

Geosentetik Kil Örtülerin Hidrolik İletkenliklerinin Laboratuvarda Belirlenmesi Üzerine Bir Çalışma

Ali Hakan ÖREN¹
Havva DEMİRKIRAN²

ÖZ

Burada sunulan çalışma geosentetik kil örtülerin (GKÖ) hidrolik iletkenlik deneylerinin nasıl yapılacağını ve sonuçların nasıl değerlendirileceğini göstermek üzere hazırlanmıştır. Bu çalışma kapsamında dört farklı GKÖ damıtık (deiyonize) su ve çeşme suyu ile süzdürülerek hidrolik iletkenlik deneyine tabi tutulmuştur. Deneyler altı ay sürdürülmüş ve GKÖ'lerin nihai hidrolik iletkenlikleri 7.1×10^{-10} - 1.4×10^{-9} cm/s arasında ölçülmüştür. Deneylerin sonlandırılması için deney süresi boyunca hidrolik iletkenliklerin dengeye (stabiliteye) ulaşip ulaşmadığı kontrol edilmiştir. Bunun için hidrolik iletkenlik oranı tanımlanmış ve bu oranın 1.5'un altına düştüğü noktada hidrolik dengenin sağlandığı kabul edilmiştir. Ayrıca, süzüntü suyu ile GKÖ tipinin hidrolik iletkenlik üzerine etkisinin sınırlı olduğu bulgulanmıştır. Bu çalışma sonuçları daha sonra literatürde yayımlanan hidrolik iletkenliklerle efektif gerilmenin fonksiyonu olarak karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada elde edilen hidrolik iletkenliklerin literatürle uyumlu olduğu sonucu çıkmıştır.

Anahtar Kelimeler: Atık depolama alanı, bentonit, geosentetik kil örtü, hidrolik iletkenlik.

ABSTRACT

A Study for Determining the Hydraulic Conductivity of Geosynthetic Clay Liners in the Laboratory

This study was prepared to show how to perform the hydraulic conductivity test on geosynthetic clay liners (GCLs) and how to evaluate the results. In the content of this study, four types of GCLs were subjected to hydraulic conductivity tests using deionized water and tap water. The tests lasted six months and the final hydraulic conductivities of GCLs were measured within the range of 7.1×10^{-10} - 1.4×10^{-9} cm/s. To terminate the tests, it was checked to see whether hydraulic stability was achieved or not throughout the test duration. To do this, hydraulic conductivity ratio was defined and it was accepted that the stability was assured when this ratio was reduced below 1.5. Besides, it was found that the effect of permeant water and the GCL types on the hydraulic conductivity were limited. The results of this study were also compared with the hydraulic conductivities that were

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 21.07.2014 günü ulaşmıştır.
- 31 Aralık 2015 gününe kadar tartışmaya açıktır.

1 Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - ali.oren@deu.edu.tr

2 Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir - havva.demirkiran@hotmail.com

reported in the literature as a function of effective stress. It is concluded that the findings of this study are in agreement with those in the literature.

Keywords: Waste disposal area, bentonite, geosynthetic clay liner, hydraulic conductivity

1. GİRİŞ

Geosentetik Kil Örtüler (GKÖ), iki geotekstil arasına sodyum bentonit yerleştirildikten sonra ekseriyetle iğnelenmek suretiyle imal edilen, düşük geçirgenliğe sahip sentetik malzemelerdir. Bu malzemeler sızdırmazlık için kullanıldığından alt ve üst geotekstil arasına sodyumca zengin bentonit serilerek imal edilir. Na-bentonit, yüksek su tutma ve şişme kapasitesi sebebiyle GKÖ'nün düşük hidrolik iletkenliğe sahip olmasını sağlar. Bu nedenle bentonitin mineral yapısının ve fiziko-kimyasal özelliklerinin GKÖ'nün hidrolik iletkenlik davranışı üzerinde önemli etkisi bulunmaktadır. Son yıllarda ise Na-bentonit, polimer katkılarla birlikte işlenerek kimyasal etkilere daha dirençli GKÖ'ler üretilmeye başlanmıştır [1,2].

GKÖ'ler daha çok geçirimsizliğin gerekli olduğu gölet tabanlarında, maden işletmelerinin atık havuzlarında, kanal yataklarında ve daha pek çok alanda kullanılır. Fakat en yaygın kullanım alanı, kirliliği önleyici bariyer görevi görmesi bakımından, deponi sahalarıdır (atık depolama alanları) [3, 4, 5].

Atık depolama alanı temel bileşenlerinden olan geçirimsiz tabakanın inşasında sıkıştırılmış killerin kullanılması oldukça yaygın bir uygulamadır. Deponi sahalarında sıkıştırılmış kil tabakası kalınlığının genellikle 0.6 m ile 1.0 m arasında değiştiği göz önüne alınırsa, büyük miktarda kilin nakliyesi, serilmesi ve sıkıştırılması gerekmektedir. Bu, oldukça zahmetli ve pahalı bir işlemdir. Buna ilave olarak tüm alan boyunca homojen bir sıkıştırma sağlamanın zorluğu ve yapım sonrası aşamada çevresel etkilerden dolayı sıkıştırılmış killerde görülen çatlakların bariyerin geçirgenliğini (hidrolik iletkenliğini) artırıcı etkisinin bulunması nedeniyle bu uygulama yerini son yıllarda GKÖ'lere bırakmıştır. Sıkıştırılmış killere göre hidrolik iletkenlik değerleri düşük, uygulaması pratik, işçilik maliyetleri az olduğu için GKÖ'ler tüm dünyada tercih sebebidir. Fakat bu malzemeler daha önce ithal edildiğinden, Türkiye'de atık depolama alanları genellikle sıkıştırılmış killer ile inşa edilmiştir. GKÖ'lerin ülkemizde de başarı ile üretilmeye başlanmasıyla, bu malzemenin kullanımı da yaygınlaşmaya başlamıştır.

GKÖ'ler geçirimsizliğin gerekli olduğu hallerde kullanıldığından bu malzemelerin hidrolik iletkenliklerinin laboratuvarında belirlenmesi kritik önemdedir. Bu gibi kompozit (geotekstil ve bentonitin bir arada olduğu durum) yapıdaki malzemelerin deneyleri yapılırken dikkat edilmesi gereken hususlar vardır. Özellikle numunenin hazırlanmasında ve permatre hücre sine yerleştirilmesinde operatörün etkisi büyüktür. Bu nedenle hidrolik iletkenlik deneylerinde birbirinden çok farklı sonuçların elde edilmesi kaçınılmazdır. Burada sunulan çalışma, GKÖ'lerin hidrolik iletkenlikleri ile ilgili Türkiye'de yürütülen ilk çalışmalardan biri olmakla birlikte numune hazırlama, deney koşullarının belirlenmesi, deneyin yürütülmesi ve sonuçlandırılması ile ilgili detaylı bilgi sunmaktadır. Türkiye'de numune hazırlama ve deney durumu ile ilgili çok az bilgi paylaşıldığı, çok kısa süreler içinde deneylerin tamamlanarak hidrolik iletkenlik değerlerinin raporlandığı göz önüne alınırsa, sunulan çalışmanın bu işlemlerle ilgilenen mühendislere yardımcı olacağı beklenmektedir.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Malzemeler

Bu çalışma kapsamında yapılan hidrolik iletkenlik deneylerinde dört farklı GKÖ kullanılmıştır. Bu GKÖ'ler aynı tipte olup alt kısmında örgülü geotekstil, üst kısmında ise örgüsüz geotekstil kullanılarak iğnelenmek suretiyle imal edilmişlerdir. GKÖ'lerden üçü yerli üretim (GKÖ-1, GKÖ-2 ve GKÖ-4), biri de ithal ürün olarak (GKÖ-3) deneylerde kullanılmıştır. Yerli olanlardan GKÖ-4 polimer katkılı olarak üretilmiştir.

Polimer katkılı GKÖ'nün üretim detayları ilgili firma tarafından paylaşılmamıştır. Bu nedenle bentonitle birlikte ne tür bir polimer katkı kullanıldığı bilinmemektedir. GKÖ'lerin fiziko-kimyasal ve mineralojik özellikleri Çizelge 1'de sunulmuştur.

Çizelge 1. GKÖ'lerin fiziko-kimyasal ve mineralojik özellikleri

GKÖ	Kil İçeriği (%)	Kıvam Limitleri		ÖZA* (m ² /g)	KDK* (meq/100g)	Mineraloji
		w _L	I _p			
GKÖ-1	57	108	48	670	75.7	Smektit, kristobalit
GKÖ-2	67	310	284	592	79.5	Smektit, kuvars
GKÖ-3	72	320	290	538	80.0	Smektit, kuvars
GKÖ-4	25	1163	1111	891	78.9	Smektit, kuvars

*: ÖZA: Özgül Yüzey Alan, KDK: Katyon Değişim Kapasitesi

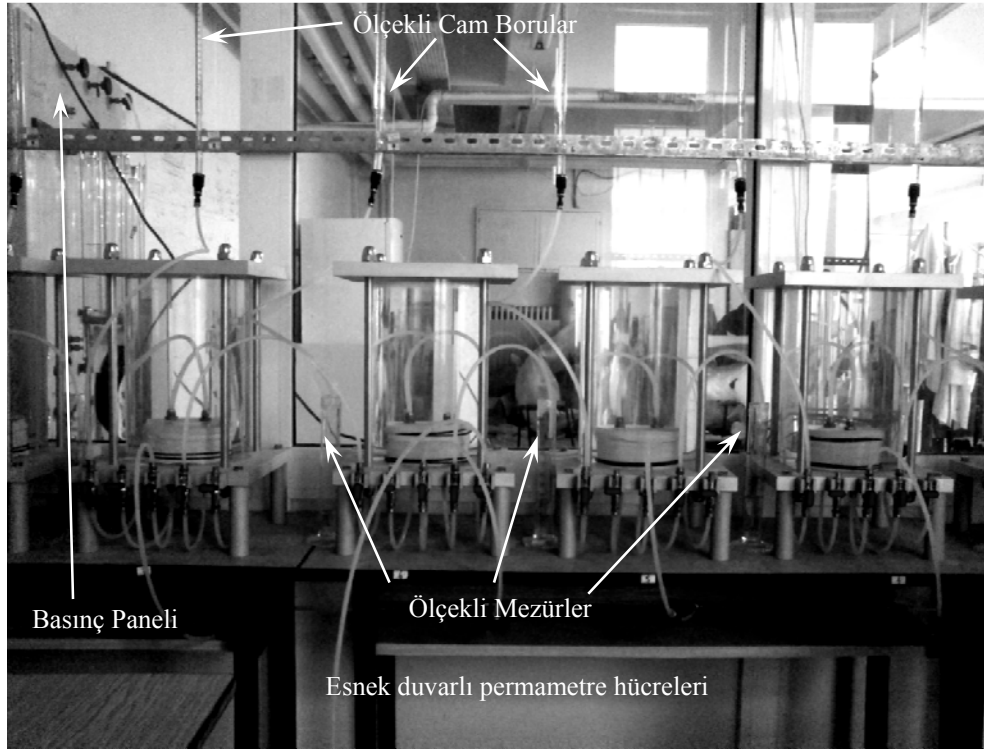
Çizelge 1'de gösterilen kil içerikleri GKÖ içindeki bentonitlerin dane çapı dağılım grafiklerinden belirlenmiştir. Buna göre kil içeriklerine bakıldığında, polimer katkılı GKÖ-4'ün %25, diğerlerinin de %57 ile %78 arasında değiştiği görülebilir. Polimer katkı dolayısıyla GKÖ-4'ün bentoniti hidrometri analizinde hızlı çökelmiştir. Çökelmenin polimer katkıdan kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu nedenle numunenin kil içeriği %25 olarak belirlenmiştir. GKÖ-4'ün likit limit değeri diğer bentonitlere kıyasla oldukça yüksektir (%1163). Casagrande deney aleti ile yapılan likit limit deneyi sırasında bu numunenin süngerimsi bir yapıya büründüğü ve fazla miktarda suyu bünyesine hapsettiği gözlenmiştir. Bu nedenle GKÖ-4'ün likit limiti ve plastisite indeksi değeri diğer GKÖ'lere göre daha yüksek bulunmuştur.

Özgül yüzey alanlar (ÖZA) incelendiğinde ise GKÖ'lerin 538 ile 891 m²/g arasında değerlere sahip olduğu ve en yüksek değer yine GKÖ-4'e ait olduğu Çizelge 1'den görülebilir. Fakat katyon değişim kapasiteleri (KDK) kıyaslandığında GKÖ'ler arasındaki farklar birbirine oldukça yakındır ve KDK'lerin 75.7 ile 80 meq/100g arasında olduğu bulunmuştur.

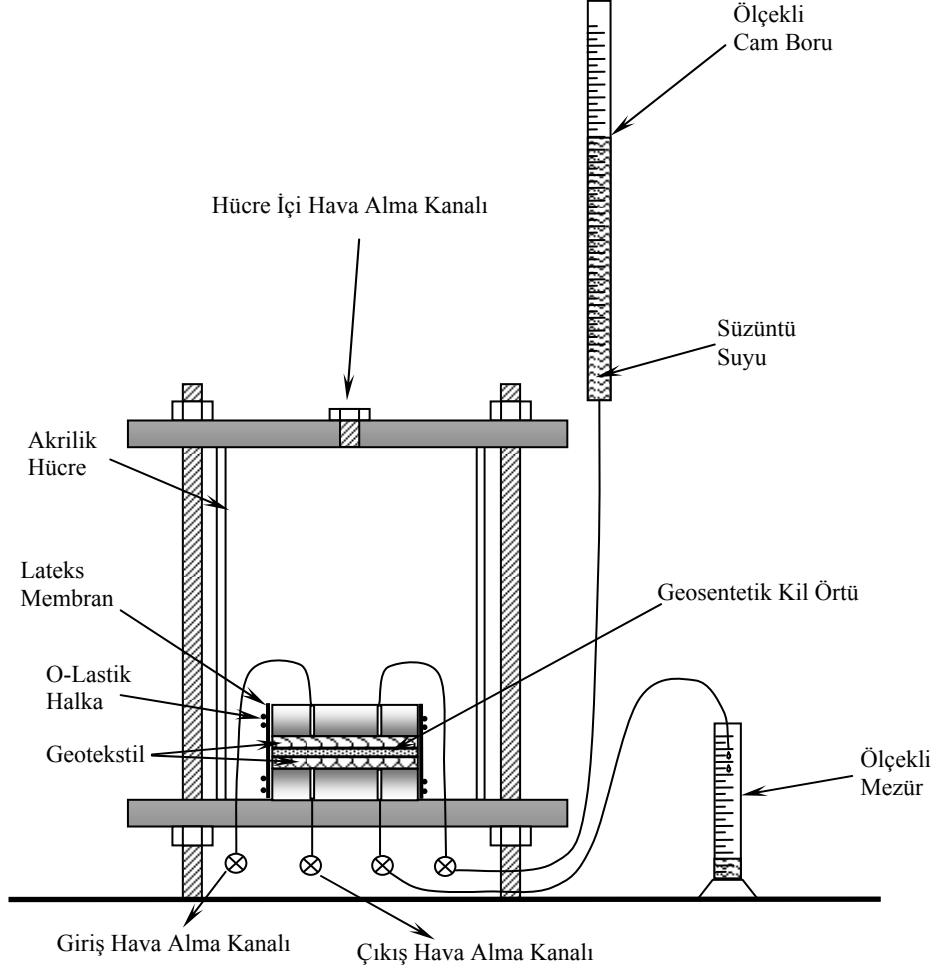
Diğer yanda GKÖ'lerin XRD analizleri yapılarak bentonit içerisindeki mineraller belirlenmeye çalışılmıştır. Buna göre bütün GKÖ'lerde ana mineral smektit, ikincil mineraller GKÖ-1'de kristobalit, diğerlerinde ise kuvarstır (Çizelge 1). Niceliksel olarak

bakıldığında GKÖ'lerin %64 ile %68 arasında değişen oranlarda smektit ihtiva ettiği bulgulanmıştır. Çizelge 1'de bahsedilen deneyler hakkında detaylı bilgi Demirkıran'da [6] verilmektedir.

Hidrolik iletkenlik deneyleri, düşen seviyeli yöntemde esnek duvarlı permametre hücreleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Permametre hücreleri 10cm çapında tasarlanmış olup imalatlar İzmir'de gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Zemin Mekaniği Laboratuvarı'na kurulmuştur. Deneylerde hücre basınçları hava kompresörüne bağlı basınç paneli vasıtasıyla sağlanmıştır. Pannelle permametre hücreleri arasında bağlantı için yüksek basınca dayanıklı vanalar ve "T" bağlantılar kullanılmıştır. Deney sisteminde sıvı akışı ölçekli cam borular içine doldurulan su ile sağlanmıştır (Şekil 1). Ölçekli cam borular yüksekliği ayarlanabilir metal çerçeve üzerine oturtulmuştur. GKÖ'lerden sızan su, permametre hücrelerinin çıkış vanasına bağlı hortum ile ölçekli mezürler içine toplanmıştır (Şekil 1 ve Şekil 2). Buharlaşmayı önlemek için her mezürün ağzı özel bir film tabakası ile (parafilm) kapatılmıştır. Laboratuvara kurulan deney düzeneğinin bir bölümü Şekil 1'de, esnek duvarlı permametre'nin şematik temsili de Şekil 2'te gösterilmiştir. Deney sistemi ile ilgili daha detaylı bilgi Ören vd.'nden [7] takip edilebilir.



Şekil 1. Laboratuvara kurulan hidrolik iletkenlik deney düzeneği.



Şekil 2. Esnek duvarlı permametre hücresinin şematik gösterimi.

2.2 Yöntemler

Hidrolik iletkenlik Deneyi için Numune Hazırlama

Deney numuneleri hazırlanırken önce her bir GKÖ rulosundan 20×20cm'lik örnek kesilmiştir. Daha sonra bu kare örneğin orta kısmına 10cm çapında daire çizilmiştir. Çizilen daire hattı pisetle bir miktar ıslatılarak bentonitin bu hat üzerinde şişmesi sağlanmıştır. Böylece kesme sırasında GKÖ çevresinden bentonitin dökülmesi önlenmiş ve GKÖ'deki bentonit kaybı en aza indirilmiştir. Takip eden aşamada keskin uçlu maket bıçağı ile dairesel GKÖ numunesi kesilmiştir. Kesilen her GKÖ numunesinin çapı ve kalınlığı birkaç noktadan kumpas yardımıyla ölçüldükten sonra numune permametre hücresine yerleştirilmiştir. Her GKÖ numunesinin altına ve üstüne poröz taş yerine iki

örgüsüz geotekstil konmuştur. Kenardan sızmayı önlemek için numunelerin kenarları bentonitle kapatılmış (sıvanmış) ve üzerine lateks membran ve O-halkalar geçirilmiştir. Numune hazırlama ile ilgili daha detaylı bilgiye Ören vd.'nden [7] ve Demirkıran vd.'nden [8] ulaşılabilir.

Hidrolik İletkenlik Deneyleri

Hidrolik iletkenlik deneylerinde numunelere 100 kPa hücre basıncı uygulanmıştır. Bu değer GKÖ'nün atık depolama alanlarında maruz kalabileceği ortalama bir gerilme değeridir. GKÖ'lerin hidrolik iletkenlikleri belirlenirken geri basınç uygulamaya gerek yoktur [9]. Bu nedenle deneylerde geri basınç uygulanmamış ve hücre çıkış ağzındaki hortumlar atmosfere açık bırakılmıştır. Bu düzenek altında herhangi bir anda GKÖ'ye etki eden ortalama efektif gerilme (σ'_{ort}) Denklem (1) ile hesaplanabilir:

$$\sigma'_{ort} = \sigma_{hücre} - \left(\frac{\sigma_g + \sigma_\phi}{2} \right) \quad (1)$$

Burada $\sigma_{hücre}$ hücre basıncını, σ_g hücre girişine bağlı ölçekli cam borudaki su basıncını, σ_ϕ da çıkış ağzındaki basıncı göstermektedir. Bu durumda çıkış ağzı atmosfere açık olduğu için bu noktadaki basınç sıfırdır. Bu çalışmada 100 kPa hücre basıncı altında deney sonucu σ'_{ort} 'lar yaklaşık 90 kPa olarak hesaplanmıştır.

Hidrolik iletkenlik deneylerinde hidrolik eğimin (i) belirlenmesi kurulan deney düzeneğinin geçerliliğinin sınanması açısından önemlidir. Deponi sahalarında hidrolik eğimin 1-5 arasında olduğu bilinmektedir. Fakat laboratuvarında düşük hidrolik eğim değerlerinin kullanılması deney süresini uzatacağından pratik değildir. Daha yüksek eğimler ise sızma basıncından dolayı numune içindeki ince danelerin hareketine sebep olabileceğinden akış kanallarının (boşlukların) tıkanmasına veya tam tersi iri daneler arasında var olan ince danelerin yıkanmasına (erozyona uğramasına) sebep olabilir. Bu da sağlıklı sonuç alınmasını engeller. Bu nedenle özellikle kil ihtiva eden zeminlerde hidrolik eğimin en fazla 30 olması tavsiye edilir [10]. Esnek duvarlı permametreler kullanıldığında hidrolik eğim hesabı Denklem (2) vasıtası ile yapılabilir:

$$i = \frac{\sigma_g - \sigma_\phi}{\gamma_{su} H_{GKÖ}} \quad (2)$$

Bu denklemde γ_{su} suyun birim hacim ağırlığını, $H_{GKÖ}$ de GKÖ yüksekliğini vermektedir.

Bu çalışmada elde edilen ortalama hidrolik eğim yaklaşık 200'dür. Bunun temel sebebi GKÖ kalınlığının (0.5cm) sıkıştırılmış kil tabakalara göre oldukça düşük olmasıdır. Bu nedenle hidrolik eğim değeri ASTM D5084'te [10] belirtilen değerden yüksektir; ancak, Shackelford vd. [9] GKÖ'ler üzerinde yaptıkları çalışmada hidrolik eğimin hidrolik

iletkenlik üzerine etkisinin sınırlı olduğunu ortaya koymuşlardır. Zira deneylerde tatbik edilen hidrolik eğim değerleri de literatürle uyumludur.

Hidrolik iletkenlik deneylerinde damıtık (deiyonize) su ve Buca-İzmir içme suyu şebekesinden alınan çeşme suyu kullanılmıştır. GKÖ'ler önce 48 saat hidrasyona (bünyelerine su almaya) bırakılmışlardır. Bunun için ölçekli cam boruların bağlı olduğu vanalar açık bırakılmış, hücrelerin çıkış ağzına bağlı vanalar kapalı tutularak GKÖ içinden akış oluşmayacak şekilde örneklerin ıslanması sağlanmıştır. 48 saat sonunda çıkış vanaları açılarak GKÖ içinden akış başlatılmıştır. Akış, yukarıdan aşağıya olacak şekilde deneyler gerçekleştirilmiştir.

Hidrolik iletkenlikler, zaman içinde ölçekli cam borular içindeki su seviyelerinde meydana gelen değişimler kaydedilerek Denklem (3)'le hesaplanmıştır:

$$k = \frac{a \times H_{GKÖ}}{A \times \Delta t} \times \ln \frac{h_0}{h_1} \quad (3)$$

Burada k permabilite katsayısını, a ölçekli cam boru enkesit alanını, A GKÖ enkesit alanını, Δt iki okuma arasında geçen zamanı, h_0 ve h_1 ölçekli cam borudaki su seviyesinin referans düzlemine olan ilk ve son yüksekliğini temsil etmektedir.

Hidrolik iletkenlik deney sonuçları GKÖ içindeki boşluk hacimleri dikkate alınarak “boşluk hacmi cinsinden akış miktarı (BHCAM)” ile ifade edilmiştir. Deney sırasında numune içinden geçen hacim cinsinden su miktarı, GKÖ boşluk hacmine oranlanarak belirlenmiş ve bu değerler eklenik biçimde toplanarak hidrolik iletkenlik sonuçları değerlendirilmiştir. GKÖ'lerin boşluk hacimleri Denklem (4) ile aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır [11]:

$$V_v = H_v \times A = (H_{GKÖ} - H_s) \times A = [H_{GKÖ} - (H_{bentonit} + H_{geotekstil})] \times A = \left[H_{GKÖ} - \left(\frac{M_{bentonit}}{\rho_{bentonit} \times (1+w)} + \frac{M_{geotekstil}}{\rho_{geotekstil}} \right) \right] \times A \quad (4)$$

Burada V_v boşluk hacmini, H_v boşlukların yüksekliğini, H_s GKÖ içindeki katı kısmın yüksekliğini, $H_{bentonit}$ bentonit partiküllerinin yüksekliğini, $H_{geotekstil}$ GKÖ'de kullanılan geotekstillerin yüksekliğini, $M_{bentonit}$ ve $M_{geotekstil}$ sırasıyla birim alana gelen bentonit ve geotekstil kütlelerini, $\rho_{bentonit}$ bentonit partiküllerinin yoğunluğunu, $\rho_{geotekstil}$ geotekstillerin yoğunluğunu (0.91 Mg/m^3 olarak alınmıştır, [11]), w de bentonit su içeriğini temsil etmektedir. Buna göre GKÖ'lerin boşluk hacmi yaklaşık 30cm^3 olarak hesaplanmış ve sonuçlar buna göre değerlendirilmiştir.

Hidrolik iletkenlik deneylerinde hem GKÖ içine giren su miktarı ($Q_{giriş}$) hem de numune içinden geçen su miktarı ($Q_{çıkış}$) belirlenmiştir. Bu değerler fiziksel dengenin ($Q_{çıkış}/Q_{giriş}$) kontrolünde kullanılmıştır. ASTM D5084'te [10] bu oran için izin verilen sınır değerler 1.0 ± 0.25 ile ifade edilmiştir. Bir başka deyişle hidrolik iletkenlik deneyi boyunca $Q_{çıkış}/Q_{giriş}$ değerleri 0.75 ile 1.25 arasında olmalıdır. Bu nedenle deneylerde fiziksel

dengenin sağlanıp sağlanmadığının kontrolü için $Q_{\text{çıkış}}/Q_{\text{giriş}}$ 'ler deney süresi boyunca izlenmiş ve bu oranlar boşluk hacmi cinsinden akış miktarının (BHCAM) fonksiyonu olarak çizdirilmiştir. Fiziksel dengenin yanında deneylerin sonlandırılabilmesi için hidrolik dengenin de sağlanmış olması gerekir. Bunun için son dört hidrolik iletkenlik değeri arasındaki farkın 1.0 ± 0.25 olması gerektiği ASTM D5084'te [10] tanımlanmıştır.

Hidrolik iletkenlik deneyleri yaklaşık 6 ay sürdürülmüştür. Bu süre sonunda permametre hücreleri açılarak GKÖ'lerin yükseklikleri ölçülmüş, iğnelenmiş haldeki örgülü ve örgüsüz geotekstiller birbirinden ayrılarak GKÖ içindeki bentonit bir spatula yardımıyla alınmıştır. Daha sonra ıslak bentonit etüvde kurularak bentonitin su içeriği belirlenmiştir.

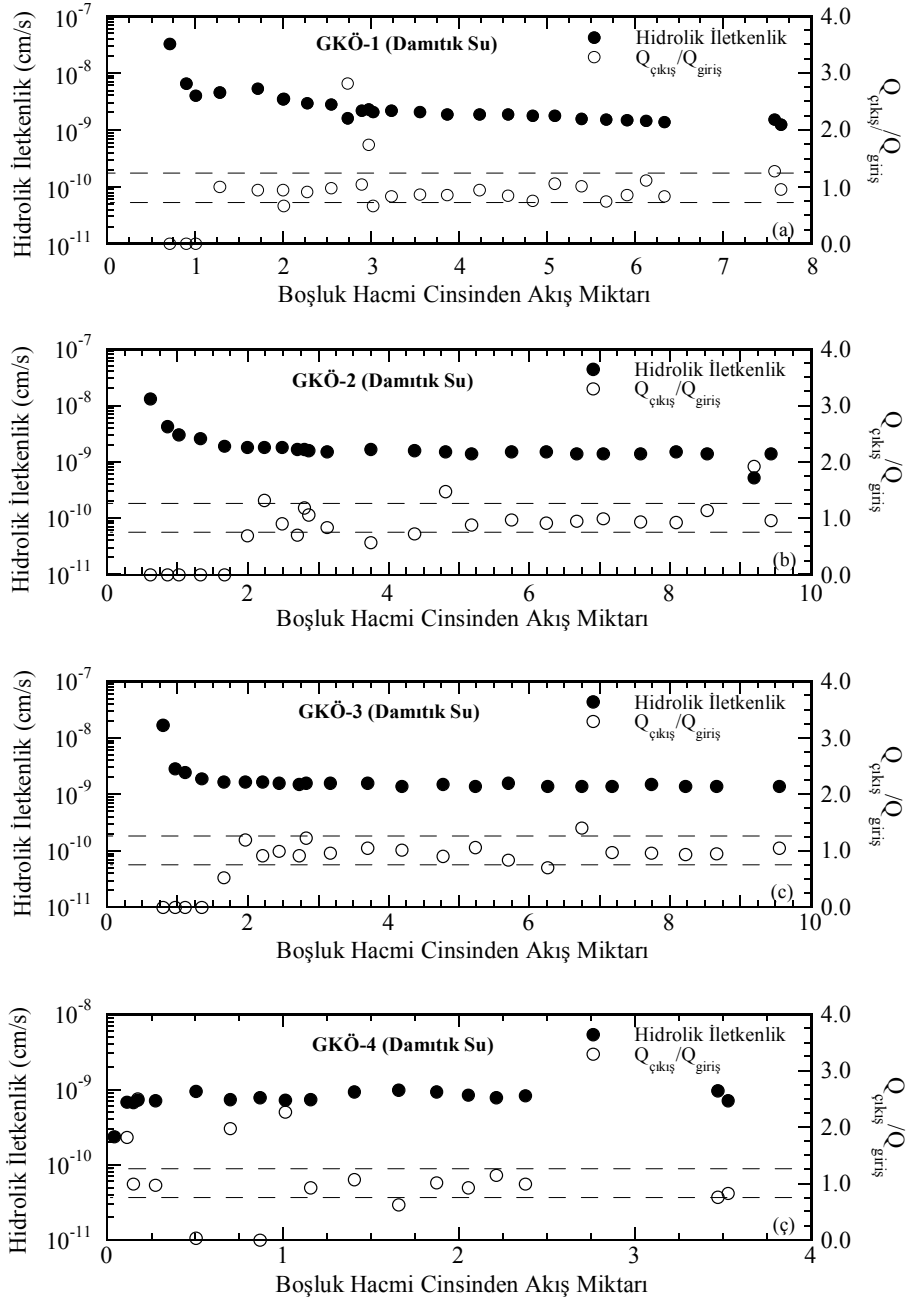
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Hidrolik İletkenlik Deney Sonuçları

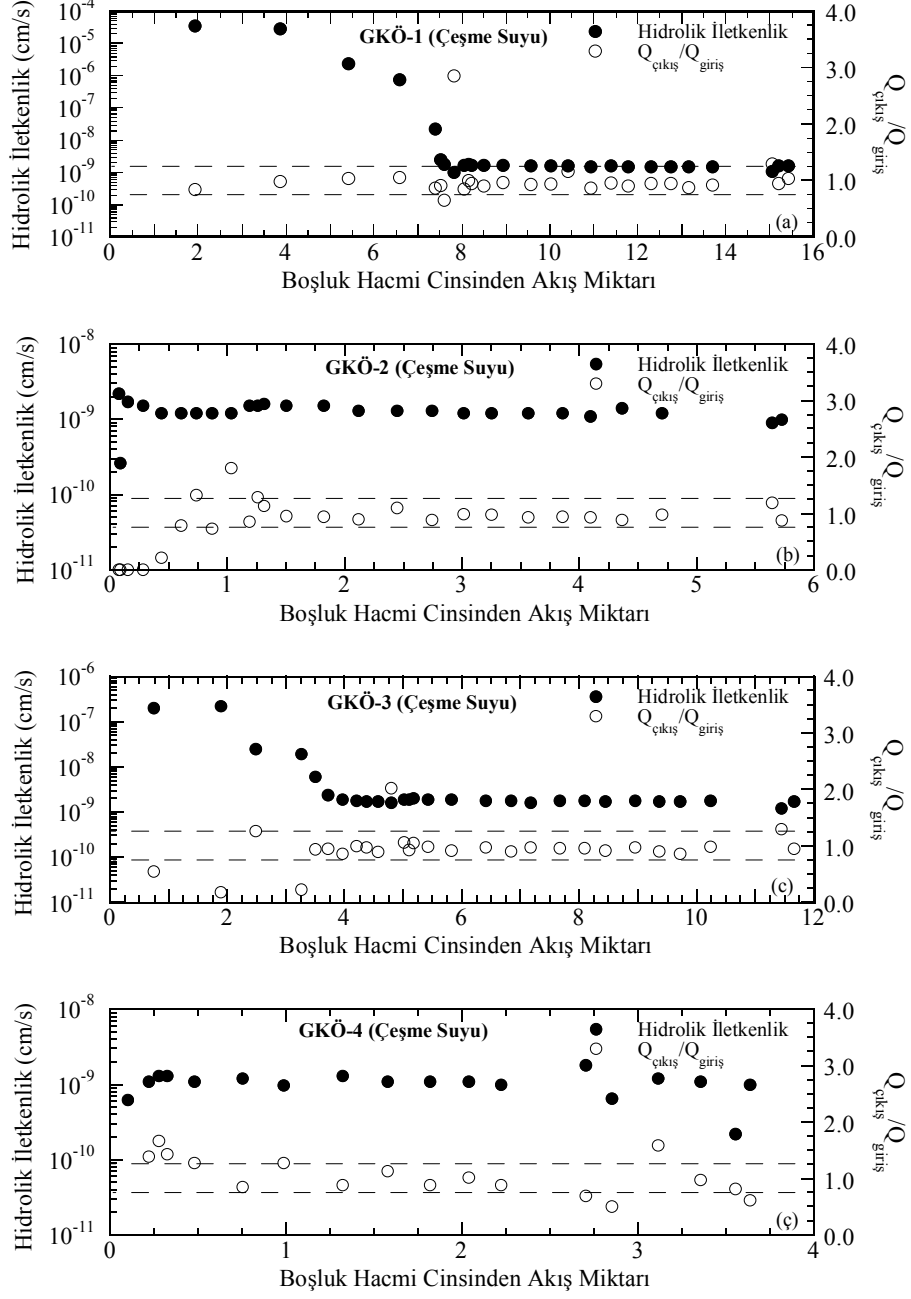
Damıtık su ve çeşme suyu kullanılarak yapılan deneyler sonucunda elde edilen hidrolik iletkenlik davranışları sırasıyla Şekil 3 ve Şekil 4'te gösterilmektedir. Deneylerdeki fiziksel denge durumunu gösteren $Q_{\text{çıkış}}/Q_{\text{giriş}}$ grafiklerde ikincil y-eksenine yerleştirilmiştir. Yine bu grafiklerde gösterilen kesikli çizgiler ise fiziksel denge için gerekli olan 1.0 ± 0.25 sınır şartlarını temsil etmektedir.

Damıtık suyun süzdürme sıvısı olarak kullanıldığı durumda, GKÖ-1'in hidrolik iletkenliği deney başında 3.3×10^{-8} cm/s iken bu değer zamanla azalarak yaklaşık 8 BHCAM'de 1.2×10^{-9} cm/s'ye ulaşmıştır. Şekil 3a'dan da görülebileceği gibi fiziksel denge ($Q_{\text{çıkış}}/Q_{\text{giriş}}$) 1.25 BHCAM'de sağlanmasına rağmen, hidrolik iletkenlikler ancak 5.5 BHCAM'de sabit değerlere ulaşabilmiştir. Hidrolik iletkenlikteki benzer azalma GKÖ-2 ve GKÖ-3 için de elde edilmiştir (Şekil 3b-c). GKÖ-2 ve GKÖ-3 için hidrolik iletkenlik deneyleri 10 BHCAM'ye kadar devam ettirilmiş ve hem fiziksel dengeye hem de sabit hidrolik iletkenlik değerlerine GKÖ-1'e göre daha erken ulaşılmıştır (yaklaşık 2 BHCAM'de). GKÖ-4'ün hidrolik iletkenlik davranışı ise önceki üç GKÖ'nün tam tersi şekilde bulgulanmıştır (Şekil 3ç). Deney başında 2.4×10^{-10} cm/s olarak ölçülen hidrolik iletkenlikler, deney sonunda üç katlık artışla 7.1×10^{-10} cm/s olarak belirlenmiştir.

GKÖ-1'in çeşme suyu ile elde edilen hidrolik iletkenlik davranışı damıtık su kullanıldığı duruma benzer şekilde gerçekleşmiş ve deney başında hidrolik iletkenlik 3.6×10^{-5} cm/s olarak ölçülmüştür (Şekil 4a). Sonra hidrolik iletkenlik azalmaya başlamış ve yaklaşık 8.0 BHCAM'de 1.7×10^{-10} cm/s değerine ulaşmıştır. Bu noktadan deney tamamlanmaya kadar geçen sürede hidrolik iletkenliklerde ve $Q_{\text{çıkış}}/Q_{\text{giriş}}$ 'lerde değişim gözlenmemiştir (Şekil 4a). GKÖ-2 ile yapılan deneyde ise fiziksel dengeye ancak 1.5 BHCAM'de ulaşılrken (Şekil 4b), hidrolik iletkenlikler deney başından sonuna kadar düşük değerlerde seyretmiştir ($\approx 1.0 \times 10^{-9}$ cm/s). GKÖ-3'ün çeşme suyu ile süzdürüldüğü durumda elde edilen hidrolik iletkenlik davranışı GKÖ-1'in sergilediği davranışa benzemektedir. GKÖ-4'ün hidrolik iletkenliği ise deney başında 6.2×10^{-10} cm/s iken deney sonunda 1.0×10^{-9} cm/s ölçülmüştür (Şekil 4ç). Hidrolik iletkenlikteki bu artış daha önce GKÖ-4 için elde edilen ve Şekil 3ç'de gösterilen damıtık suyun kullanıldığı durumla hemen hemen aynıdır.



Şekil 3. Geosentetik kil örtüler üzerinde damıtık su ile yapılan hidrolik iletkenlik deney sonuçları: a) Geosentetik Kil Örtü-1 (GKÖ-1), b) Geosentetik Kil Örtü-2 (GKÖ-2), c) Geosentetik Kil Örtü-3 (GKÖ-3), ç) Geosentetik Kil Örtü-4 (GKÖ-4).



Şekil 4. Geosentetik kil örtüler üzerinde çeşme suyu ile yapılan hidrolik iletkenlik deney sonuçları: a) Geosentetik Kil Örtü-1 (GKÖ-1), b) Geosentetik Kil Örtü-2 (GKÖ-2), c) Geosentetik Kil Örtü-3 (GKÖ-3), ç) Geosentetik Kil Örtü-4 (GKÖ-4).

Deneilerin Sonlandırılması

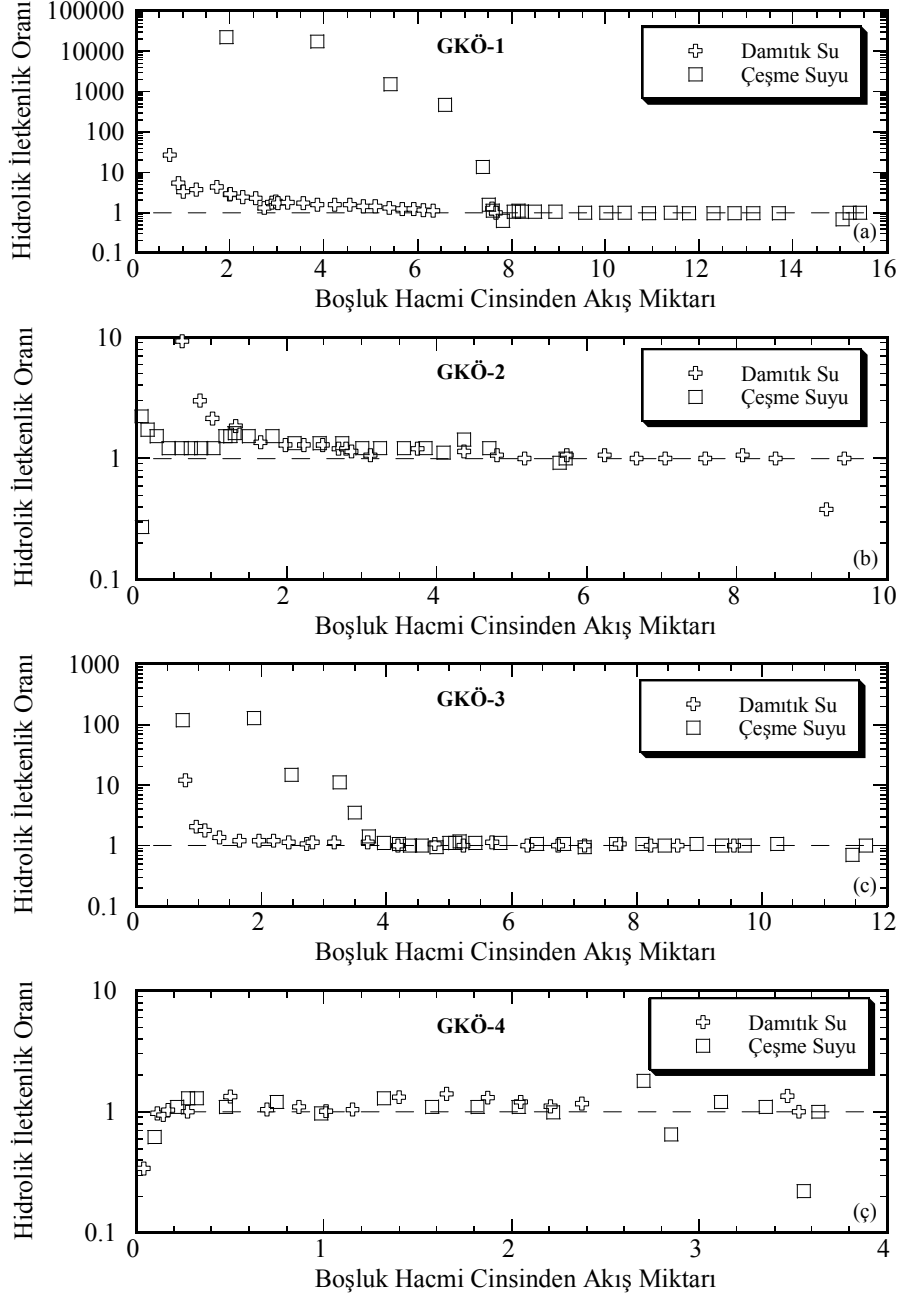
Fiziksel ve hidrolik denge sağlandıktan sonra bir süre daha deneylerin devam ettirilmesi gerekir. Uzun dönemde hidrolik iletkenlikte meydana gelebilecek olası bir değişim (artış ya da azalış) ancak bu şekilde gözlemlenebilir. ASTM D7100-11 [12] deneylerin en az 2 BHCAM'ye kadar sürdürülmesini gerektiğini söyler. Fakat esas olan, bu sürenin her bir numune için farklı olabileceğini göz önünde tutmaktır. Mesela, Şekil 3 ve Şekil 4'te gösterilen hidrolik iletkenlik değerlerinin, GKÖ tipine bağlı olarak, farklı BHCAM'lerde hidrolik dengeye ulaştığı görülmektedir. Bunu daha iyi ifade edebilmek için GKÖ'lerin nihai (deney sonu) hidrolik iletkenlikleri (Çizelge 2) deney süresi boyunca elde edilen hidrolik iletkenliklere bölünerek "hidrolik iletkenlik oranları" elde edilmiştir. Bu oranlama (normalizasyon) neticesinde hidrolik iletkenlikte dengeye hangi noktada ulaşıldığı belirlenerek deneyin devam ettirilmesine veya tamamlanmasına karar verilmiştir.

Çizelge 2. GKÖ'lerin nihai hidrolik iletkenlikleri ile yükseklik ve su içeriği değerleri.

GKÖ	Süzdürme Sıvısı*	GKÖ Yüksekliği (cm)		Su İçeriği (%)		Hidrolik İletkenlik (cm/s)
		H _{ilk}	H _{son}	W _{ilk}	W _{son}	
GKÖ-1	DS	0.58	0.82	11	92	1.2×10^{-9}
GKÖ-2	DS	0.52	0.63	12	90	1.4×10^{-9}
GKÖ-3	DS	0.50	0.69	18	109	1.4×10^{-9}
GKÖ-4	DS	0.41	0.76	11	236	7.1×10^{-10}
GKÖ-1	ÇS	0.60	0.79	11	128	1.0×10^{-9}
GKÖ-2	ÇS	0.58	0.77	12	95	9.8×10^{-10}
GKÖ-3	ÇS	0.51	0.65	18	108	1.7×10^{-9}
GKÖ-4	ÇS	0.42	0.75	11	268	1.0×10^{-9}

*: DS: Damıtık Su, ÇS: Çeşme Suyu

Hidrolik iletkenlik oranlarının süzüntü suyuna ve BHCAM'ye bağlı olarak gösterimi Şekil 5'te yapılmıştır. Deney sonuçları yorumlanırken hidrolik iletkenlik oranlarının 1.5'un altına düştüğü andaki BHCAM'ler göz önüne alınmıştır. Zira hidrolik iletkenlik oranı 1.5'un altındaki değerler önemsiz kabul edilebilir. GKÖ-1'in damıtık su ile süzdürüldüğü durumda deney başı ile deney sonu hidrolik iletkenlikleri arasındaki fark yaklaşık 28 kattır (Şekil 5a). Bu fark, 4.5 BHCAM'de 1.5 katın altına düşmüştür. GKÖ-1'in çeşme suyu ile yapılan deneyinde ise hidrolik iletkenlik oranı başlangıçta oldukça yüksektir (22,500 kat). Bu oran 5.5 BHCAM sonunda 1500'e, 7.5 BHCAM'de de 1.5 değerine doğru azalmıştır. Hidrolik iletkenlik oranlarının başlangıçta yüksek bulgulanmasının sebebi GKÖ-1'in içindeki bentonitin daha iri daneli (kum dane boyunda) olmasıdır. İri daneli bentonitlerde hidrolik iletkenlik başlangıçta yüksek olup bentonit şiştikçe geçirgenlik de azalmaktadır.



Şekil 5. Her bir hidrolik iletkenlik değerinin nihai hidrolik iletkenliğe bölünmesiyle elde edilmiş hidrolik iletkenlik oranları: a) Geosentetik Kil Örtü-1 (GKÖ-1), b) Geosentetik Kil Örtü-2 (GKÖ-2), c) Geosentetik Kil Örtü-3 (GKÖ-3), d) Geosentetik Kil Örtü-4 (GKÖ-4).

GKÖ-2'nin çeşme suyu ile yapılan deneyinde hidrolik iletkenlik oranında önemli farklar gözlenmezken, damıtık su ile süzdürüldüğü durumda bu oran deney başında yüksek bulgulanmış (≈ 10), daha sonra 2.0 BHCAM'de 1.5'tan daha düşük değerlere doğru azalma göstermiştir (Şekil 5b). Bu noktadan deneyin tamamlanmasına kadar geçen sürede hidrolik iletkenlik oranında önemli bir değişiklik kaydedilmemiştir.

GKÖ-3'ün hidrolik iletkenlik oranı ise deney başında damıtık su ile süzdürüldüğünde 12 iken, 1.4 BHCAM sonunda 1.5'un altına düşmüştür (Şekil 5c). Çeşme suyunun kullanıldığı durumda ise deney başında 120 elde edilen hidrolik iletkenlik oranı 2.5 BHCAM'de 20'nin altına; yaklaşık 4.0 BHCAM sonunda da 1.5'tan daha düşük değerlere doğru azalma göstermiştir (Şekil 5c).

GKÖ-4'ün başlangıç hidrolik iletkenliklerinin nihai değerlerden düşük olduğu daha önce belirtilmişti (Şekil 3 ve Şekil 4). Bu nedenle başlangıç hidrolik iletkenlik oranları damıtık su için 0.34, çeşme suyu için de 0.62 olarak belirlenmiştir. Fakat bu değerler çok kısa süre içerisinde 1.0'e ulaşarak dengeye gelmiş ve bu durum deney tamamlanmaya kadar devam etmiştir (Şekil 5ç).

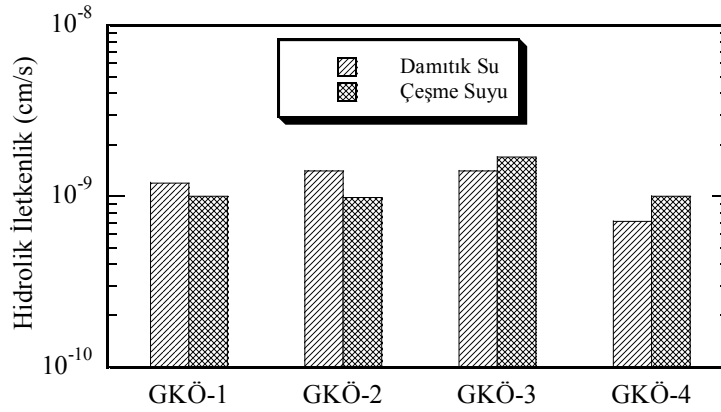
Genel olarak bakıldığında ise GKÖ'lerin hidrolik iletkenliklerinin deney başında yüksek olduğu, daha sonra azaldığı ve dengeye (sabit değerlere) ulaştığı bulgulanmıştır (Şekil 3 ve Şekil 4). Buna, GKÖ içindeki bentonitin suyla temas ettikten sonra şişerek akış yollarını tıkamasının sebep olduğu söylenebilir. Gerçekten de GKÖ'lerin deney sonrası durumları incelendiğinde, şişmeye bağlı olarak nihai GKÖ yüksekliklerinin ve bentonit su içeriklerinin önemli miktarda arttığı görülmüştür (Çizelge 2). Bu artış doğal olarak hidrolik iletkenlikte de azalma ile sonuçlanmıştır. Fakat Şekil 5'ten de görülebileceği gibi hidrolik iletkenliğin azalmaya başladığı nokta görecelidir. Diğer bir deyişle, hidrolik iletkenlik deneylerinde dengenin hangi noktada sağlandığı numunenin fiziksel özellikleri ile kullanılan süzöntü suyunun kimyasal özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle hidrolik iletkenlik deneyleri uzun süreli olarak tatbik edilmeli ve hidrolik iletkenlik oranı sürekli gözetilerek, bu oranın 1.5'un altına düştüğü ana kadar deneye devam edilmelidir.

Süzöntü Suyunun Etkisi

Süzöntü suyu tipine göre nihai hidrolik iletkenlik değerlerine bakıldığında ise damıtık su ve çeşme suyuyla yapılan deneylerde birbirine oldukça yakın sonuçların elde edildiği görülmektedir (Şekil 6). GKÖ-1 ve GKÖ-2 üzerinde yapılan deneylerde damıtık suyun kullanıldığı durumda elde edilen hidrolik iletkenliklerin çeşme suyu kullanılan duruma göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bunun tam tersi ise GKÖ-3 ve GKÖ-4 için elde edilmiştir. Diğer bir deyişle, damıtık su ile elde edilen hidrolik iletkenlikler çeşme suyu ile belirlenenlerden daha düşüktür (Şekil 6).

Çeşme suyunda düşük konsantrasyonlu katyonların bulunduğu göz önüne alınırsa, GKÖ'lerin çeşme suyu ile elde edilen hidrolik iletkenliklerinin damıtık su ile elde edilenlerden daha yüksek çıkması beklenebilir. Bentonit partiküllerinin çevresinde elektriksel kuvvetlerle tutunmuş halde bulunan su tabakası kalınlığı katyon alışverişine duyarlıdır. Kil partikülüne en yakın mesafede bulunan katyonlar, yüksek elektriksel çekim kuvveti nedeniyle kile sıkıca tutunmaktadır. Bu katyonların kile sıkı tutundukları bölgeden çıkarılabilmeleri veya herhangi bir etkileşimle başka katyonlarla yer değiştirmeleri zordur.

Bu tabakayı takip eden ve elektriksel çekim kuvvetlerinin nispeten daha zayıf olduğu alanda ise katyonlar dağılmış haldedir ve yer değiştirebilir katyonlar olarak adlandırılmaktadır [13, 14]. Yer değiştirebilir katyonların özelliklerine bağlı olarak (konsantrasyon, hidrate olmuş iyon çapı, katyon değeri vb.) su tabakası kalınlığı da değişir. GKÖ'lerde kullanılan bentonitlerde de yer değiştirebilir katyon bölgeleri, ekseriyetle sodyumla işgal edildiğinden bu bölgedeki sodyumların çeşme suyundaki diğer katyonlarla (özellikle kalsiyum ve magnezyum gibi çift değerlikli katyonlar) zaman içinde yer değiştirmesi beklenir. Bu gerçekleştiğinde partikül çevresindeki su tabakası baskılanır ve tabaka kalınlığı daralmaya başlar. Bunun sonucunda bentonit daha gözenekli hale gelir. Partiküller arasında boşlukların artması, hidrolik iletkenlikte de yükselmeye neden olur.



Şekil 6. Geosentetik kil örtülerin nihai hidrolik iletkenliklerinin damıtık ve çeşme suyu ile süzdürüldükleri durum karşılaştırılması.

Düşük konsantrasyonlu sıvılar ile bentonitler arasında katyon alışveriş süresi uzundur. Jo vd. [15] süzüntü sıvısı olarak NaCl, KCl ve CaCl₂ çözeltilerinin kullanıldığı hidrolik iletkenlik deneylerinde, GKÖ'lerin kimyasal denge durumunu farklı deney sonlandırma koşulları için irdemişlerdir. Buna göre yüksek konsantrasyonlu sıvılarla deney yapıldığında (≥ 50 mM CaCl₂) kimyasal dengeye bir yıl sonunda ulaşıldığı, fakat düşük konsantrasyonlu sıvılar kullanıldığında (≤ 20 mM CaCl₂ ve ≤ 100 mM NaCl, KCl) ise bu sürenin üç yılın üzerine çıkabildiği rapor edilmiştir. Burada sunulan çalışmanın 6 ay sürdüğü göz önüne alınırsa düşük katyon konsantrasyonlu çeşme suyu ile sodyum bentonit arasında katyon alışverişinin tamamlanmamış olması oldukça muhtemeldir. Bu nedenle GKÖ-3 ve GKÖ-4 için elde edilen hidrolik iletkenlikler, damıtık suyun kullanıldığı durumda elde edilen değerlerden daha düşük bulunmuş olabilir. Bu nedenle GKÖ'lerin damıtık su ve çeşme suyu ile elde edilen nihai değerleri kısa dönem hidrolik iletkenlikler olarak kabul edilmelidir.

GKÖ Tipinin Etkisi

Deneylerde kullanılan GKÖ'lerin her biri iğnelenme yoluyla imal edilmiştir. Bu GKÖ'ler tek tip kabul edilse bile her bir GKÖ içindeki bentonitler birbirinden farklı olduğu için hidrolik iletkenlikler "GKÖ tipinin etkisi" altında yeniden incelenmiştir. Buna göre damıtık suyun kullanıldığı durumda en yüksek hidrolik iletkenlik GKÖ-2 ve GKÖ-3 için elde edilmiş olup her iki GKÖ için de 1.4×10^{-9} cm/s olarak ölçülmüştür (Çizelge 2). GKÖ'ler arasında en düşük hidrolik iletkenlik ise polimer katkılı GKÖ-4 için elde edilmiştir (7.1×10^{-10} cm/s). Buna göre en yüksek ve en düşük hidrolik iletkenlikler arasında iki katlık bir fark olduğu Şekil 7'den görülebilir. Çeşme suyu ile yapılan deneylerde ise GKÖ-1, GKÖ-2 ve GKÖ-4'ün hidrolik iletkenlikleri birbirlerine oldukça yakın bulgulanmıştır (9.8×10^{-10} - 1.0×10^{-9} cm/s). Bu üç GKÖ'nün hidrolik iletkenlikleri GKÖ-3'ün hidrolik iletkenliğinden yaklaşık 1.7 kat daha düşüktür (Şekil 7).

Buradan, damıtık su ve çeşme suyunun kullanıldığı deneylerde ölçülen hidrolik iletkenliklerin GKÖ tipinden kısmen bağımsız olduğu ve birbirine çok yakın sonuçların elde edildiği görülmektedir. Fakat GKÖ'lerin hidrolik iletkenlikleri bentonitlerin fiziko-kimyasal özellikleri ile karşılaştırıldığında, fiziksel özelliklerinden ziyade bentonitlerin kimyasal ve mineralojik özelliklerinin hidrolik iletkenlikler üzerinde bir etkisi olduğu görülmektedir (Çizelge 1). Çizelge 1'de verilen parametreler damıtık su kullanılarak belirlendiğinden burada da yalnızca damıtık suyla belirlenen hidrolik iletkenlikler ele alınarak sonuçlar yorumlanmıştır.

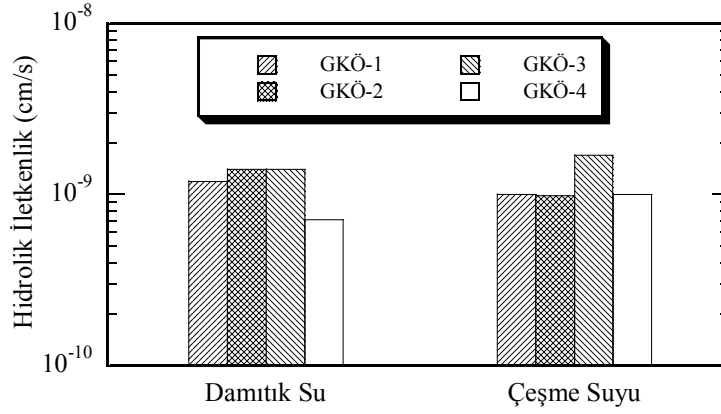
Kil içeriği en düşük olan GKÖ-4'ün hidrolik iletkenliğinin diğerlerine nazaran da en düşük olduğu görülmektedir (Çizelge 1). Oysa kil içeriği arttıkça hidrolik iletkenliğin de azalması beklenmektedir [8]. Fakat bu durum GKÖ-4 için geçerli değildir. Bu nedenle polimer katkı söz konusu olduğunda kil içeriğinin hidrolik iletkenlik üzerine bir etkisi görülemeyebilir.

Diğer yanda likit limitlerin hidrolik iletkenlikler üzerine etkisi incelendiğinde (Çizelge 1), GKÖ-4'ün değerinin (%1134) diğer GKÖ'lerin likit limitlerinden bir hayli yüksek veya GKÖ-1'in likit limitinin (%108) diğerlerinden daha düşük olduğu görülmektedir. Dolayısıyla hidrolik iletkenliklerin birbirine çok yakın olduğu göz önüne alındığında, likit limitin (veya plastisite indeksinin) tek başına hidrolik iletkenlik üzerindeki etkisi oldukça sınırlıdır.

Mineralojik analiz neticesinde en yüksek smektit içeriğine sahip bentonitin GKÖ-1'e ait olduğu (%68); GKÖ-2, GKÖ-3 ve GKÖ-4'ün de sırasıyla %65, %64 ve %66 smektit içeren bentonitlerden oluştuğu belirlenmiştir. GKÖ-1'in düşük likit limitine rağmen yüksek oranda smektit içermesi, hidrolik iletkenliğin üzerinde smektit içeriğinin rolü olduğunu göstermektedir.

Bentonitlerin katyon değişim kapasiteleri birbirine çok yakın olduğundan bu parametrenin de tek başına hidrolik iletkenlik üzerine etkisi olduğu da söylenememektedir. Fakat aynı durum özgül yüzey için geçerli değildir. Özgül yüzey alanı en yüksek olan GKÖ-4'ün ($891 \text{ m}^2/\text{g}$) hidrolik iletkenliği de en düşüktür (7.1×10^{-10} cm/s). Diğer yanda ise GKÖ-1, GKÖ-2 ve GKÖ-3'ün özgül yüzey alanları sırasıyla $670 \text{ m}^2/\text{g}$, $592 \text{ m}^2/\text{g}$, $538 \text{ m}^2/\text{g}$ olarak belirlenmiştir. Bu GKÖ'lerin hidrolik iletkenlikleri de sırasıyla 1.2×10^{-9} cm/s, 1.4×10^{-9} cm/s ve 1.4×10^{-9} cm/s olarak belirlenmiştir. Bu değerler bentonitlerin özgül yüzey alanları ile gayet uyumludur.

Yukarıdaki açıklamalar ışığında damıtık su ve çeşme suyu ile yapılan hidrolik iletkenlik deneylerinde bentonitlerin fiziksel özelliklerinden ziyade kimyasal (özellik yüzey alan) ve mineralojik özelliklerinin hidrolik iletkenlik üzerinde etkisi olduğu ortaya çıkmıştır.

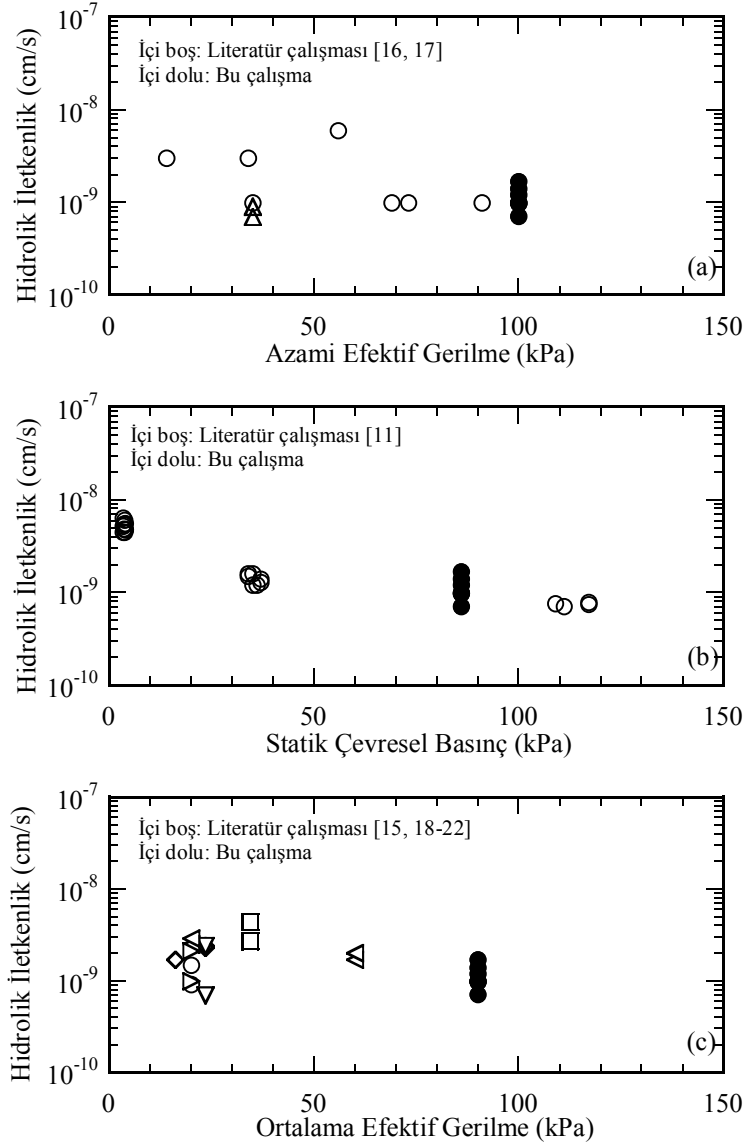


Şekil 7. Geosentetik Kil Örtü tipine göre nihai hidrolik iletkenliklerin karşılaştırılması.

Efektif Gerilmenin Etkisi

Hidrolik iletkenlik deneylerinde efektif gerilmenin etkisi daha önce yapılan çalışmalarda detaylı olarak ortaya konmuştur [11, 16]. Bu çalışmalarda efektif gerilmenin artırılmasıyla bentonit partikülleri arası boşluklar azaldığından hidrolik iletkenliğin de azaldığı raporlanmıştır. Burada sunulan çalışmanın amacı ise efektif gerilmenin hidrolik iletkenlik üzerine etkisinin araştırılması değildir. Fakat burada elde edilen hidrolik iletkenlikler, literatürde rapor edilmiş çalışma sonuçlarıyla birlikte değerlendirilerek hem literatürle uyumluluk irdelenmiş, hem de efektif gerilmenin hidrolik iletkenlik üzerine etkisi incelenmiştir. Karşılaştırma için literatürden iğneleme yolu ile tutturulmuş GKÖ üzerinde yapılan ve yalnızca damıtık su ve çeşme suyunun kullanıldığı deney sonuçları seçilmiştir.

Burada ayrıca dikkat edilmesi gereken önemli bir husus vardır. Literatürde raporlanan hidrolik iletkenlikler farklı isimler altında verilen gerilmelerle ilişkilendirilmiştir. Örneğin, Estornell ve Daniel [16] ile Ruhl ve Daniel [17] esnek duvarlı permametrelerden elde ettikleri hidrolik iletkenlikleri “azami efektif gerilme” ile (Şekil 8a); Petrov vd. [11] sabit akış hızı ile gerçekleştirilen ve sabit duvarlı permametrelerin kullanıldığı bir sistemde hücre basıncının aksel yük ile uygulanması nedeniyle hidrolik iletkenlik sonuçlarını “statik çevresel basınç” ile ifade etmişlerdir (Şekil 8b). Petrov vd. [11] GKÖ üst yüzüne etki eden statik çevresel basıncın “asgari efektif gerilmeye” eşit olduğunu vurgulamışlardır. Diğer yanda çoğu araştırmacı [18-22] esnek duvarlı permametrelerle yapılan deneylerde sızma basınçlarını göz ardı ederek ortalama efektif gerilme değerlerini raporlamışlardır (Denklemler 1). Dolayısıyla bu çalışmadan elde edilen hidrolik iletkenlik sonuçları ile literatürde raporlanan hidrolik iletkenlikler ortalama efektif gerilme cinsinden Şekil 8c’de gösterilmiştir.



Şekil 8. Geosentetik kil örtülerin hidrolik iletkenliklerinin: a) azami efektif gerilmeye b) statik çevresel basınca ve c) ortalama efektif gerilmeye bağlı olarak değişimi.

Estornell ve Daniel [16] ile Petrov vd.'nin [11] verdiği sonuçlar efektif gerilmenin hidrolik iletkenlik üzerine etkisini inceleyen çalışmalardır. Bu nedenle Şekil 8a ve Şekil 8b'de verilen literatür çalışmaları 10-120 kPa arasındaki efektif gerilmeler altında gerçekleştirilen

deney sonuçlarını temsil etmektedir. Bu çalışmada en yüksek 100 kPa ve en düşük 86 kPa efektif gerilmeler altında elde edilen hidrolik iletkenlikler ise literatürde önemli bir boşluğu doldurmaktadır (Şekil 8a ve Şekil 8b).

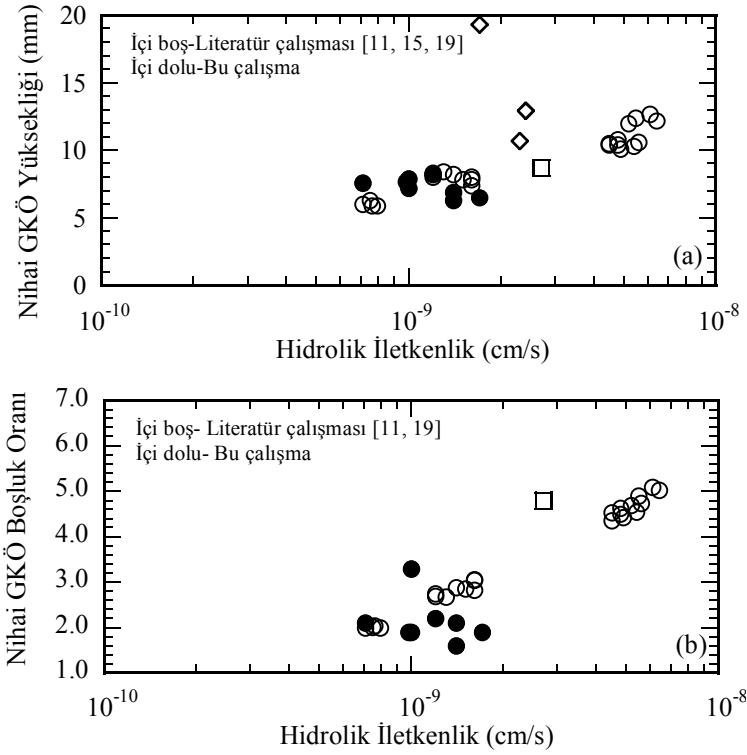
Ayrıca, Ruhl ve Daniel [17] 35 kPa azami efektif gerilme değerinin pratikte karşılaşılabilecek en düşük efektif gerilme olduğunu söyleyerek “en kötü senaryo” adını verdikleri bu gerilme değeri altında hidrolik iletkenlik deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Şekil 8a’dan da görülebileceği gibi 35 kPa altında elde ettikleri sonuçlar ile burada elde edilen hidrolik iletkenlikler birbirine oldukça yakındır. Şekil 8c’de verilen hidrolik iletkenlikler de genelde 20-35 kPa ortalama efektif gerilmeler altında elde edilmiş olup bu değerlerin yayımlandığı çalışmalar Estornell ve Daniel [16] ile Petrov vd.’nin [11] çalışmalarına göre daha yenidir. Bu çalışmadaki ortalama efektif gerilme 90 kPa’dır ve bu değer Şekil 8c’de raporlanan gerilmelere göre yüksektir. Fakat buna rağmen hidrolik iletkenlikler daha önce vurgulanan “efektif gerilme arttırıldıkça GKÖ’lerin hidrolik iletkenlikleri azalır” davranışını destekleyen yönde ve literatür çalışmalarına göre bir miktar daha düşük bulgulanmıştır.

Efektif gerilmelerdeki farklılıklar deney sonu (nihai) GKÖ yüksekliklerini de etkilemektedir. Buna bağlı olarak nihai GKÖ yükseklikleri ile hidrolik iletkenlikler arasındaki ilişki Şekil 9a’da gösterilmiştir. Buna göre GKÖ yüksekliği arttıkça hidrolik iletkenlik de yükselmektedir. Bu çalışmada elde edilen hidrolik iletkenlikler ve nihai GKÖ yüksekleri ile literatürde yayımlanan değerler birbiriyle uyumludur. Fakat Petrov vd. [11] hidrolik iletkenliğin nihai GKÖ yüksekliği yerine nihai GKÖ boşluk oranı ile daha iyi ifade edilebileceğini belirtmişlerdir. Kendi çalışmalarında her bir GKÖ içindeki bentonit miktarının ($M_{bentonit}$) değişkenlik gösterdiğini ve bu nedenle GKÖ’lerin yüksekliklerinin de farklı olabildiğini ileri sürmüşlerdir. GKÖ’deki bentonit ağırlığının etkisini ortadan kaldırmak için hidrolik iletkenlik sonuçlarını boşluk oranı cinsinden çizdirmişlerdir. Burada da aynı karşılaştırmayı yapabilmek için GKÖ’lerin nihai boşluk oranlarının hesaplanması gerekmektedir. Bunun için daha önce Denklem (4) ile belirlenen GKÖ içindeki boşlukların hacmi, katıların hacmine (V_s) bölünmüş ve boşluk oranı (e) Denklem (5)’te gösterildiği şekilde hesaplanmıştır:

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V - V_s}{V_s} = \frac{\left[H_{GKÖ} - \left(\frac{M_{bentonit}}{\rho_{bentonit} \times (1+w)} + \frac{M_{geotekstil}}{\rho_{geotekstil}} \right) \right]}{\left(\frac{M_{bentonit}}{\rho_{bentonit} \times (1+w)} + \frac{M_{geotekstil}}{\rho_{geotekstil}} \right)} \quad (5)$$

Hidrolik iletkenlikler ile Denklem (5)’ten hesaplanan GKÖ boşluk oranları arasındaki ilişki Şekil 9b’de gösterilmiştir. Bu çalışmada uygulanan yüksek efektif gerilme nedeniyle düşük GKÖ boşluk oranları elde edilmiştir (Şekil 9b). Ayrıca, Petrov vd. [11] çalışmalarını tek tip GKÖ üzerinde gerçekleştirdiğinden GKÖ boşluk oranı-hidrolik iletkenlik ilişkisi doğrusala yakın ve yüksek regresyon katsayısıyla elde edilmiştir. Bu çalışmada ise dört farklı tipte GKÖ kullanılmıştır. Bu nedenle boşluk oranları aynı efektif gerilme altında farklı elde edilmiştir. Fakat yine de Şekil 9b’deki ilişki incelendiğinde burada elde edilen sonuçların “GKÖ boşluk oranı azaldıkça hidrolik iletkenlik azalır” davranışına uyduğu görülmektedir.

Bu azalmaya, uygulanan efektif gerilme nedeniyle bentonit partikülleri arasında boşlukların daralması sebep olmaktadır. Diğer bir deyişle, efektif gerilmenin artmasıyla bentonit partikülleri birbirine yaklaşmaya zorlanır ve bu nedenle partiküller arasında mobilize (hareket edebilen) suyun geçeceği akış kanalları küçülür. Bu da GKÖ yüksekliğinde ve dolayısıyla GKÖ boşluk oranında azalmaya sebep olur (Şekil 9). Genel olarak bakıldığında ise burada sunulan çalışma sonuçlarının literatürle gayet uyumlu olduğu ve daha önce raporlanan davranışa benzer davranış sergilediği görülmektedir. Ayrıca, hidrolik iletkenlik deneyleri yapılırken efektif gerilme değerinin seçimine dikkat edilmeli ve mümkün olduğunca arazi şartlarını ve yükleme koşullarını temsil eden efektif gerilme değerleriyle çalışılmalıdır.



Şekil 9. Geosentetik kil örtülerin hidrolik iletkenliklerinin a) nihai GKÖ yüksekliği ve b) nihai GKÖ boşluk oranı ile olan değişimi.

4. SONUÇLAR

Bu çalışma GKÖ'lerin hidrolik iletkenlik deneylerinin yapılışı hakkında bilgi sunmak ve elde edilen sonuçları GKÖ tipine ve süzüntü suyu cinsine göre değerlendirmek üzere hazırlanmıştır. Daha sonra hidrolik iletkenlikler efektif gerilmenin fonksiyonu olarak

literatürde daha önce raporlanmış çalışmalarla kıyaslanmıştır. Çalışma boyunca elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Hidrolik iletkenlik davranışları belirlenmek üzere dört adet GKÖ altı ay süre ile deneye tabi tutulmuştur. GKÖ'lerden bazısında hidrolik denge hemen sağlanırken (GKÖ-2 ve GKÖ-4), bazısında denge için 8 boşluk hacmi kadar akışın numune içinden geçmesi beklenmiştir (GKÖ-1 ve GKÖ-3). Hidrolik dengenin kontrolü için "hidrolik iletkenlik oranı" tanımlanmış ve bu oranın 1.5'un altına düştüğü andaki BHCAM, dengenin sağlandığı nokta olarak ifade edilmiştir.
- GKÖ tipine bağlı olarak hidrolik iletkenlik davranışları da değişmektedir. Damıtık su ve çeşme suyu ile yapılan deneylerde GKÖ-1, GKÖ-2 ve GKÖ-3'te hidrolik iletkenlikler zamanla azalırken GKÖ-4'te ise hidrolik iletkenlik deney başında düşük, fiziksel dengenin sağlandığı noktada bir miktar yüksek bulgulanmıştır.
- Damıtık su ile yapılan deneylerde hidrolik iletkenlikler, GKÖ tipine bağlı olarak, 7.1×10^{-10} - 1.4×10^{-9} cm/s arasında ölçülürken; çeşme suyu ile yapılan deneylerde 9.8×10^{-10} - 1.4×10^{-9} cm/s arasında belirlenmiştir. GKÖ'lerin hidrolik iletkenlikleri arasındaki bu farklar pratikte önemsiz kabul edilebilir.
- Bentonitlerin sahip olduğu fiziksel özelliklerden ziyade mineralojik özelliklerin ve bazı kimyasal özelliklerin (özgül yüzey alanlarının) GKÖ'lerin damıtık suyla belirlenen hidrolik iletkenlikleri üzerine etkisi olduğu görülmüştür.
- Bu çalışmada damıtık su ve çeşme suyu ile elde edilen GKÖ hidrolik iletkenlikleri ile literatürde yayımlanan hidrolik iletkenlikleri birbiriyle uyumludur. Fakat bu uyumun sentetik veya gerçek sızıntı suları ile de kontrol edilmesi gerekir.
- Hidrolik iletkenlik sonuçları efektif gerilmenin fonksiyonu olarak literatürde daha önce rapor edilen çalışmalarla birlikte değerlendirilmiştir. Buna göre efektif gerilme arttıkça, hidrolik iletkenlik de azalmıştır.
- Hidrolik iletkenlikler nihai GKÖ yüksekliğinin ve nihai boşluk oranının fonksiyonu olarak ayrıca incelenmiştir. Literatürle karşılaştırılan sonuçlar neticesinde nihai GKÖ boşluk oranındaki azalmanın, hidrolik iletkenlikte azalmaya sebep olduğu görülmüştür.

Semboller

GKÖ	: Geosentetik Kil Örtü
GCL	: Geosynthetic Clay Liner
HDPE	: High density polyethylene
σ'_{ort}	: Ortalama efektif gerilme
$\sigma_{hücre}$: Hücre basıncı
σ_g	: Hücre girişindeki (ölçekli cam tüpteki) su basıncı
$\sigma_ç$: Hücre çıkış ağzındaki su basıncı

i	: Hidrolik eğim
i_{ort}	: Ortalama hidrolik eğim
$H_{GKÖ}$: GKÖ yüksekliği
γ_{su}	: Suyun birim hacim ağırlığı
k	: Permabilite katsayısı
a	: Ölçekli cam tüp enkesit alanı
A	: GKÖ enkesit alanı
Δt	: İki okuma arasında geçen zaman
h_0	: İlk okuma yüksekliği
h_1	: Son okuma yüksekliği
$BHCAM$: Boşluk hacmi cinsinden akış miktarı
V_v	: Boşluk hacmi
V_s	: Katıların hacmi
H_v	: Boşluk yüksekliği
H_s	: GKÖ içindeki katı kısmın yüksekliği
$H_{bentonit}$: Bentonit partiküllerinin yüksekliği
$H_{geotekstil}$: GKÖ’de kullanılan geotekstillerin yüksekliği
$M_{bentonit}$: Bentonit kütlesi
$M_{geotekstil}$: Birim alana gelen geotekstil kütlesi
$\rho_{bentonit}$: Bentonit partiküllerinin yoğunluğu
$\rho_{geotekstil}$: Geotekstillerin yoğunluğu
w	: bentonit su içeriği
$Q_{giriş}$: GKÖ içine giren su miktarı
$Q_{çıkış}$: GKÖ içinden geçen su miktarı
$Q_{çıkış}/Q_{giriş}$: Fiziksel denge
e	: Boşluk oranı

Teşekkür

Bu çalışma tümüyle TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir. Burada sunulan sonuçlar 111M718 nolu proje kapsamında yürütülen çalışmada elde edilen sonuçlardan bir bölümünü kapsamaktadır. TÜBİTAK’a projeye verdiği maddi destek için teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- [1] Scalia, J., Benson, C. H., Edil, T. B., Bohnhoff G.L., Shackelford C. D., Geosynthetic Clay Liners Containing Bentonite Polimer Nanocomposite, Geo-Frontiers 2011, 2001-2009, 2011.
- [2] Scalia, J., Benson, C., Bohnhoff, G., Edil, T., and Shackelford, C., Long-Term Hydraulic Conductivity of a Bentonite-Polymer Composite Permeated with Aggressive Inorganic Solutions, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 140 (3), 1-11, 2014.
- [3] Benson, C., Abichou, T., Jo, H., Forensic Analysis of Excessive Leakage from Lagoons Lined with a Composite GCL, Geosynthetics International, 11(3), 242-252, 2004.
- [4] Benson, C., Thorstad, P., Jo, H., and Rock, S., Hydraulic Performance of Geosynthetic Clay Liners in a Landfill Final Cover, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 133(7), 814-827, 2007.
- [5] Benson, C., Ören, A., and Gates, W., Hydraulic Conductivity of Two Geosynthetic Clay Liners Permeated with a Hyperalkaline Solution, Geotextiles and Geomembranes, 28(2), 206-218, 2010.
- [6] Demirkıran, H. Determining the Hydraulic Conductivity Behavior of Geosynthetic Clay Liners (GCLs) Permeated with Different Leachates, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 84 pp., 2014.
- [7] Ören, A.H., Demirkıran, H., Yükselen Aksoy Y., Önal, Ö., Hidrolik İletkenlik Deneylelerinin Tekrarlanabilirliği Üzerine Bir Çalışma, 5. Geoteknik Sempozyumu, 5-7 Aralık, Adana, 1-10 (Bildiriler Flash Belleğinde 57 Nolu bildiri), 2013.
- [8] Demirkıran, H., Akar, R.Ç., Ören, A.H., Geosentetik Kil Örtülerin Fiziksel Özelliklerinin Hidrolik İletkenlik Davranışına Etkisinin Belirlenmesi, 6. Ulusal Geosentetikler Konferansı, 29-30 Mayıs, İstanbul, 15-26, 2014.
- [9] Shackelford, C., Benson, C., Katsumi, T., and Edil, T., Evaluating the Hydraulic Conductivity of GCLs Permeated with Non-Standard Liquids, Geotextiles and Geomembranes, 18(2-3), 133-161, 2000.
- [10] ASTM D5084-10, Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter, American Society for Testing and Materials, ASTM International, West Conshohocken, Pa, 2002.
- [11] Petrov, R. J., Rowe, R. K., Quigley, R. M., Selected Factors Influencing GCL Hydraulic Conductivity, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 123(8), 683-695, 1997.
- [12] ASTM D7100-11, Standard Test Method for Hydraulic Conductivity Compatibility Testing of Soils with Aqueous Solutions, American Society for Testing and Materials, ASTM International, West Conshohocken, Pa, 2002.

- [13] Bohn, H., McNeal, B., & O'Connor, G., Soil Chemistry, 2nd edition, John Wiley & Sons Inc., Toronto, 1985.
- [14] Mitchell, J. K. ve Soga, K., Fundamentals of Soil Behavior, 3rd edition, John Wiley & Sons Inc., New York, 2005.
- [15] Jo, H. Y., Benson, C. H., Edil, T. B., Long-Term Hydraulic Conductivity of a Geosynthetic Clay Liner Permeated with Inorganic Salt Solutions, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(4), 405-417, 2005.
- [16] Estornell, P., Daniel, D., Hydraulic Conductivity of Three Geosynthetic Clay Liners, *Journal of Geotechnical Engineering*, 118(10), 1592–1606, 1992.
- [17] Ruhl, J., Daniel, D., Geosynthetic Clay Liners Permeated with Chemical Solutions and Leachates., *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(4), 369–381, 1997.
- [18] Jo, H., Katsumi, T., Benson, C., Edil, T., Hydraulic Conductivity and Swelling of Non-Prehydrated GCLs Permeated with Single Species Salt Solutions, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(7), 557-567, 2001.
- [19] Shan, H. Y., Lai, Y. J., Effect of hydrating liquid on the hydraulic properties of geosynthetic clay liners, *Geotextiles and Geomembranes*, 20(1), 19-38, 2002.
- [20] Lee, J. M., Shackelford, C. D., Impact of Bentonite Quality on Hydraulic Conductivity of Geosynthetic Clay Liners, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(1), 64–77, 2005.
- [21] Podgorney, R. K., Bennet, J. E., Evaluating the Long-Term Performance of Geosynthetic Clay Liners Exposed to Freeze-Thaw, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(2), 265–268, 2006.
- [22] Benson, C., Meer, S., Relative Abundance of Monovalent and Divalent Cations and the Impact of Desiccation on Geosynthetic Clay Liners, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(3), 349–358, 2009.

