha yüksek bir hidrasyon düzeyine ulaşmasını sağlamasıyla açıklanabilir. Buna karşılık, daha kuru alt zemin koşullarında bentonitin absorbe edeceği su miktarının sınırlı olması nedeniyle GKÖ'nün nihai su içeriği daha düşük kalmıştır.



Şekil 3. Farklı alt zemin su içeriğinde hidrate olan GKÖ'lerin su içeriklerinde zamanla meydana gelen değişimler

Hidrasyon sürecinin tamamlanmasının ardından GKÖ'ler kalıplardan çıkarılmış ve hidrasyon sırasında oluşan deformasyonlar görsel olarak incelenmiştir. Şekil 4'te, %8, %11 ve %14 su içeriğine sahip alt zeminler üzerinde hidrate edilen GKÖ'lerde oluşan deformasyonlar gösterilmektedir. %8 su içeriğine sahip alt zemin üzerinde hidrate edilen GKÖ'de bentonitin sınırlı şişmesi nedeniyle numune daha ince kalmış; İYA parçalarının oluşturduğu deformasyonlar daha sığ ve yüzeysel olmuştur (Şekil 4a). Alt zemin su içeriği %11'e yükseldiğinde bentonitin şişmesi artmış, buna bağlı olarak GKÖ kalınlığı artmış ve deformasyonlar daha belirgin hale gelmiştir (Şekil 4b). En yüksek alt zemin su içeriğine (%14) sahip numunede ise bentonit en yüksek şişmeyi göstermiş, GKÖ kalınlığı daha da

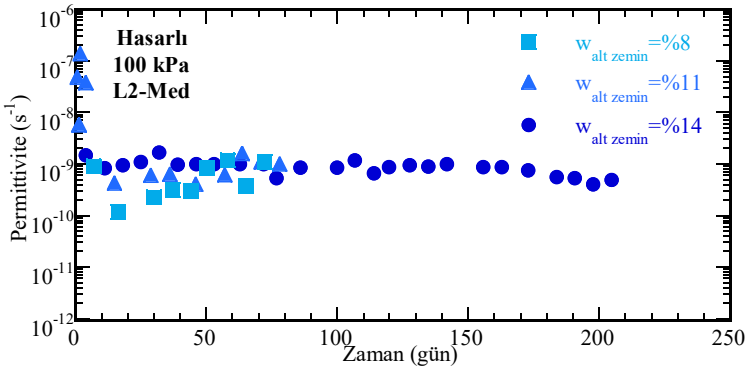
artmış ve İYA parçalarının oluşturduğu deformasyonlar belirgin şekilde derinleşmiştir (Şekil 4c). Ayrıca, İYA parçalarının temas ettiği bölgelerde bentonit tabakasında yer yer incelmeler gözlenmiştir. Daha kuru alt zeminlerde bentonit, İYA parçaları arasındaki boşlukları yeterince dolduracak düzeyde hidrate olamazken; daha yüksek alt zemin su içeriğinde bentonit daha fazla şişerek İYA parçalarının etrafındaki boşluklara doğru yayılmış ve deformasyonların daha belirgin hale gelmesine neden olmuştur.



Şekil 4. Farklı alt zemin su içeriklerinde hidrate olan GKÖ'lerin hidrasyon sonu deformasyonlarının görsel olarak karşılaştırılması: a) %8, b) %11 ve c) %14

3.2. Hidrolik İletkenlik Deneyleri

Hidrasyon deneyleri tamamlandıktan sonra, GKÖ'lerin hidrolik performanslarını belirlemek için hidrolik iletkenlik deneyleri yapılmıştır. Şekil 5'te, farklı alt zemin su içeriklerinde hidrate edilen GKÖ'lerin sentetik İYA sızıntı suyu ile permittivite değişimi gösterilmektedir. %8 alt zemin su içeriğinde hidrate edilen GKÖ'de permittivite başlangıçta daha yüksek olup deney boyunca diğer numunelere göre en yüksek seviyelerde kalmıştır. %11 alt zemin su içeriğinde ise permittivite ilk ölçümlerde belirgin bir düşüş göstermiş, ardından deney süresince daha kararlı bir eğilim sergilemiştir. %14 alt zemin su içeriğinde hidrate edilen GKÖ'de ise permittivite baştan itibaren en düşük seviyelerde seyretmiş ve deney boyunca önemli bir değişim göstermemiştir. Bu durum, daha yüksek alt zemin su içeriğinde bentonitin deney başlangıcında daha yüksek bir hidrasyon düzeyine ulaşması nedeniyle hidrolik performansın kısa sürede kararlı hale geldiğini göstermektedir. Buna karşılık, kuru tarafta hidrate edilen GKÖ'de bentonitin sınırlı hidrasyonu nedeniyle daha yüksek permittivite değerleri korunmuştur.

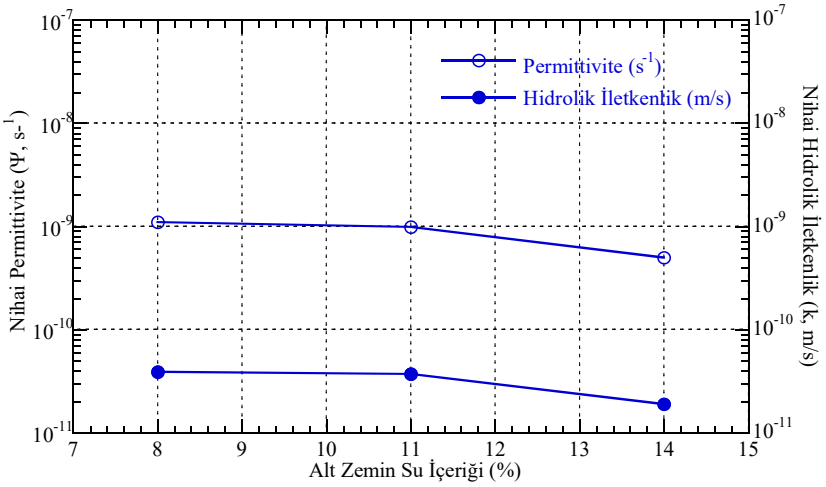


Şekil 5. Farklı alt zemin su içeriklerinde hidrate olan GKÖ'lerin zamana bağlı permittivite davranışları: a) %8, b) %11 ve c) %14

Şekil 6'da deney sonunda elde edilen son permittivite değerleri karşılaştırılmaktadır. Alt zemin su içeriğinin artmasıyla nihai permittivite değerleri oldukça sınırlı bir aralıkta değişmiştir ($5{,}0\times10^{-10}$ s^{-1} – $1{,}1\times10^{-9}$ s^{-1}). En düşük permittivite değeri %14 su içeriğine sahip alt zeminde hidrate edilen GKÖ'de elde edilmiştir ($5{,}0\times10^{-10}$ s^{-1}). Bu sonuçlar, hidrasyon

deneylerinden elde edilen bulgularla uyumludur. Optimum su içeriğinin kuru tarafındaki alt zeminlerde hidrate edilen GKÖ'ler daha düşük hidrasyon seviyesine ulaştığından (w=%43,8), bentonitin şişmesi sınırlı kalmış; buna bağlı olarak nispeten daha yüksek permittivite değerleri ölçülmüştür. Buna karşılık, optimum su içeriğinin yaş tarafındaki alt zeminlerde bentonit daha yüksek düzeyde hidrate olmuş (w=%54,6), İYA parçalarının oluşturduğu boşlukları daha etkin şekilde doldurmuş ve tercihli akış yollarını sınırlandırmıştır. Sonuç olarak, GKÖ'nün hidrolik performansı iyileşmiş ve daha düşük permittivite değerleri elde edilmiştir.

Geoteknik literatüründe bariyer performansının değerlendirilmesinde permittiviteden ziyade hidrolik iletkenlik parametresi kullanılmaktadır. Pek çok ülkenin çevre kurumları bariyerler için izin verilen geçirgenlik değerini 10^{-9} m/s olarak tanımlamıştır. Ancak hidrolik iletkenlik hesaplanırken GKÖ kalınlığının da göz önünde bulundurulması gerekir. Şekil 4'ten de görülebileceği gibi, İYA altında hidrate olmuş GKÖ'lerin hangi kalınlığının alınacağı bir soru işaretidir. Zira İYA'nın temas ettiği noktalarda kalınlık neredeyse sıfıra yaklaşırken, diğer noktalarda basma etkisiyle yana hareket eden bentonit nedeniyle kalınlıklar 10 mm'ye kadar artmaktadır. Bu durumda, kalınlık farklılığından kaynaklanan etkinin ortadan kaldırılması için permittivite ifadesinin kullanılması önerilmektedir. Ancak bariyerler için tanımlanmış izin verilen bir permittivite değeri bulunmadığından, ortalama bir kalınlık hesaplanarak Şekil 6'da 2. y ekseni üzerinde hesaplanan hidrolik iletkenlikler de gösterilmiştir. Şekil 6'dan hidrolik iletkenliklerin tamamının GKÖ'ler için kabul edilen 1×10^{-9} m/s sınır değerinin yaklaşık 50 kat altında olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, yeterli hidrasyon sağlandığında GKÖ'lerin İYA kaynaklı hasar sonrasında bile bariyer performansını koruyabildiğini göstermektedir.



Şekil 6. Alt zemin su içeriğine bağlı olarak GKÖ'lerin nihai permittivite ve hidrolik iletkenlik değerlerindeki değişim

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, %8, %11 ve %14 su içeriğine sahip sıkıştırılmış alt zeminler üzerinde, 100 kPa düşey gerilme altında İYA kaynaklı yerel deformasyona maruz bırakılan GKÖ'lerin hidrasyon davranışı ve sentetik İYA sızıntı suyu ile hidrolik performansı incelenmiştir.

Tüm numunelerde GKÖ su içeriği, hidrasyonun başlangıcında hızlı bir artış göstermiş; ilerleyen sürelerde ise su alma hızı azalmıştır. Hidrasyon sonunda GKÖ su içerikleri: %8,

%11 ve %14 alt zemin su içerikleri için sırasıyla yaklaşık %43,8, %52,3 ve %54,6 olarak belirlenmiştir. Alt zemin su içeriğinin artması, bentonitin daha fazla su almasını ve şişmesini sağlamıştır. %8 su içeriğine sahip alt zeminde bentonitin sınırlı hidrasyonu nedeniyle GKÖ daha ince kalmış ve İYA parçalarının oluşturduğu deformasyonlar daha sığ olmuştur. %11 ve özellikle %14 su içeriğine sahip alt zeminlerde ise artan bentonit şişmesine bağlı olarak GKÖ kalınlığı ve deformasyonların belirginliği artmıştır. %14 su içeriğinde, İYA parçalarının doğrudan temas ettiği bazı bölgelerde bentonit tabakasında yerel incelmeler de gözlenmiştir. Bu sonuç, alt zemin su içeriğinin GKÖ'nün hidrasyonunu doğrudan etkilediğini göstermektedir.

Permittivitenin zamana bağlı değişimi, GKÖ'lerin hidrate olduğu alt zeminin su içeriğine bağlı olarak önemli bir farklılık göstermemiştir. Deney sonunda, tüm permittivite değerlerinin birbirine yakın olduğu ($5{,}0\times10^{-10}$ s^{-1} – $1{,}1\times10^{-9}$ s^{-1}) belirlenmiştir.

Bu bulgular, alt zemin su içeriğinin İYA yükü altında deformasyona uğrayan GKÖ'lerin hem hidrasyon düzeyini hem de deforme olma düzeyini belirleyen bir parametre olduğunu gösterse de hidrolik performanslar üzerinde önemli bir etkisi olmadığını göstermiştir. Bu sonuçlar, GKÖ'nün yeterli hidrasyona uğradığında, İYA kaynaklı hasar sonrasında dahi bariyer performansını koruyabildiğini göstermiştir.

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

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. https://doi.org/10.1520/D0698-12R21

ASTM D854 − 23. (2023). *Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/D0854-23

ASTM D4318-17e1. (2017). *Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/D4318-17E01

ASTM D5887/D5887M-23. (2023). *Test Method for Measurement of Index Flux Through Saturated Geosynthetic Clay Liner Specimens Using a Flexible Wall Permeameter*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/D5887_D5887M-23

ASTM D5890-25. (2025). *Test Method for Swell Index of Clay Mineral Component of Geosynthetic Clay Liners*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/D5890-25

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. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.05.033

Chevrier, B., Cazaux, D., Didier, G., Gamet, M., & Guyonnet, D. (2012). Influence of subgrade, temperature and confining pressure on GCL hydration. *Geotextiles and Geomembranes*, *33*, 1-6. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2012.02.003

Demir Sürer, A. İ. (2023). *Hydraulic Conductivity of Geosynthetic Clay Liners (GCLs) to Coal Combustion and Trona Ash Leachates*. Dokuz Eylül University.

Dickinson, S., & Brachman, R. W. I. (2010). Permeability and internal erosion of a gcl beneath coarse gravel. *Geosynthetics International*, *17*(3), 112-123. https://doi.org/10.1680/gein.2010.17.3.112

Diotti, A., Plizzari, G., & Sorlini, S. (2021). Leaching behaviour of construction and demolition wastes and recycled aggregates: Statistical analysis applied to the release of contaminants. *Applied Sciences (Switzerland)*, *11*(14). https://doi.org/10.3390/app11146265

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.

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. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2021.10.002

Koerner, R. M. . (2005). *Designing with Geosynthetics* (M. J. Horton, E. Svendsen, V. O'Brien, D. A. George, K. Bradley, & G. Dulles, Ed.; Fifth Edition). 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)

Li, T., & Rowe, R. K. (2017, Mart 30). A Preliminary Study of the Self-Healing of a Fully Penetrating Hole in GCLs on Full Hydration. *Geotechnical Frontiers*. https://doi.org/10.1061/9780784480472.03

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*(15). https://doi.org/10.3390/app13158823

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*(4), 436-447. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2018.03.009

Presidency of Strategy and Budget. (2023). *2023 Kahramanmaraş and Hatay Earthquakes Report*.

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. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2011.06.001

Rowe, R. K., Quigley, R. M., Brachman, R. W. I., & Booker, J. R. (2004). *Barrier Systems for Waste Disposal Facilities* (2nd Edition). E & FN Spon.

Temelli, U. E., Sezgin, N., & Özdoğan Cumalı, B. (2023). Determination and Assessment of Construction and Demolition Wastes in Disaster Times: A Case Study of the Kahramanmaras Earthquake. *Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences*, *8*(2), 218-224. https://doi.org/10.35229/jaes.1286631