

## GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİNDE GEÇİRİMSİZ BARIYERLERİN PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ: HİDROLİK İLETKENLİK DENEYLERİ

### PERFORMANCE EVALUATION OF BARRIERS IN GEOTECHNICAL ENGINEERING: HYDRAULIC CONDUCTIVITY TESTS

A. Hakan ÖREN<sup>1</sup>

#### ÖZET

Atık kaynaklı sızıntı sularının yeraltı suyuna (YAS) karışmasını ve çevreye zarar vermesini önlemek için geçirimsiz tabakalar inşa edilir. Bu tabakalar atık depolama sahaları ve maden atık havuzları gibi alanların önemli bileşenlerinden biridir. Geçirimsiz tabaka olarak adlandırılan bu sistemler aslında düşük geçirimsizliğe sahip bariyerlerdir ( $<10^{-9}$  m/s). Bariyerler, killi doğal zeminlerden, kum-bentonit gibi bentonitli karışımlardan ve geosentetik kil örtü (GKÖ) gibi kompozit malzemelerden inşa edilebilir. Bu malzemeleri yerinde kullanmadan önce, bariyer performansını belirlemek için laboratuvarında hidrolik iletkenlik deneyleri yapılır. Su kullanıldığında bariyerlerin hidrolik iletkenliği düşük elde edilir ( $<10^{-10}$  m/s). Ancak, alana özel çözeltilerin/sıvıların kullanılması durumunda hidrolik iletkenlik davranışında önemli değişimler gözlenebilir. Kullanılan sıvı haricinde, permametre tipinin ve deneyin hangi koşullar altında gerçekleştirildiğinin (geri basınç, efektif gerilme, hidrolik eğim, akış doğrultusu) deney sonuçları üzerinde önemli etkisi bulunmaktadır. Burada sunulan çalışma, yazarın son 20 yılda elde ettiği deneyimlerden yola çıkarak hidrolik iletkenlik deneylerinde dikkat edilmesi gereken hususları inceleyen çalışmalarını özetlemektedir. Bu bağlamda hidrolik iletkenlik deneylerinde göz önüne alınması gereken durumlar ele alınmıştır. KBK, zeolit-bentonit karışımları (ZBK) ve GKÖ üzerinde tecrübe edilmiş bazı örnekler verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Hidrolik iletkenlik, bariyer, kum bentonit karışımı, zeolit-bentonit karışımı, GKÖ

#### ABSTRACT

Impermeable liners are constructed to prevent mixing of waste-sourced leachate to groundwater (GW) and damaging the environment. These liners are one of the important components of areas such as landfills and mine tailings ponds. These systems, called impermeable layer, are actually barriers with low permeability ( $<10^{-9}$  m/s). Barriers can be constructed with clayey soils, bentonitic mixtures such as sand-bentonite mixtures (SBMs), and composite materials such as geosynthetic clay liners (GCLs). Before using these materials in situ, hydraulic conductivity tests are performed in the laboratory to determine barrier performance. The hydraulic conductivity of these liners is low ( $<10^{-10}$  m/s) when water is used as the permeant. However, significant changes in hydraulic conductivity behavior can be observed in the case of using site-specific solutions/liquids. Other than permeant, the type of permameter and the conditions under which the test is performed (back pressure, effective stress, hydraulic gradient, flow direction) have a significant impact on the test results. The study presented here summarizes studies examining the considerations in hydraulic conductivity tests based on the author's experience over the past 20 years. In this context, the situations that should be considered in hydraulic conductivity tests are discussed. Some examples experienced on SBMs, zeolite bentonite mixtures (ZBMs) and GCLs are given.

**Keywords:** Hydraulic conductivity, barrier, sand-bentonite mixture, zeolite-bentonite mixture, GCL

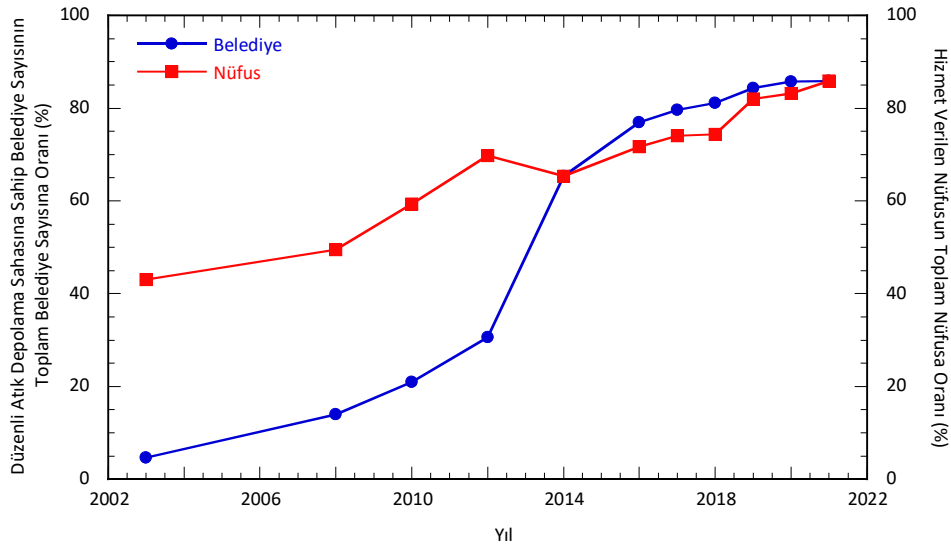
<sup>1</sup> Prof. Dr., Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, ali.oren@deu.edu.tr

## 1. GİRİŞ

Dünyada artan nüfus ve sanayileşmeye bağlı olarak meydana gelen kirlilik korkutucu boyutlara ulaşmaya başlamıştır. Kirlenme yalnızca atmosferde değil; denizlerde, karada ve yeraltı sularında görülmektedir. 21. yüzyılın en önemli meydan okumalarından biri de bu kirlilikle başa çıkabilmek ve önlem alabilmektir. Bunun bir yolu kirleticileri geçirimsiz bariyerler ile çevreleyerek hapsetmektir.

Evsel, endüstriyel, maden, tıbbi ve nükleer atıklar kirlilik kaynaklarından bazılarıdır. Bu atıklardan bazılarının yakılması veya tümünün ortamdaki izole edilerek depolanması gerekmektedir. Depolama alanı oluşturmak yüz ölçümü küçük ülkelerde pek mümkün görünmemektedir. Zira bunun için ayrılacak alan çok kıymetlidir. Bu yüzden atıklar ya yakılarak imha edilir ya da başka ülkelere gönderilerek ülkeden uzaklaştırılması sağlanır. Ülkemiz gibi yüz ölçümü yüksek ülkelerde ise atık depolama sahaları inşa edilmesi yoluna gidilir ki bu pek çok ülkenin uzun zamandır uyguladığı bir yöntemdir.

1990'lı yılların sonuna kadar vahşi (gelişigüzel) depolama yapılması ülkemizde yaygın bir uygulama çeşidi iken günümüzde mühendislik normlarına uygun düzenli atık depolama sahaları yapılmaktadır. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın verilerine göre 2003 yılında 15 olan katı atık düzenli depolama tesis sayısı, 2010'da 46'ya; 2021'de 91'e ulaşmış olup 1195 belediyede yaklaşık 66 milyon nüfusa hizmet verilmektedir. Türkiye'de 1397 belediye bulunduğu düşünülürse 2021 yılı itibarıyla belediyelerin %86'sının düzenli depolama sahasına sahip olduğu söylenebilir. Bununla ilgili ülkemizin kaydettiği gelişim Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Türkiye'de atık depolama sahasına sahip belediye sayısının toplam belediye sayısına oranının ve bu alanda hizmet verilen nüfusun toplam nüfusa oranının yıllar içindeki değişimi (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, 2022).

Ülkemiz zengin mineral yataklarına sahip olduğundan, madencilik faaliyetinin ülkemiz ekonomisine önemli katkısı bulunmaktadır. Madenler çıkarılırken bir takım kimyasal işlem sonucunda artık ürün açığa çıkmakta ve bu ürünler önemli derecede zehirli olabilmektedir. Bu zehirli atıkların da mühendislik normlarına uygun inşa edilen gölet, havuz veya bertaraf tesislerinde depolanması ve atık kaynaklı sızıntı sularının yer altı suyuna karışmasının önlenmesi gerekmektedir. Bununla ilgili T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın 15.07.2015'te Resmi Gazete'de yayınlanan Maden Atıkları Yönetmeliği bulunmaktadır. Bu yönetmeliğin 3. Bölümü'nün 11. Maddesi'nde "Maden atıklarının depolandığı tesislerin geçirimsizlik sistemi" ile bu tip yerlerde geçirimsizliğin nasıl sağlanacağı ile ilgili önemli bilgiler verilmektedir. Ülkemizde faaliyette bulunan maden işletmelerinin sayısı dikkate alındığında, maden atıklarının depolanması için büyük miktarlarda gölet, havuz veya bertaraf tesisine ihtiyaç duyulduğu görülebilir. Ülkemizde maden işletmelerinde kullanılan bu tip bertaraf tesisi sayısı tam olarak bilinmemektedir.

Atık depolama sahalarında geçirimsizliği sağlayan en önemli bileşen geçirimsiz bariyerlerdir. Bu bariyerler, geomembranlarla birlikte doğal kil zeminlerin, kum-bentonit karışımlarının veya geosentetik kil örtülerin kullanıldığı (GKÖ) “çift tabaka”lı bir sistemi temsil etmektedir (geomembran/sıkıştırılmış kil veya geomembran/GKÖ). Aslında geçirimsiz bariyer ifadesi genel olarak kullanılan bir terimdir. Geçirimsiz bariyer sistemlerinde geomembranlar geçirimsizliği sağlayan elemanlar olarak kabul edilirken; sıkıştırılmış doğal kil zeminler ve kum-bentonit karışımları (KBK) ile GKÖ’ler düşük geçirimsizlikleri ile geomembranın altında bir tampon görevi görürler (Alston vd., 1997; Benson ve Daniel, 1990; Boardman ve Daniel, 1996; Boynton ve Daniel, 1985; Broderick ve Daniel, 1990; Daniel, 1984; Daniel vd., 1988; Day vd., 1985; Elsbury vd., 1990; Foreman vd., 1986; Kim ve Daniel, 1992). Dolayısıyla, sıkıştırılmış kil tabakaların ve GKÖ’lerin geomembranları tamamlayan ve geçirimsizliği destekleyen bir etkisi vardır.

Geçirimsizlik, geçirgenlik gibi ifadeler sıkıştırılmış doğal kil zeminler, kum-bentonit karışımları (KBK) ve GKÖ’ler için kullanılan ve bariyer performansını belirten tanımlamalardır. Bu malzemelerin geçirimsizlikleri bariyer tasarımı için izin verilen  $10^{-9}$  m/s’den daha düşük olup, geçirgenlik performansları laboratuvar ve sahada yapılan hidrolik iletkenlik deneyleri ile belirlenebilmektedir (Benson vd., 1999; Daniel vd., 1997; Daniel, 1994; Daniel, 1989). Geçirimsizliğin bu derece düşük olduğu tabakalar için laboratuvar ve sahada yapılan hidrolik iletkenlik deneyleri aylar, hatta birkaç yıl sürebilmektedir (Henken-Mellies ve Gartung, 2004; Henken-Mellies ve Schweizer, 2011; Jo vd., 2005; Katsumi vd., 2008; Scalia vd., 2014). Bariyer tasarımı için son derece önemli olan bu deneyler yapılırken dikkat edilmesi gereken hususlar vardır. Burada sunulan çalışma hidrolik iletkenlik deneylerinde dikkat edilmesi gereken hususları ve karşılaşılan problemleri ele almaktadır. Bu yapılırken kum-bentonit (KBK), zeolit-bentonit karışımları (ZBK) ve GKÖ’lerle şimdiye kadar yapılmış deneylerden elde edilen tecrübeler örnekler verilerek paylaşılmıştır.

## 2. GEÇİRİMSİZ BARIYERLER

### 2.1. Geomembranlar

Geomembranlar farklı tipte polimerlere katkıları ilave edilmesiyle fabrikada üretilen sentetik malzemelerdir. Halihazırda üretilen farklı tiplerde çok sayıda geomembran dünya piyasasında bulunsa da bunlar arasında en bilinenleri yüksek yoğunluklu (HDPE) ve lineer düşük yoğunluklu polietilen (LLHDPE) ile polivinil klorürdür (PVC). LLDPE ve PVC’nin HDPE’den ayrılan en önemli özelliği esnek olmasıdır. HDPE geomembranlar daha mukavim yapıda olup, atık depolama alanı ve maden atıklarının bertaraf edildiği tesis ve havuzlarda kullanılmaktadır. Farklı kalınlıklarda üretilen bu geomembranlar genelde 1.0-2.0 mm kalınlığında pürüzlü ve pürüzsüz yüzeylere sahip şekilde üretilmektedir. Beklendiği üzere pürüzlülük komşu malzemeyle aralarında daha iyi bir sürtünme direnci sağlanması için önemlidir (Koerner, 2005).

Geomembranlar, ilk bakışta tamamen geçirimsiz elemanlar olarak düşünülebilir, ancak bu kaplamaların suya karşı  $10^{-13}$  –  $10^{-14}$  m/s mertebesinde oldukça düşük geçirgenlikleri mevcuttur. Keza geomembranlar karbon zinciri yapısına sahip olup, bu zincir yapıdan daha küçük yapıdaki organik moleküller elek şeklindeki bu zincir içerisinden kolayca geçebilir (M. G. Park vd., 2012; M.-G. Park vd., 2012). Ayrıca, geomembranların kullanımı 1980’li yılların sonunda yaygınlaşmaya başlamıştır. Biliminsanlarınca plastiklerin doğada birkaç bin yıl kalabileceği ifade edilmiş olsa da geomembranların uzun dönem etkileri ancak son 20 yıllık bir süre için bilinebilmektedir (Ewais vd., 2018; McWatters vd., 2016; Rowe vd., 2003; Rowe ve Hoor, 2009). Dolayısıyla uzun dönemde maruz kalacağı dış etkiler nedeniyle geomembranların gelecekte durabilitesini ve buna bağlı geçirimsizliğini koruyup koruyamayacağı öngörülemezdir. Buna ilave olarak geomembranların geniş alanlarda uygulanması sırasında üzerinde delikler oluşması gayet doğal kabul edilen bir olaydır (Cartaud vd., 2005; Rowe ve Fan, 2021). Geomembran üzerinde birkaç delik olabileceği gibi onlarca farklı çapta delik de bulunabilmektedir (Koerner, 2005). Tüm bu nedenlerden ötürü geomembranları tek başına kullanmak uzun dönem için risk teşkil edebileceğinden bu sentetik tabakayı sıkıştırılmış veya fabrikada üretilmiş bir kil tabaka ile tamamlamak genel kabul gören bir uygulamadır.

### 2.2. Sıkıştırılmış Kil Tabakaları ve Kum-Bentonit Karışımları (KBK)

Genel olarak geomembranların altına doğal kil zemin tabakası serip sıkıştırmak 1980’li yıllardan beri yapılan bir uygulamadır. Aslında burada kullanılan kil tabakası bir nevi tampon görevi görmek ve 0.6-1.0 m arasında

bir kalınlığa sahip olmasıyla geçirimsizliği pekiştirmektedir (Koerner, 2005; Qian vd., 2002). Dünyada doğal kil zemin tabakalarının sıkıştırılarak kullanılmasına hala devam edilse de bu tabakaların kullanımının kendi içerisinde birtakım handikapları vardır. Bunlardan birincisi ocaktan sağlanan kilin özellikleri değişken olabilir. Birkaç hektar alan üzerine kurulacak bir atık depolama sahası için ocaktan aynı özelliklere sahip kil elde edebilmek oldukça güçtür. Her ne kadar bunun için uygulama öncesinde kalite kontrol deneyleri yapılsa da bu kontroller geniş alanlar içinde sınırlı sayıda yapılabilmektedir. İkinci sebep de kilin yüksek plasisiteli olması durumunda tabaka yüksek hacimsel büzölmeye sahip olur. Bu durumda, özellikle ıslatma kurutma döngülerinden sonra, sıkıştırılmış kil tabaka üzerinde çatlaklar oluşmaya başlar (Kleppe ve Olson, 1985).

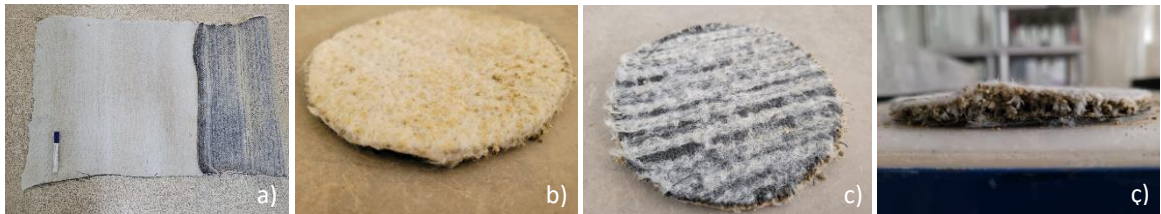
Hacimsel büzölmeyi azaltmak için doğal kil zemin yerine kum-bentonit karışımlarının (KBK) kullanılması önerilmektedir (Chapuis, 1990, 2002; Kenney vd., 1992; Kleppe ve Olson, 1985). Bentonit, kum daneleri arasındaki boşlukları tıkayarak geçirgenliği azaltırken, kum da hacimsel büzölmeyi sınırlayan bir etkiye sahiptir. Bu nedenle sıkıştırılmış kil tabakaları yerine yapay olarak meydana getirilen, ancak kullanıldığında tabaka içinde homojenlik sağlayan bir tabaka elde edilmektedir. Bentonitin tipine, montmorillonit içeriğine ve aktive edilip edilmediğine bağlı olarak karışım içine toplam ağırlığın azami %20'si kadar bentonit konularak (%80 kum ve %20 bentonit) bu karışımlar hazırlanıp uygulanabilir (Abichou vd., 2002; Alston vd., 1997; Haug ve Wong, 1992; Komine, 2004; Sällfors ve Öberg-Högsta, 2002; Stern ve Shackelford, 1998).

KBK'ye ilave olarak ülkemiz araştırmacıları tarafından zeolit-bentonit karışımlarının (ZBK) kullanılabilirliğine yönelik araştırmalar da yapılmıştır (Kaya vd., 2006; Kaya ve Durukan, 2004; Kayabalı, 1997; Kayabalı ve Kezer, 1998; Ören vd., 2011, 2014). Bentonitin kullanıldığı daha başka karışımlar var olup bu karışımların genel adı "bentonitli karışımlar" olarak ifade edilmektedir.

### 2.3. Geosentetik Kil Örtüler (GKÖ)

Sıkıştırılmış kil tabakalara alternatif başka malzemeler de vardır. Bu malzemelerden en bilineni geosentetik kil örtülerdir (GKÖ). İki geotekstil arasına bentonit yerleştirilerek oluşturulan bu sentetik malzemeler fabrikada üretilmektedir (Estornell ve Daniel, 1992; Petrov vd., 1997; Petrov ve Rowe, 1997; Ruhl ve Daniel, 1997). Bu iş için başlangıçta sodyum katkılı bentonitler) kullanılırken (Na-bentonit, günümüzde GKÖ içerisinde polimer katkılı bentonitlerin kullanılması yaygınlaşmaya başlamıştır (Ashmawy vd., 2002; Athanassopoulos vd., 2015; Chen vd., 2019; De Camillis vd., 2016; Li vd., 2021; Ozhan, 2018; Ören vd., 2017; Rowe ve Hamdan, 2021; Salemi vd., 2019; Scalia vd., 2011; Scalia vd., 2014; Scalia ve Benson, 2017; Wireko vd., 2022; Zainab vd., 2021).

Üretim esnasında örgülü geotekstil üzerine bentonit yerleştirilir. Bentonitin üzerine örgüsüz geotekstil yerleştirildikten sonra iğneleme işlemi uygulanır (Şekil 2a-ç). Ters çentikli iğnelerin kullanıldığı bu işlemde geotekstilleri birbirine tutturmak için ilave ip kullanılmaz. İğneleme esnasında örgüsüz geotekstilin lifleri iğnelerin çentiklerine takılır ve iğneler bentonit ve örgülü geotekstili geçerek lifleri örgülü geotekstil üzerine bırakır. Böylece bentonitin iki geotekstil arasına hapsedildiği kompozit bir yapı oluşur. Bentonitin iki geotekstil arasına kimyasal yapıştırma ile tutturulduğu GKÖ'ler de vardır, ancak bu GKÖ'ler yatay yüzeylerde sızdırmazlık elemanı olarak kullanılır (Koerner, 2005). Zira yapıştırılarak üretilen bu GKÖ'lerin arayüzey sürtünme açıları oldukça düşük (4-8°) olduğu için 1:3 (18.4°) veya 1:2 (26.6°) eğimle inşa edilen yüzeylerde kullanılamazlar. Bu nedenle dünyada iğnelenerek üretilmiş GKÖ'lerin kullanılması daha yaygındır.



Şekil 2. Geosentetik kil örtü (GKÖ) genel görünümü: a) rulodan kesilmiş örgüsüz geotekstil yüzü, b) rulodan kesilmiş örgülü geotekstil yüzü ve c) iki geotekstil arasında var olan Na-bentonit

GKÖ'ler'in en önemli özelliklerinden birisi ince yapıda olmalarıdır (Şekil 2ç). 5-10 mm kalınlıkta üretilen bu malzemeler, yerleştirildiği zeminden suyu emerek şişerler. Aslında şişmeyi yöneten kısım GKÖ'nün bentonit

bileşenidir. Dolayısıyla bentonit şişmek istemesine rağmen, liflerin varlığı sebebiyle ancak sınırlı bir hacim içerisinde şişebilir. Böylece bentonit parçacıkları arasındaki boşluklar iyice küçülerek akış kanallarını daraltır. Nihayetinde geçirgenliği oldukça düşük olan bir malzeme ortaya çıkar ( $2.0 \times 10^{-11}$  m/s).

Sıkıştırılmış kil tabakalar ile kıyaslandığında GKÖ'lerin hidrolik iletkenlikleri genellikle bir merteye daha düşüktür. Buna ilave olarak GKÖ fabrikada üretildiğinden daha homojen bir yapıya sahiptir ve sahada uygulaması daha kolaydır. Rulolar halinde sahaya getirilen GKÖ'ler, ruloların açılmasıyla kolayca serilebilir. 0.15 m bindirme boyu uygulanarak tüm saha GKÖ'lerle kısa süre içerisinde kaplanabilir (Daniel vd., 1997). Diğer yanda sıkıştırılmış kil tabakalarında veya bentonitli karışımlarda optimum su içeriğinin %2-3 ıslak tarafında kalacak şekilde su içeriğinin ayarlanması ve sıkıştırmanın bu koşullar altında gerçekleştirilmesi tavsiye edilir (Daniel, 1994; Daniel vd., 1988; Day vd., 1985; Foreman vd., 1986). Oldukça büyük sahalar için bunu sağlayabilmek güç olup atmosfer şartları göz önüne alındığında su içeriği kolaylıkla optimumun kuru tarafına geçebilir. Bu durumda hidrolik iletkenlik birkaç merteye artarak izin verilen  $10^{-9}$  m/s'nin üzerine çıkabilir. Dolayısıyla geniş alanlarda aynı kalitede uygulamanın yapılması doğal kil zeminler veya bentonitli karışımlar için güçtür.

Atık depolama sahası düşünüldüğünde ise işletme açısından GKÖ'nün sağladığı önemli bir avantaj daha vardır. Sıkıştırılmış doğal kil zemin ve bentonitli karışımların kalınlıkları uygulamada 0.6m ile 1.0m arasında değişmektedir. Örneğin bir hektarlık ( $10,000 \text{ m}^2$ ) bir alan üzerinde 1.0 m kalınlığında bir bariyer oluşturmak toplamda  $10,000 \text{ m}^3$  lük bir hacim anlamına gelir. Oysa sıkıştırılmış kil tabaka yerine 0.01 m (10 mm) kalınlığa sahip GKÖ aynı alanda kullanıldığında  $100 \text{ m}^3$  bir hacim ortaya çıkar. Bu tek bariyerli bir sistem için (tek bir geomembran/sıkıştırılmış kil tabakası yerine geomembran/GKÖ kullanılması)  $10,000 - 100 = 9,900 \text{ m}^3$  lük, çift bariyerli bir sistem için (geomembran tabakası ve altında GKÖ (1. Bariyer) ve geomembran tabakası ve altında GKÖ (2. Bariyer) kullanılması)  $19,800 \text{ m}^3$  lük bir ilave depolama hacmi anlamına gelir ki bu durum işletme açısından daha uzun süre boyunca buraya depolama yapılabileceğini gösterir.

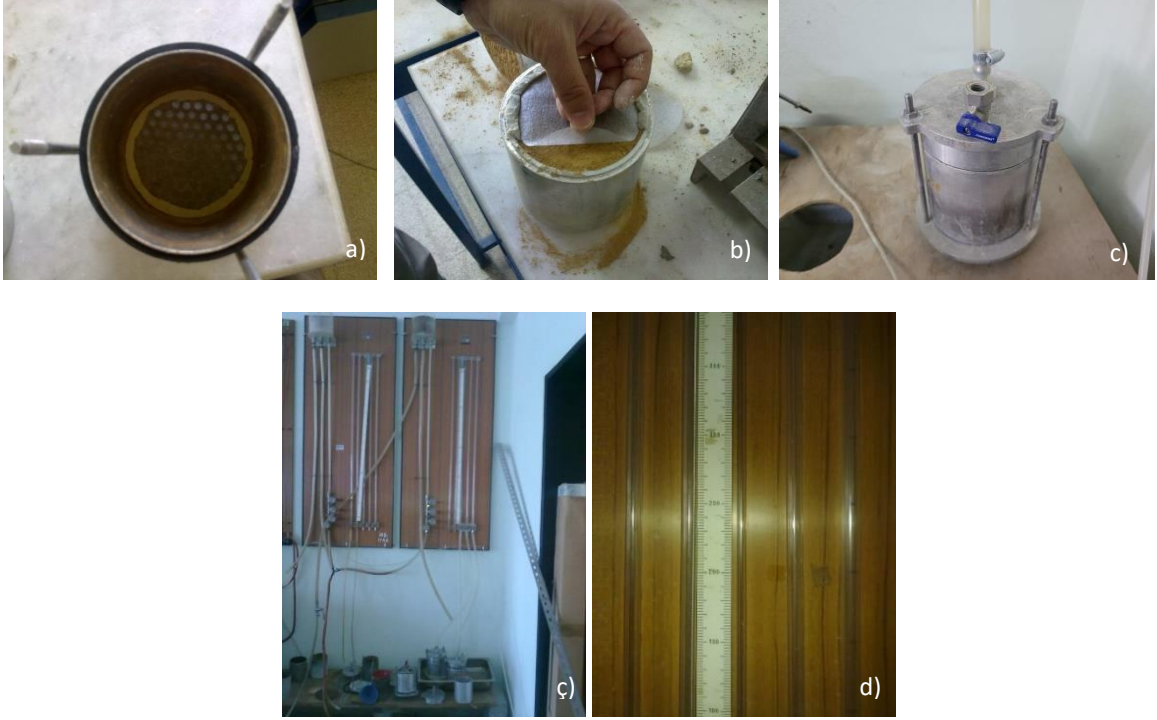
Doğal kil zemin, KBK veya GKÖ'den hangisi seçilip kullanılırsa kullanılsın, birkaç aday malzemenin önce laboratuvara transfer edilmesi ve geoteknik tanımlama deneyleri tamamlandıktan sonra hidrolik iletkenlik deneylerinin yapılması gerekmektedir. Genelde suyun kullanıldığı bu deneylerde alana özel sıvılarla (bariyerin temas sağlayacağı sıvılar) deneylerin yapılması tavsiye edilir. Bu deneylerden sonra aday malzemeler içerisinden geçirimsizliği en düşük malzeme belirlenerek yerinde uygulanması önerilebilir. Seçilen malzeme uygulandıktan sonra sahada yapılacak hidrolik iletkenlik deneyleri ile laboratuvarla elde edilen değerlerin ve imalatın uygun yapılıp yapılmadığının teyidi sağlanır.

### 3. LABORATUVAR HİDROLİK İLETKENLİK DENEYLERİ

#### 3.1. Sabit Duvarlı Permametre

Hidrolik iletkenlik deneyleri sabit ve esnek duvarlı permametre hücreleri ile yapılır. Sabit duvarlı permametre hücrelerinin farklı özelliklere sahip olanları vardır, ancak bariyer özelliğinin belirlendiği hücreler daha ziyade sıkıştırma (kompaksiyon) kalıbına benzer (Şekil 3a) (Daniel, 1994). Bu hücrelerle deney yapmak kolaydır. Kalıp içerisine killi doğal malzeme veya karışım sıkıştırılır (Şekil 3b). Kalıbın üstü kapatılır. Üst kalıpta sıvı girişi için genelde iki kanal bulunmaktadır. Kanallardan biri, içi su dolu bir pleksicam boruya (büret) hortumla bağlanırken, diğeri açıkta bırakılır (Şekil 3c). Pleksicam boruya bağlanan kanalda akış yavaş olacağı için düşen seviyeli yöntem ile deney yapılır (Şekil 3ç). Bu yöntemde pleksicam boru içindeki su seviyesi zamanla alçalırken bunu takip etmek için boru bitişiğine bir (cetvel) yerleştirilir (Şekil 3d). Hücre içindeki sıkıştırılmış kilin veya karışımın kurumaması için hücre belirli bir seviyeye kadar su dolu bir kap veya hazne içerisine yerleştirilir. Eğer giriş ve çıkış debileri ölçülmek istenirse, Şekil 3a'da gösterilen hücre tabanındaki deliklerin tamamını içine alan bir huni yapıştırılıp, sızdırmazlık kontrolü yapıldıktan sonra huni ağzına suyu toplayan bir cam mezür konur. Deneye başlarken önce hortumun bağlı olduğu kanal açılır. Daha sonra üst başlıktaki ikinci kanal da açılarak üst başlık ile sıkıştırılmış örneğin üst yüzeyinde oluşan hava kabarcıkları dışarı çıkarılır (Şekil 3c). Genelde suyun dışarı atıldığı bu kanala da bir hortum takılarak etrafın ıslanması önlenir ve drenajın bir kovaya veya lavaboya doğru olması sağlanır.

Sabit duvarlı permametre hücrelerinin çeşme suyu ve/veya damıtık su (deiyonize su) ile yapılan deneylerde kullanılması tavsiye edilir. Zira killi karışımlar su ile şişerek kalıp iç çeperine doğru basınç uygular. Killerin etrafını saran adsorbe su tabakalarının kalınlığı suda fazladır. Bu tabaka içindeki su hareketsiz kabul edilir ve sızma adsorbe su tabakaları arasındaki küçük boşluklardan meydana gelir. Killi karışım şişip kalıp iç çeperine iyice temasını arttırdığından kalıp ile zemin arayüzünden sızma meydana gelmez. Buna "kenardan sızma" adı verilir ve sabit duvarlı permametrelerin en büyük olumsuzluklarından biridir (Daniel, 1994). Barajlarda kil çekirdek performansı ve orman içi yangına müdahale amaçlı yapılan gölet tabanındaki malzemenin geçirimsizliği belirlenmek istendiğinde sabit duvarlı permametre hücreleri kullanılabilir. Diğer bir deyişle, suyun depolandığı yerlerde su ile sızma gerçekleşeceğinden pratik ve ucuz olması açısından bu hücrelerin kullanılması uygundur.



Şekil 3. Sabit duvarlı permametre hücresi ve deney düzeneği: a) deney hücresi, b) örneğin kalıp içerisine sıkıştırılması, c) hücrenin son hali, ç) deney düzeneği, d) cam boruların genel görüntüsü

Diğer yanda, organik içerikli sıvılar ve/veya orta-yüksek konsantrasyonlu tuz çözeltilerine karşı bariyer performansı belirlenmek istendiğinde sabit duvarlı permametreler oldukça yanıltıcı sonuçlar verebilir (Boynton ve Daniel, 1985; Daniel vd., 1988; Day vd., 1985). Bu sıvılarla karşılaştığında, kil parçacıkları etrafındaki adsorbe su tabakası kalınlığı önemli miktarda azalır. Bu durum parçacıklar arasındaki boşlukları arttırırken sıkıştırılmış kil malzemenin (veya karışımın) kalıptan ayrılmasına da sebep olur. Hidrolik iletkenliğin artmasının beklendiği bu durumda daha yüksek miktarda sızma gerçekleşir, ancak sabit duvarlı permametre hücresi kapalı bir sistem olduğu için bu sızmanın kenardan mı yoksa parçacıklar arasındaki boşluklardan mı gerçekleştiği bilinemez. Eğer kenardan sızma gerçekleşmişse, olduğundan daha yüksek hidrolik iletkenlik değerleri elde edilir ki bu da bariyer için kullanılması planlanan malzemenin elenmesi (kullanılmaması) gerektiği sonucunu doğurabilir. Kenardan sızmayı minimize etmek için hücrenin alt kısmına bir iç hücre yapılması önerilir. Ancak, bunun da kenardan sızmayı tamamen önleyeceği hususu belirsizdir.

Sabit duvarlı permametrelerin en büyük avantajı ucuz ve kolay uygulanabilir olmasıdır. Kenardan sızmanın meydana gelmesi bu hücrelerin en büyük dezavantajlarından biri olup uygulanan gerilmelerin deney sırasında kontrol edilememesi ve geri basınç uygulanamaması gibi diğer bazı etkenler de bu hücrelerin mühendislik ve araştırma amaçlı kullanılmasını sınırlamaktadır. Bu nedenle bariyer malzemesinin hidrolik iletkenliği için esnek duvarlı permametrelerin kullanılması tercih edilmektedir.

### 3.2. Esnek Duvarlı Permametre

Esnek duvarlı permametre sistemi bir deney hücresi ve basınç panelinden oluşan bir yapıya sahiptir. Permametre hücresi üç eksenli basınç hücresine benzemekle birlikte bu hücrelerde düşey eksenel yük uygulayacak bir piston olmadığından görece daha basittir. Hücre duvarı genel olarak pleksicamdan imal edilir. Daha büyük permametre hücreleri yapılmak istendiğinde hücre duvarının pleksicam imal edilmesi daha pahalı ve zahmetli olduğundan alüminyum esaslı bir duvar kullanılması tercih edilir. Hücre içerisine yerleştirilen zemin numunesinin çevresine lateks membran geçirilip bu membran alt ve üst başlıklara ikişer O-halka ile tutturulduğundan bu permametrenin adına “esnek duvarlı” adı verilmektedir. Zemin numunesi hücre basıncı altında zamanla şekil değiştirebileceğinden esnek yapıdaki lateks membran hacimsel şekil değişimini takip ederek kenardan sızmanın önüne geçmiş olur (Daniel, 1994). Bu nedenle esnek duvarlı permametre hücrelerinde kenardan sızmanın pratik olarak gerçekleşmediği kabul edilir. Hücre duvarının oturduğu alt başlıkta toplam beş adet kapalı sıvı kanalı bulunmaktadır. Bu kanallardan ikisi numunenin oturduğu alt başlıktaki kanala, ikisi de üst başlıktaki kanala bağlanırken biri de hücre basıncı kanalına bağlanmaktadır. Alt ve üstte bulunan kanallardan birer adedi sıvı giriş ve çıkışı vazifesini görürken, diğerleri deneye başlamadan önce sıvı içerisindeki havayı dışarı atmak için kullanılmaktadır. Diğer bir deyişle, deney sırasında üç kanal aktiftir. Bunlardan biri hücre basıncı için kullanılırken diğerleri sıvı giriş ve çıkış kanallarını oluşturmaktadır (Şekil 4a).

Numune hücre içerisine yerleştirilip, hücre su ile doldurulduktan sonra esnek duvarlı permametre bir basınç paneline bağlanır. Bir panel üzerinde toplam üç adet cam boru bulunmaktadır. Bu borulardan biri hücre üzerindeki hücre basıncı kanalına, diğer ikisi de numunenin giriş ve çıkış kanallarına bağlanmaktadır (Şekil 4b). Panel içindeki cam boruların tamamında su bulunması gerekmektedir. Hiçbir suretle panele başka sıvı girişine müsaade edilmemelidir. Aksi takdirde panel deney sıvısı ile kirlenmiş olacağından cam boruların temizlenmesi işi oldukça zahmetlidir. Sudan başka sıvılarla deney yapıldığında panel-hücre arasına keseli akümülatörler (bladder accumulator) yerleştirilmektedir. Hem giriş hem de çıkış kısmı düşünülduğünde bu iki akümülatöre ihtiyaç duyulmaktadır (Daniel, 1994). Panelde kullanılan suyun havasının alınması için de geri basınç hücresi bu sisteme eklenmektedir. Basınç paneli üzerindeki vanalardan (regülatör) kanallardaki basınç ayarlanabilir ve akış istenildiği gibi başlatılabilir.



Şekil 4. a) Esnek duvarlı permametre hücresi ve b) paneli

TS EN ISO 17892-11 Bölüm 11’de geçirimsizlik deneyleri ile ilgili bir standart bulunmaktadır. ASTM’de esnek duvarlı permametrelerin kullanıldığı üç ayrı standart vardır (ASTM D5084, D6766, D7100). Bu standartlardan ikisi sıkıştırılmış zemin numuneleri içinken (D5084 ve D7100) diğeri GKÖ’nün hidrolik iletkenliğinin belirlenmesine yöneliktir (D6766). Özellikle D6766 ve D7100 sudan farklı sıvılarla yapılacak deneylerde panel ve hücre arasına keseli akümülatörler yerleştirilmesini konu eder.

Esnek duvarlı permametre ile hidrolik iletkenlik deneyi yapmak sabit duvarlı permametrelere kıyasla hem daha karmaşık hem de daha zahmetlidir. Ayrıca, deney düzeneği ve deney sırasında kullanılan malzemeler (lateks membran, O-halka, hortum vb.) nedeniyle daha pahalıdır. Esnek duvarlı permametre düzeneği ile ancak bir adet deney yapılabileceğinden çoklu deneylerin aynı anda yapılması gerektiği durumda daha fazla panele ihtiyaç vardır. Aslında, bir bariyer tasarımı yapılacağı veya araştırma amaçlı çalışma yürütüldüğünde birçok deneyin aynı anda yapılması söz konusu olmaktadır. Her bir panel hem oldukça pahalı hem de laboratuvarında önemli bir yer kaplamaktadır. Bunun için ayrı ayrı paneller yerine bazen üzerinde altı cam borunun yerleştirildiği paneller de kullanılmaktadır, ancak bu paneller de laboratuvarında önemli bir yeri işgal etmektedir (Şekil 5a). Özellikle GKÖ ile yapılan deneylerde geri basınç uygulanmasına çoğu zaman gerek olmayabilir. Bu nedenle bir panel ile aynı anda pek çok deney gerçekleştirilebilir. Bunun için panelin hücre basıncı kanalından tüm hücelere basınç verilirken, her bir hücre için ayrı bir cam boru bir askı aparatı üzerine yerleştirilir. Askı aparatı laboratuvar olanakları ile basitçe yapılabilen ve cam boruların üzerine yerleştirilmesini sağlayan bir çerçeve sistemdir. Her bir hücrenin çıkış kanalına da ölçekli cam boru yerleştirilerek ölçümler alınabilir. Panel üzerinde yer alan diğer iki cam boru da farklı hücre basıncı ile deney yapılmak istendiğinde kullanılabilir. Bu şekilde paneli kullanmak çok etkili bir çözüm sağlayarak pek çok deneyin aynı anda yürütülmesine ve veri elde edilmesine olanak sağlar. Dokuz Eylül Üniversitesi (DEÜ), İnşaat Mühendisliği, Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda bu amaçla oluşturulmuş permametre düzenekleri bulunmaktadır (Şekil 5b-ç). Şekil 5b'de gösterilen hücre 150 mm çaplı numunelerin deneyinin yapılması için kullanılırken, Şekil 5c ve Şekil 5ç'deki gri renkli hücreler 100 mm çaplı numunelerin hidrolik iletkenliklerinin belirlenmesi için tasarlanmıştır. Laboratuvarında ekibimiz tarafından tasarlanıp imalatı yaptırılan esnek duvarlı permametre hücreleri 50 adedin üzerindedir.



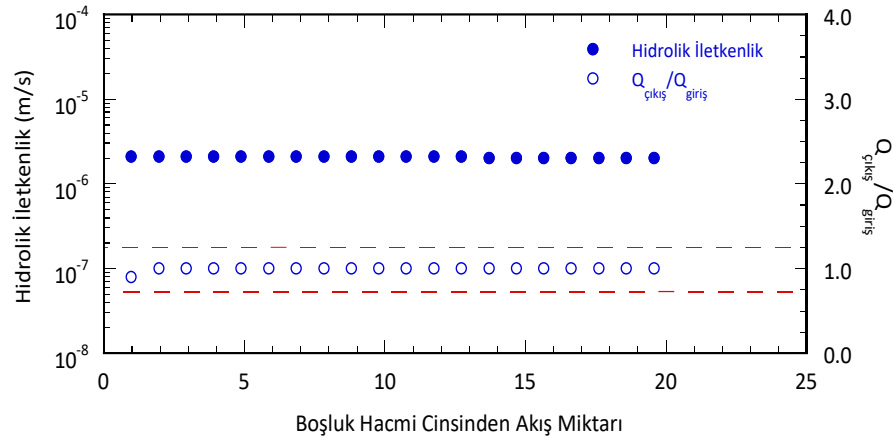
Şekil 5. a) İki deneyin yapılabileceği panel sistemi, b-ç) Dokuz Eylül Üniversitesi (DEÜ), İnşaat Mühendisliği, Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda kullanılan esnek duvarlı permametre hücrelerinden bir görünüm



## 4. HİDROLİK İLETKENLİK DENEYLERİNDE DİKKAT EDİLECEK HUSUSLAR

### 4.1. Esnek Duvarlı Permametre Hücresinin Ölçüm Kapasitesinin Belirlenmesi

Esnek duvarlı permametrelerle hidrolik iletkenlik deneylerine başlamadan önce bu permametrelerin ölçebileceği üst limitin belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla permabilite katsayısı bilinen bir örgüsüz geotekstil hücreye yerleştirilir ve kenarları bentonit ile kapatılır. Membran ve O-halka yerleştirilip, hücre su ile doldurulduktan sonra permametre basınç paneli sistemine bağlanarak hücre basıncı verilir. Su geotekstilden hızlı geçeceği için pek çok kez panel üzerindeki cam borular doldurularak seviye ölçümü yapılır. Yapılan ölçüme bir örnek Şekil 6'da gösterilmiştir. Permabilite katsayısı 30 mm/s ( $3.0 \times 10^{-2}$  m/s) olduğu bilinen örgüsüz geotekstilin esnek duvarlı permametrede geçirgenliği (iç çapı 4 mm dış çapı 6 mm olan hortumlar kullanıldığı durumda)  $2.0 \times 10^{-6}$  m/s olarak ölçülebilmektedir. Bu durum esnek duvarlı permametre düzeneği ile ancak bu mertebeye kadar güvenilir ölçümler alınabileceği anlamına gelmektedir. Bundan daha yüksek değerlere sahip olduğu bilinen örnekler için hortum ve hortumların girdiği ağzaların çapları bir miktar arttırılabilir, ancak bu durumda da yukarıda bahsedilen deneyin tekrar edilerek yeni durum için ölçüm kapasitesinin belirlenmesi gerekmektedir. Bariyer tasarımında  $10^{-9}$  m/s'den daha düşük değerlere ulaşılması hedeflendiğinden  $2.0 \times 10^{-6}$  m/s'lik ölçüm kapasitesi izin verilen üst sınır değer ile kıyaslandığında 2000 katına kadar ölçüm yapılabileceğini göstermektedir. Bu nedenle, laboratuvarında bu çapa sahip hortum ve bağlantı aparatları kullanılması yeterli görülmektedir.



Şekil 6. Örgüsüz geotekstilin esnek duvarlı permametre ile hidrolik iletkenliğinin belirlenmesi ve bu suretle permametrenin ölçüm kapasitesinde üst sınırın ortaya konması.

### 4.2. Efektif Gerilme ve Hidrolik Eğim

Atık depolama sahalarında bariyerler tabanda, şevlerde ve örtü vazifesinde üstte kullanılmaktadır. Taban ve şevlerde kullanılan bariyerler kullanım ömürleri boyunca hem üzerine yerleştirildiği zeminle hem de atık kaynaklı sızıntı suyu ile etkileşim halinde olurlar. Bunun sonucu olarak bariyer malzemesi ile zemin/sızıntı suyu arasında katyon alış-verişi gerçekleşir ve genellikle bariyer malzemesi bu durumdan olumsuz etkilenir. Bu nedenle taban ve şevde kullanılacak bariyerlerin performansları belirlenirken hidrolik iletkenlik deneyleri yüksek efektif gerilme koşulları altında yapılabilir. Örneğin, depolama sonucunda 50 m yüksekliğe ulaşacak atıkların taban bariyeri üzerinde oluşturacağı gerilme yaklaşık 400 kPa'dır ( $\sigma_{\text{atık}} = H_{\text{atık}} \times \gamma_{\text{atık}} = 50 \times 8 = 400$  kPa). Diğer yanda, atık depolama sahası doldurulduktan sonra üstünün çevreden izole edilecek şekilde yine bariyer sistemi ile kapatılması gerekmektedir. Bu durumda bariyer üzerinde yeşillendirme amaçlı yaklaşık 1.0 m yüksekliğinde bir nebati toprak tabakası yerleştirilmektedir. Bu durumda örtü bariyerinin üzerine yaklaşık 18 kPa'lık bir gerilme uygulanmış olur. Efektif gerilme arttırıldıkça bariyer içindeki boşluk oranı azalacağından bariyerin hidrolik iletkenliği de azalmaktadır. Dolayısıyla bariyer tasarımında efektif gerilme açısından en olumsuz durum, diğer bir deyişle en kötü senaryo, bariyerin örtüde kullanılması halinde meydana gelmektedir. Bu nedenle hidrolik iletkenlik deneyleri yapılırken bu durum dikkate alınır ve deneyler düşük efektif gerilme altında gerçekleştirilir. Deneyler, kimyasal sıvılarla yapılsa da düşük efektif gerilme altında performans belirlenir.

Esnek duvarlı permametrelerle deney yaparken genellikle uygulanan efektif gerilmenin ortalaması rapor edilmektedir. Örneğin 30 kPa efektif gerilme altında bir deney yapılması planlanıyorsa hücre basıncı ile giriş ve çıkış kanallarına (bu aynı zamanda boşluk suyu basıncı demektir) uygulanan basınç arasında 30 kPa fark olması gerekmektedir. Geri basıncın uygulandığı durumda önce hücre basıncı 50 kPa ayarlanmışsa giriş ve çıkış basınçları da 20 kPa olmalıdır. Hücre basıncı toplam gerilme, giriş ve çıkış basınçları da boşluk suyu basıncı olacağından aradaki fark efektif gerilmeyi vermektedir. Sıkıştırılmış numuneyi doyurmak ve panel sistemi ile hortumlardaki suyun içinde hapsolmuş havayı çözmek için tüm basınçların kademeli bir şekilde yavaş yavaş arttırılması gerekmektedir. Genelde arttırılma adımı 50 kPa'dır ve her kademede 1-4 saat arası beklenmesi tavsiye edilir. Arttırma sınırı bariyer malzemesinin (sıkıştırılmış doğal kil zemin veya bentonitli karışım) doygunluk derecesine bağlı olarak belirlenir (ASTM D5084). Burada hücre basıncının 400 kPa'ya kadar arttırıldığını farz edersek, giriş ve çıkış basınçlarının 370 kPa olması gerekmektedir. Buraya kadar uygulanan basınçlar numuneyi ve sistemde var olan suyun içindeki havayı çözmek için yapılmaktadır. Giriş ve çıkış basınçları aynı olduğundan akışın başlatılabilmesi için giriş veya çıkış basınçlarından birinin düşürülmesi gerekmektedir. Burada iki görüş vardır. Birinci görüş akışın aşağıdan yukarıya doğru olmasının numunenin içinde eğer hala hava kalmışsa süpürülerek dışarıya atılmasına yardımcı olacağını söylerken, diğeri akışın yukarıdan aşağıya olmasının bariyerin gerçekte karşılaşıacağı durumu daha doğru resmettiğini belirtmektedir. Akış hangi yöne olursa olsun kanallardaki basınçlardan birinin 360 kPa'ya düşürüldüğü göz önüne alınırsa, numunenin bir ucunda efektif gerilme  $400-370=30$  kPa, diğeri ucunda  $400-360=40$  kPa olacaktır. Bu durumda ortalama efektif gerilme  $(30+40)/2=35$  kPa olmalıdır. Deney boyunca gerilmeler değiştirilebilir. Her durum için ortalama efektif gerilme ( $\sigma'_{ort}$ ) aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir:

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

Burada  $\sigma_{hücre}$  hücre basıncını,  $\sigma_g$  hücre girişine bağlı ölçekli cam borudaki su basıncını,  $\sigma_{\zeta}$  de çıkış ağzına bağlı ölçekli cam borudaki su basıncını göstermektedir.

Hidrolik iletkenlik deneylerinde hidrolik eğimin ( $i$ ) belirlenmesi gerekir. Atık depolama sahalarında hidrolik eğimin çok düşük olduğu (1-5) bilinmektedir, ancak laboratuvarında düşük hidrolik eğim değerlerinin kullanılması deney süresini uzattığından pratik kabul edilmez. 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 engelleyebilir. Bu nedenle özellikle kil ihtiva eden zeminlerde hidrolik eğimin en fazla 30 olması tavsiye edilir (ASTM D5084). Esnek duvarlı permametreler kullanıldığında hidrolik eğim aşağıdaki denklem ile hesaplanabilmektedir:

$$i = \frac{\frac{\sigma_g - \sigma_{\zeta}}{2}}{H_{ze\ min}} \gamma_{su} \quad (2)$$

Bu denklemde  $\gamma_{su}$  suyun birim hacim ağırlığını,  $H_{ze\ min}$  de sıkıştırılmış zemin yüksekliğini temsil etmektedir.

Yukarıdaki örnekten yola çıkarak  $H_{ze\ min}$ 'nin 100 mm=0.1m olduğu kabul edilirse  $i = [(370-360)/10]/0.1=10$  olmaktadır. Görüldüğü üzere sıkıştırılmış bir örnek için hidrolik eğim 10 iken bu örneğin  $H_{GKÖ}=10$  mm=0.01 m kalınlığında bir GKÖ olması durumunda aynı basınç şartlarına rağmen hidrolik eğim 100 çıkmaktadır. Bazen eğim değerleri GKÖ'ler için 200'lere kadar çıkabilmektedir. Dolayısıyla GKÖ'ler için hidrolik eğim değeri ASTM D5084'te belirtilen değer aralığından çok yüksektir; ancak, Shackelford vd. (2000) GKÖ'ler üzerinde yaptıkları çalışmada hidrolik eğimin, hidrolik iletkenlik üzerine etkisinin sınırlı olduğunu ortaya koymuşlardır. Zira GKÖ'de bentonitin daneler arasındaki boşlukları tıkanması gibi bir durum söz konusu değildir, ancak yüksek hidrolik eğimlerde bentonit geoteksiller arasından süpürülebilir. Bu nedenle GKÖ'lerin bariyer performansı belirlenmek istendiğinde hidrolik eğimin mümkün olduğunca düşük değerlerde tutulması tavsiye edilmektedir.

### 4.3. Hidrolik İletkenlik

Hidrolik iletkenlikler, zaman içinde ölçekli cam tüpler içindeki su seviyelerinde meydana gelen değişimler kaydedilerek Denklem 3 ile hesaplanabilir:

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

Burada k permabilite katsayısını, a ölçekli cam boru enkesit alanını, A numune enkesit alanını,  $\Delta t$  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 davranışı zaman ekseninde ifade edilmekten ziyade numune içindeki boşluk hacimleri dikkate alınarak “boşluk hacmi cinsinden akış miktarı (BHCAM)” ile gösterilir. Bunun nedeni aynı anda iki numunenin (veya daha fazla) hidrolik iletkenliklerinin uyumlu bir şekilde karşılaştırılabilmesi içindir. Örneğin numunelerden birinin hidrolik iletkenliği yüksekse, bunun deneyi birkaç gün içinde bitebilir. Düşük geçirimsizliğe sahip numunenin deneyinin de bir yıl sürdüğü göz önüne alınırsa zaman eksenli bir gösterimde yüksek geçirimsizliğe sahip numunenin verisi nokta olarak gözükecektir. Diğer yanda her iki numuneden karşılaştırılabilir ölçüde sıvı akışı gerçekleşmiş olabilir. Bu nedenle BHCAM’ye bağlı değerlendirme daha yaygın kullanılan bir gösterim şeklidir. Deney sırasında numune içinden geçen su miktarının hacmi, numunenin boşluk hacmine oranlanarak belirlenir ve bu değerler eklenik biçimde toplanarak hidrolik iletkenlik sonuçları BHCAM ekseninde verilerek davranış elde edilmiş olur.

### 4.4. Numune Hazırlama

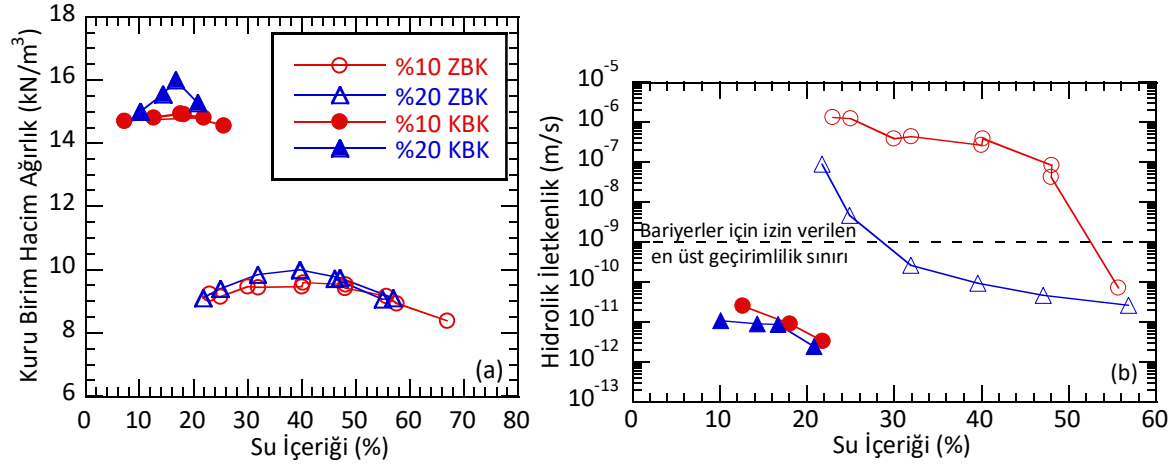
#### Sıkıştırılmış Doğal Kil Zemin ve Bentonitli Karışımlar

Bariyer malzemesi olarak doğal kil zemin veya bentonitli bir karışım seçildiğinde bu malzemenin hangi su içeriğinde sıkıştırılıp serileceği tasarım açısından çok önemlidir. Hidrolik iletkenlik, optimum su içeriğinin kuru kısmında birkaç merteye daha yüksek, ıslak kısmında da daha düşüktür (Holtz vd., 2011). Atık depolama sahaları gibi sıkıştırılacak malzemenin yoğun olarak kullanılacağı yerlerde bu imalatlar genelde sıcak mevsimlerde yapılır (genelde yaz ayları). Sıkıştırılacak malzemeye su ilave edilirken optimum su içeriği hedeflenmez. Zira optimum su içeriğinde hazırlanmış bir malzemenin serilip sıkıştırılması esnasında buharlaşma meydana gelme ihtimali fazladır ve bu nedenle su içeriği kolayca optimumun kuru tarafına geçebilir. Bu durumda hidrolik iletkenliğin de artması beklenmektedir. Bu durum nedeniyle bariyer malzemelerinin su içerikleri optimum su içeriğinin %2-3’ü kadar ıslak tarafta olacak şekilde hazırlanıp sıkıştırılır.

Benzer şekilde laboratuvar deneyleri yapılırken malzemenin su içeriği, optimumun ıslak tarafında kalacak şekilde hazırlanır. Killi malzemenin su içeriği ayarlandıktan sonra genelde bir poşet içinde bir gece bekletilmesi ve suyun homojen biçimde numune içine dağılması sağlanır. Ertesi gün çıkarılan numune tekrar güzelce karıştırılır ve belirli bir sıkıştırma enerjisi altında kalıp içinde sıkıştırılır. Sıkıştırma işlemi bittikten sonra hidrolik krika vasıtasıyla sıkıştırılmış numune kalıptan çıkarılır. Permametre hücresine yerleştirilmeden önce sıkıştırılmış örneğin altına ve üstüne poroz taş konur. Etrafına lateks membran geçirilip, başlıklara O-halka yerleştirildikten sonra permametre hücresi yerine konarak deneye başlanır.

Bariyer tasarımı için seçilen killi malzeme optimumun kuru kısmında, optimumda ve optimumun ıslak tarafında olacak şekilde en az üç farklı su içeriğinde sıkıştırılarak hem sıkıştırma eğrisi elde edilir (Şekil 7a) hem de hidrolik iletkenlik deneyine tabi tutularak su içeriği-hidrolik iletkenlik değişimi Şekil 7b’de gösterildiği gibi belirlenir. Hidrolik iletkenliği  $10^{-9}$  m/s’den daha düşük olan noktalar sıkıştırma eğrisi üzerinde taranarak bir “taralı alan” elde edilir. Buradan elde edilen sonuç, laboratuvarında yapılan diğer deneylerle harmanlanarak (serbest basınç deneyi ve hacimsel büzülme deneyleri) sıkıştırma eğrisi üzerine ayrı ayrı taralı alan olarak işlenir. Her üç deneye ait taralı alanların kesişim kümesi belirlendikten sonra kuru birim hacim ağırlık ve su

içeriği ekseninde uygulamanın yapılabileceği “uygulama alanı” elde edilmiş olur (Daniel vd., 1993; Daniel ve Benson, 1990).



Şekil 7. a) Kum bentonit (KBK) ve zeolit bentonit karışımlarının (ZBK) sıkıştırma eğrileri ve b) hidrolik iletkenliklerinin su içeriğine bağlı değişimi (Ören vd. 2014)

#### Geosentetik Kil Örtü (GKÖ)

GKÖ'nün bariyer performansı belirlenmek istendiğinde numune hazırlama işi oldukça önem arz etmektedir. GKÖ rulodan kesilip çıkarılırken kuru haldeki bentonit GKÖ'nün kenarlarından dökülmeye başlar. Bu durum esnek duvarlı permametrelerle hidrolik iletkenlik tayin edilirken kenardan sızmaya neden olur. Bunun önüne geçmek için iki detayı mutlaka uygulamak gerekir. Bunlardan birincisi GKÖ rulodan kesilirken kesilme hattının ıslatılması, ikincisi de GKÖ permametreye yerleştirildikten sonra kenarların bentonitle sıvanmasıdır.

GKÖ rulodan kesilirken esnek duvarlı permametre ile deney yapılacak pedestal çaplarına uygun bir paslanmaz çelik halka kullanılması gerekir. Önce rulodan 200mm×200mm boyutlarında kare bir GKÖ örneği kesilir (Şekil 8a). Paslanmaz çelik halka rulo üzerine yerleştirildikten sonra boyalı kalem ile kesilecek daire işaretlenir. Daha sonra bu dairesel çizgi, içi damıtık su dolu bir piset yardımıyla yavaşça ıslatılır. Islatma esnasında çizgi dışına su taşırılmaması gerekir. Aksi takdirde GKÖ içindeki bentonit hidrate olmaya başlar. Ucu sivri piset kullanılması suyun daha dikkatli bir şekilde damlatılmasına yardımcı olabilir. Sonra kalın kumaş kesmeye yarayan makas veya ucu keskin bir maket bıçağı ile çizgi boyunca GKÖ kesilir (Şekil 8b). Kestikten sonra kesilme yüzeyi gözle incelenir ve varsa alt ve üst geotekstillerin birbirine temas ettiği yerler cımbız benzeri bir aparatla birbirinden ayrılır. GKÖ permametrenin pedestalli üzerine yerleştirilmeden önce poröz taş yerine kalın bir örgüsüz geotekstil aynı çapta kesilerek GKÖ ve alt pedestalin arasına konur (Şekil 8c). Onun üzerine GKÖ, onun da üzerine tekrar drenaj amaçlı kullanılan kalın bir örgüsüz geotekstil konur (alta ve üste konan geotekstillere ayırdır). Üst başlık örgüsüz geotekstilin üzerine yerleştirildikten sonra iki başlık arasında kalan yan yüz kenardan sızmayı engellemek için orta plastik kıvamda hazırlanan bir bentonit hamuru ile kapatılır (Şekil 8ç). Bentonitin GKÖ'nün içerisinden çıkarılan bentonit olması ve kapatma esnasında spatula kullanılması önemlidir. Daha sonra lateks membran ve O-ringler yerleştirilir (Şekil 8d) ve permametre hücresi su ile doldurulduktan sonra yerine yerleştirilir (Şekil 8e).



Şekil 8. GKÖ'lerin hidrolik iletkenlik deneyi için hazırlanması: a) rulodan 200mm×200mm boyutlarında numune kesme, b) kesilen numuneden ıslatılarak dairesel örnek alınması, c) GKÖ'nün altına ve üstüne örgüsüz geotekstil yerleştirme, ç) kenardan sızmayı önlemek için GKÖ yan yüzlerinin bentonitle sıvanması, d) numune çevresine lateks membran ve O-halka geçirilmesi ve e) permametrenin yerine yerleştirilmesi.

GKÖ kesim hattı ıslatılmasına rağmen hala kenarlarda yeterli miktarda bentonit olmayabilir. GKÖ kenarı bentonit hamuru ile sıvanmış olsa da bu durumda kenardan sızma gerçekleşebilir. Hidrolik iletkenlik yüksek bulgulanmışsa hemen deney sonlandırılarak raporlama yapılmaz. Cam borudaki sıvı içine boyar madde konarak suyun renginin değişmesi beklenir. Daha sonra numunenin içinden 100 ml kadar boyalı su geçirilir. Bu süre zarfında tercihi akış yolu/yolları boyanmış olur. Deney sonunda numune çıkarılır ve gözlemsel inceleme yapılarak fotoğraflanır (Şekil 9). Eğer kenardan sızma gerçekleşmişse daha dikkatli olacak şekilde yeni bir GKÖ numunesi rulodan kesilerek deney tekrarlanır.



Şekil 9. Hidrolik iletkenlik deneyi sırasında GKÖ kenarından sızma gerçekleşmesi ve bu durumun boya testi ile ortaya konması

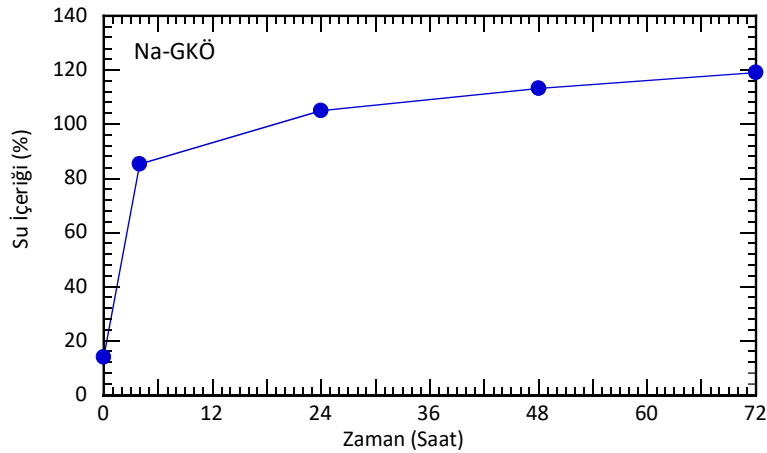
#### 4.5. Önıslatma Yapılması (Önceden Su ile Temas Ettirme – Hidrasyon)

Bariyer malzemesi saha üzerine yerleştirildikten sonra altında bulunan zeminden su emerek veya yapay olarak üstünden sulanarak bariyerin killi kısmının şişmesi sağlanır. Böylece geçiririmsizliğin daha düşük olması sağlanır. Buna önceden hidrate etme anlamına gelen prehidrasyon veya Türkçeleştirilmiş haliyle "önıslatma"

denmektedir. Sıkıştırılmış killer veya bentonitli karışımlar zaten optimumun ıslak kısmında sıkıştırıldıklarından önıslatmaya tabi tutulmasına gerek yoktur. Zira sıkıştırılmış kilden oluşan bariyerin altında bulunan zemin de belirli bir nemde bulunduğundan alt zeminden su alma veya verme gibi bir durum sınırlı şekilde gerçekleşebilir.

Diğer yanda GKÖ'ler için önıslatma durumu büyük önem arz etmektedir. GKÖ'ler fabrikada üretilen malzemeler olduğundan belirli bir su içeriğine sahiptir. Genelde bentonitin sahip olduğu su içeriği %10 ile %16 arasında değişmektedir. Bu su içeriği aralığındaki bentonit yüksekten boşaltıldığında yoğun olarak toz çıkarır. Dolayısıyla %10-16 su içeriğine sahip bentonit neredeyse kuru kabul edilebilir. Dolayısıyla, GKÖ uygulama esnasında altında bulunan zeminden önemli miktarda su emer. Su emme işlemi yavaş yavaş meydana gelir. Örnek vermek gerekirse, altındaki zeminin su içeriğine ve GKÖ tipine bağlı olarak GKÖ'nün bir hafta sonunda sahip olduğu su içeriği %60'ın üzerine çıkabilir, hatta %100'lere ulaşabilir (Acikel vd., 2018; Anderson vd., 2012; Bouazza vd., 2017; Bradshaw vd., 2013; Chevrier vd., 2012; Karakuş vd., 2022; Kul ve Ören, 2016; Özdamar Kul ve Ören, 2018, 2019; Rayhani vd., 2011; Rowe vd., 2019; Rowe ve Li, 2021; Sarabian ve Rayhani, 2013; Taşkesti vd., 2019).

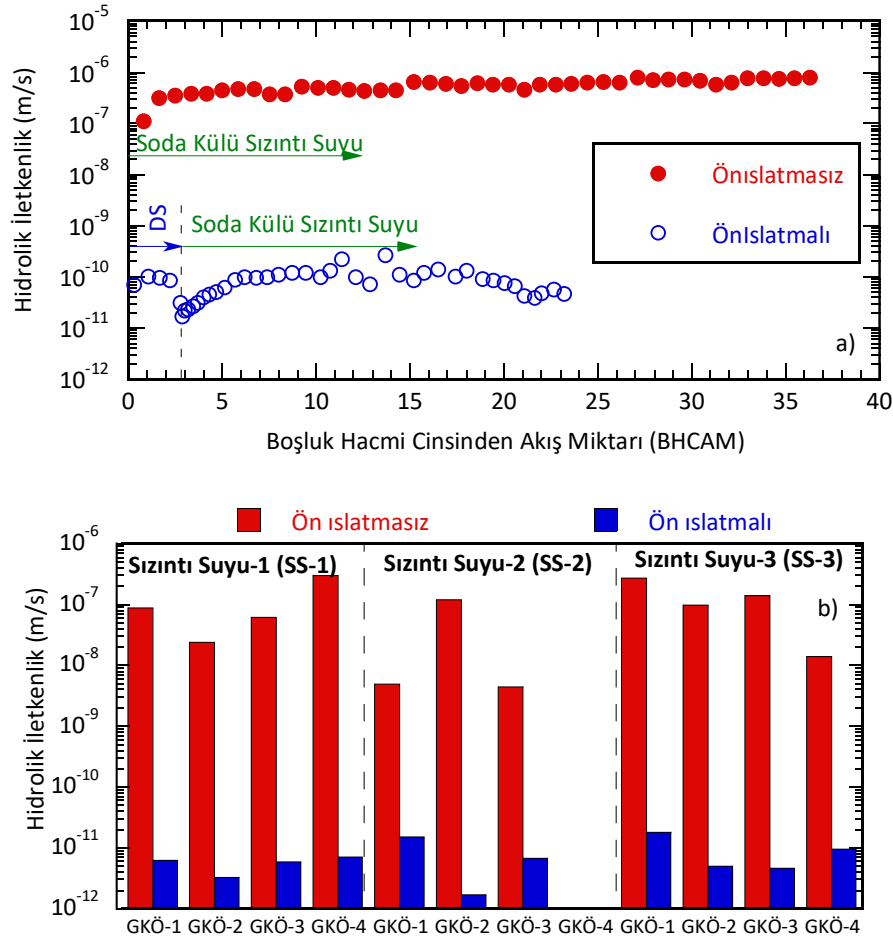
Hidrasyonu laboratuvarında resmetmek için GKÖ'ler ya yerinde kullanılacak zemin üzerinde hidrate edildikten sonra permametreye yerleştirilerek hidrolik iletkenlik deneyine tabi tutulur ya da doğrudan permametre üzerine yerleştirildikten sonra önıslatma işlemi uygulanır ve sonrasında deneye geçirilir. GKÖ'lerin esnek duvarlı permametre hücrelerinde önıslatmaya tabi tutulması daha pratik olduğundan genelde bu yöntem uygulanır. Bunun için permametrede deney sıvısı ile süzdürme işlemine geçmeden önce önıslatma yapılır. Deney yapılırken kullanılan tabirler kafa karıştırıcı olabilir. Şöyle ki önıslatma, "su" ile yapılan ön işlemi tanımlamaktadır. Örneğin sahaya özel hazırlanmış bir sentetik sıvı ile yapılacak hidrolik iletkenlik deneyi için önıslatma yapılacaksa GKÖ permametreye yerleştirildikten sonra çıkış vanası kapatılır ve cam boruya yalnızca su (damıtık su veya çeşme suyu) konulur. Hücreye giriş vanası açılır ve 24 saat ile 72 saat arasındaki bir süre boyunca suyun GKÖ ile temas etmesi ve böylece GKÖ içindeki bentonitin şişmesi sağlanır. Bu süre boyunca hücreye giriş vanası açık ve çıkış vanası kapalı olduğundan numunenin içinden su akışı gerçekleşmez. Bu nedenle akış başlatılmadan önce su ile temas ettirme işlemine "önıslatma" denir. Genel olarak 48 saat ön ıslatma uygulanması bir rutin haline almıştır (Jo vd., 2004; Katsumi vd., 2008; Ruhl ve Daniel, 1997; Shackelford vd., 2000). Önıslatmadan sonra cam boru içindeki su boşaltılır ve süzdürme sıvısı olarak kullanılacak sahaya özel hazırlanmış sentetik sıvı konularak hidrolik iletkenlik ölçümüne çıkış vanası açılarak başlanır. Şekil 10'da önıslatmaya tabi tutulmuş bir GKÖ'nün su içeriğinde meydana gelen değişim zamana bağlı olarak gösterilmektedir. Diğer yanda, yukarıda anlatıldığı biçimde, GKÖ önceden sentetik sıvı ile ıslatılacaksa buna "önıslatmasız GKÖ" adı verilir. Aslında burada da GKÖ önıslatma işlemine tabi tutulmaktadır, ancak bu önceden ıslatma işlemi su kullanılmadığı için "önıslatmasız" tabiri kullanılmaktadır (Jo vd., 2001; Katsumi vd., 2007; Kolstad vd., 2004). Önıslatmasız GKÖ de 48 saat boyunca sentetik sıvı ile temas ettirildikten sonra çıkış vanası açılarak hidrolik iletkenlik deneyine aynı sıvı ile devam edilir.



Şekil 10. Na-GKÖ'nün esnek duvarlı permametrede önıslatma işlemi sırasında su içeriğinde meydana gelen değişimin zamana bağlı gösterimi

Su ile önıslatma işlemine bazen vana açılarak da bir süre devam edilir. Diğer bir deyişle, su ile akış (veya süzdürme) başlatılır. Birkaç BHCAM kadar akış sonrasında çıkış vanası kapatılır ve cam borudaki su deneyin yapılacağı sentetik sıvı ile değiştirilir. Sonrasında vakit kaybetmeden deneye devam edilir. Böylece sızma kuvvetleri altında önıslatmaya ilave olarak önsüzdürme yapılmış olur (Di Emidio vd., 2015; Lee ve Shackelford, 2005a; Mazzieri vd., 2013; Stern ve Shackelford, 1998; Wang vd., 2019). Önıslatmalı ve önıslatmasız GKÖ'lerin hidrolik iletkenlik davranışları birbirinden farklı olmaktadır. Önıslatmaya tabi tutulan bir GKÖ'nün nihai hidrolik iletkenliği önıslatmasız GKÖ'nünkine göre birkaç merteye daha düşük ölçülebilmektedir (Shackelford vd., 2010; Stern ve Shackelford, 1998). Buna bir örnek Şekil 11a ve Şekil 11b'de gösterilmektedir. Şekil 11a'da sodakülü sızıntı suyu ile yapılan bir deneyde GKÖ'nün önıslatmasız durumda nihai hidrolik iletkenliği  $7.7 \times 10^{-7}$  m/s iken önıslatma/önsüzdürme neticesinde nihai hidrolik iletkenliği  $4.8 \times 10^{-11}$  m/s'ye düşmüştür. Bu dört mertebelik bir farka karşılık gelmektedir. Şekil 11b'de de bu etki incelemesi 4 farklı GKÖ ve üç atık depolama alanından alınmış sızıntı suyu örnekleri ile yapılmıştır. Şekil 11b'den de görülebileceği gibi önıslatma durumunda GKÖ'lerin hidrolik iletkenliği 3-4 merteye kadar azalabilmektedir.

GKÖ içindeki bentonit parçacıkları önıslatma esnasında su ile şişerek akış kanallarını daraltmakta ve geçirimsizlik azalmaktadır. GKÖ, sonrasında agresif bir sıvı ile temas ettiğinde bentonit parçacıklarını saran adsorbe su tabakası kalınlığı en yüksek seviyesinde iken yavaş yavaş baskılanmaya başlamakta ve geçirimsizlik artmaktadır. Geçirimsizliğin önıslatmasız durumdakine benzer seviyelere gelebilmesi için çok uzun süreler boyunca deneylerin devam ettirilmesi gerekir. Zira bentonit ile sıvı arasındaki katyon değişiminin tamamlanabilmesi için oldukça uzun zaman geçmesi gerekmektedir. Bazen bu süre sonunda dahi önıslatılmış GKÖ'nün önıslatmasız göre hidrolik iletkenliği birkaç merteye daha düşük olabilmektedir.



Şekil 11. a) Soda külü sızıntı suyu ile süzdürülen örnekler üzerinde önıslatma etkisinin belirlenmesi ve b) önıslatma etkisinin dört farklı GKÖ üzerinde atık depolama sahalarından alınmış sızıntı suları ile belirlenmesi

#### 4.6. Deney Sırasında Kullanılması Önerilen Sıvılar

Deney sırasında bariyerin hangi amaçla kullanılacağı önem arz etmektedir. Örtü amaçlı kullanılacak bariyerlerin hidrolik iletkenlik deneyleri su ile yapılırken, taban veya şevlerde kullanılacak bariyerlerin sahaya özel sıvı ile hidrolik iletkenlik deneyi yapılmalıdır. Bariyer malzemesi eğer barajlarda kil çekirdek oluşturmak veya yangın söndürme amaçlı yapılan göletlerin taban ve şevlerinde kullanılacaksa hidrolik iletkenlik deneylerinin su ile yapılması kafidir. Zira depolanacak olan sıvı sudur ve bariyer malzemeleri en düşük geçirimsizliğe su varlığında ulaşır. Suyun kullanılmasının yanısıra sentetik su ile de hidrolik iletkenlik belirlenebilir. Bariyer malzemesinin, altında bulunan zeminle etkileşime gireceği ve uzun dönemde katyon değişimine maruz kalacağı unutulmamalıdır. Özellikle ince yapıdaki GKÖ bu etkileşime sıkıştırılmış killere ve bentonitli karışımlara nazaran daha çabuk girer. Bu nedenle bariyer malzemesinin altında bulunan zemindeki anyon ve katyonlar çıkarılarak, bunların konsantrasyonları belirlenir. Belirlenen konsantrasyonla laboratuvarında bir sentetik su hazırlanarak hidrolik iletkenlik deneylerinin bu sıvıyla yapılması önerilmektedir (Scalia ve Benson, 2010). Aynı durum örtüde kullanılacak bariyer malzemesinin deneyleri için de geçerlidir.

Diğer yanda taban ve şevde kullanılacak bariyer malzemesi sahaya özel sıvı ile hidrolik iletkenlik deneyine tabi tutulmalıdır. Sahaya özel sıvı için olası sızıntı suyu kompozisyonu belirlenmeli veya yakın bir kaynaktan hazır sızıntı suyu alınmalıdır. Örneğin, mevcut atık depolama sahası genişletilmek veya yenisi yapılmak isteniyorsa, bariyer malzemesinin hidrolik iletkenlik deneyi eski sahadan getirtilen sızıntı suyu ile yapılabilir. Bu sıvıya ilave olarak su ile deneylerin yapılmasında da fayda vardır. Su ile yapılan deney kontrol deneyi görevi görüp sızıntı suyuyla elde edilen hidrolik iletkenliğin yorumlanmasına yardımcı olur. Eğer sızıntı suyuyla belirlenen hidrolik iletkenlik suyla belirlenene göre yüksekse, sızıntı suyunun geçirimsizliği artırıcı etkisi olduğu sonucuna varılmaktadır. Önemli olan bu artışın nereye kadar varabileceğini görmektir. Bunun için de deneyler uzun süreler boyunca devam ettirilmelidir. Pratik olması açısından yukarıda anlatılanlar Çizelge 1’de özetlenerek yeniden sunulmuştur.

Çizelge 1. Bariyerin kullanım amacına göre laboratuvarında hidrolik iletkenliğin belirlenmesi aşamasında kullanılması gereken sular.

Bariyerin kullanım yeri	Hidrolik İletkenlik Deneylerinde Kullanılması Tavsiye Edilen Süzdürme Sıvıları		
	Su (Damıtık veya çeşme suyu)	Bariyerin altındaki zeminden çıkarılan anyon ve katyon ile hazırlanan sentetik su	Sahaya özel sentetik su, sızıntı suyu veya CaCl <sub>2</sub> çözeltisi
Baraj Çekirdeği	✓		
Yangın Söndürme Göletleri	✓	✓	
Deponi Sahası - Örtü	✓	✓	
Deponi Sahası - Şev veya Taban	✓	✓	✓

Deponi sahalarından alınmış sızıntı suları ile hidrolik iletkenlik deneyi yapmak oldukça zordur. Sızıntı suyunun buzdolabında muhafaza edilmesi ve belirli aralıklarla konsantrasyonun belirlenmesi gerekmektedir. Sızıntı suyu içerisinde birçok bakteri bulunduğundan konsantrasyonu zaman içinde değişmektedir. Bu nedenle deney başlangıcındaki koşullar ile deney sürdürülürken sahip olunan koşullar benzerliğini yitirmektedir. Ayrıca, sızıntı suyu laboratuvara aşırı koku yaydığı için çalışma ortamı koşulu bozulmaktadır. İş sağlığı ve güvenliği kapsamında değerlendirildiğinde, bu istenmeyen bir durum ortaya çıkarmaktadır. Bunun için, uygun bir havalandırma ve filtreleme sistemine sahip odada deneylerin yapılması gerekir. Bu ortamı sağlamanın mümkün olmadığı durumda ise hidrolik iletkenlik deneylerinin CaCl<sub>2</sub> çözeltileri yapılması oldukça yaygın olan bir uygulama şeklidir (Gleason vd., 1997; Jo vd., 2001, 2004; Katsumi vd., 2008; Katsumi, Lee vd., 2005; Lee ve Shackelford, 2005c, 2005b; Razakamanantsoa vd., 2012; Rowe ve Abdelatty, 2012; Stern ve Shackelford, 1998; Vasko vd., 2001). Kalsiyum iki değerliğe sahip toprak alkalileri grubundan metalik bir element olduğu için adsorbe su tabakası kalınlığını baskılayıcı (azaltıcı) bir etkiye sahiptir. Bu element doğada fazla miktarda bulunduğundan ve bariyer malzemesinde çoğunlukla sodyum ve kalsiyum arasında yer değiştirme meydana geldiğinden hidrolik iletkenlik deneylerinde kullanılması fayda sağlamaktadır. Kokusuz olan bu tuzla deneyler farklı konsantrasyon düzeylerinde yapılabilir. Suya ilave olarak 5, 10, 25, 50, 100 mM CaCl<sub>2</sub> konsantrasyonları



literatürde fazlaca çalışılmış tuz çözeltisi seviyeleridir (Di Emidio vd., 2015; Jo vd., 2005; Lee vd., 2005; Lee ve Shackelford, 2005c; Rowe vd., 2017). CaCl<sub>2</sub> çözeltileri içinde 5 mM sert çeşme suyu içerisindeki kalsiyum miktarına yakinken, 50-100 mM seviyeleri en kötü senaryoyu resmetmek için kullanılan orta/kuvvetli bir çözelti seviyesidir. Konsantrasyon arttıkça bariyer malzemesinin hidrolik iletkenliğinin arttığı da unutulmamalıdır. CaCl<sub>2</sub> çözeltilerine ilave olarak 100 mM ile 1000 mM (1 M) arasında hazırlanan NaCl çözeltileri de kullanılmaktadır (Katsumi, vd., 2008; Petrov ve Rowe, 1997).

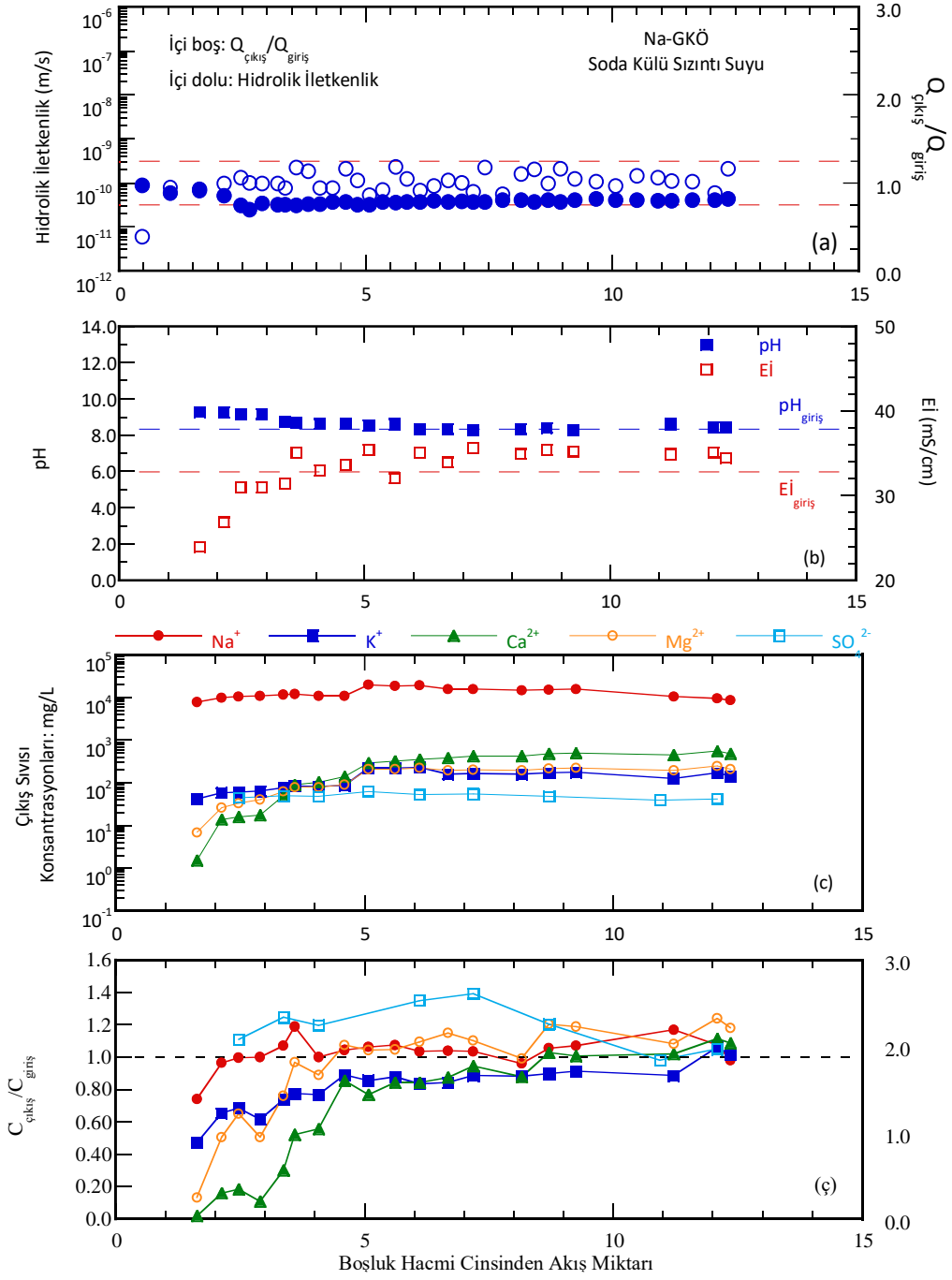
#### 4.7. Deney Sırasında ve Sonrasında Yapılması Gereken Ölçümler

Hidrolik iletkenlik deneylerinde hem numune içine giren su miktarı ( $Q_{giriş}$ ) hem de numune içinden geçen su miktarı ( $Q_{çıkış}$ ) belirlenir. Bu değerler fiziksel dengenin ( $Q_{çıkış}/Q_{giriş}$ ) kontrolünde kullanılır. ASTM D5084'te bu oran için izin verilen sınır değerler  $1.0 \pm 0.25$  ile ifade edilmiştir. Bir başka deyişle hidrolik iletkenlik deneyi boyunca  $Q_{çıkış}/Q_{giriş}$  değerleri 0.75 ile 1.25 arasında olması koşulu aranmaktadır (Şekil 6'daki kesikli çizgiler sağ ekseninde yer alan bu oran aralığını göstermektedir). Fiziksel dengenin yanında deneylerin sonlandırılabilmesi için hidrolik dengenin de sağlanmış olması gerekir. Bunun için son dört hidrolik iletkenlik değeri arasındaki farkın  $1.0 \pm 0.25$  olması gerekmektedir.

Hidrolik iletkenlik deneyleri sırasında belirli aralıklarla numuneye giren ve numuneden süzülerek çıkan kısımlardan sızıntı suyu örnekleri alınarak (süzüntü) ve bunlar üzerinde pH ve elektrik iletkenlik ölçümleri (Eİ) yapılmaktadır. Alınan bu numuneler 50 ml'lik plastik tüplere doldurulup kimyasal içeriklerinin bozulmaması için buzdolabında saklanmalıdır. Daha sonra bu numuneler pH ve elektrik iletkenlik ölçümlerine tabi tutularak deney boyunca sıvıdaki pH ve Eİ değişimleri incelenebilir. Ölçümlere başlanmadan önce pH ve Eİ uçlarının kalibrasyonunun yapılması gerekmektedir. Kalibrasyon için genelde pH için üç tampon çözelti (pH=4, pH=7 ve pH=10), Eİ için iki tampon çözelti (0.1M KCl ve 0.01M KCl) kullanılmaktadır. Yapılan hidrolik iletkenlik deneyi sırasında kimyasal stabilite koşulunun sağlanıp sağlanmadığının kontrolü doğrudan  $pH_{çıkış}$ ,  $Eİ_{çıkış}$  ve  $pH_{çıkış}/pH_{giriş} - Eİ_{çıkış}/Eİ_{giriş}$  oranlarına bakılarak yapılır (Şekil 12b). Burada,  $pH_{çıkış}$  ve  $Eİ_{çıkış}$  çıkış sıvısından alınan örneklerin,  $pH_{giriş}$  ve  $Eİ_{giriş}$  ise kullanılan sızıntı suyunun pH ve elektrik iletkenlik değerlerini ifade etmektedir. Hidrolik iletkenlik deneylerinin sonlandırılabilmesi için gerekli kimyasal denge koşulu ( $pH_{çıkış}/pH_{giriş}$  ve  $Eİ_{çıkış}/Eİ_{giriş}$ ) ASTM D6766'da  $1.0 \pm 0.1$  olarak tanımlanmıştır.

Numuneye giren ve çıkan sıvı numuneleri üzerinde ayrıca anyon ve katyon analizleri yapılarak bariyer malzemesinde meydana gelen yer değiştirme miktarı belirlenmeye çalışılır (ASTM:D7503-10, 2010). Deneylerde klorlu (Cl<sup>-</sup>) veya sülfatlı (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)(veya başka bileşenli) tuzlar kullanıldıysa anyon olarak klor ve sülfata bakılır. Yer değiştirebilir katyonlar olarak süzüntülerde genelde Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> elementlerine bakılması yeterlidir. Diğer yanda, özel olarak kullanılmış başka elementler varsa bunlara da mutlaka bakılmalıdır. Bu katyonlar kil yüzeyine elektrostatik bağlarla tutunabilen ve yer değiştirebilir katyonlar olarak adlandırılan katyonlardır. Analizler için süzüntüler belirli aralıklarla toplanarak bunların bir kısmı pH ve elektriksel iletkenlik için bir kısmı da kimyasal analizler için ayrılır. Dolayısıyla hemen hemen her 30 ml sıvı numuneden süzülüp toplandığında yarısı kapaklı plastik tüp içine alınarak pH ve Eİ için ayrılır. Diğer yarısı da anyon ve katyon analizleri için yine plastik kapaklı tüp içinde alınarak ayrılır. Eğer sıvı içinde gözle görülür parçacıklar varsa sıvı özel bir filtreden geçirilerek bu parçacıklardan temizlenir. Zira katyon analizleri için hassas ICP Optik Emisyon Spektrofotometri cihazı kullanıldığından bu parçacıklardan arındırılmış sularla analizlerin yapılması gerekmektedir. Filtreleme için özel filtre kağıdı tutucular ve 25 mm çapında ve gözenek açıklığı 2.5 µm olan filtre kağıtları kullanılmalıdır. Şırınga içine doldurulan süzüntüler filtre kağıdı tutuculara yerleştirilen filtrelerden geçirilir. Filtrelenmiş süzüntüler plastik kapaklı tüplere konduktan sonra üzerine 1 ml nitrik asit damlatılıp pH 2'nin altında olacak şekilde numuneler buzdolabında saklanır.

Kimyasal analize tabi tutulmuş Na-GKÖ'nün soda külü sızıntı suyu ile deneyinden elde edilen grafikler bütünü Şekil 12a-ç'de gösterildiği şekilde verilmiştir.



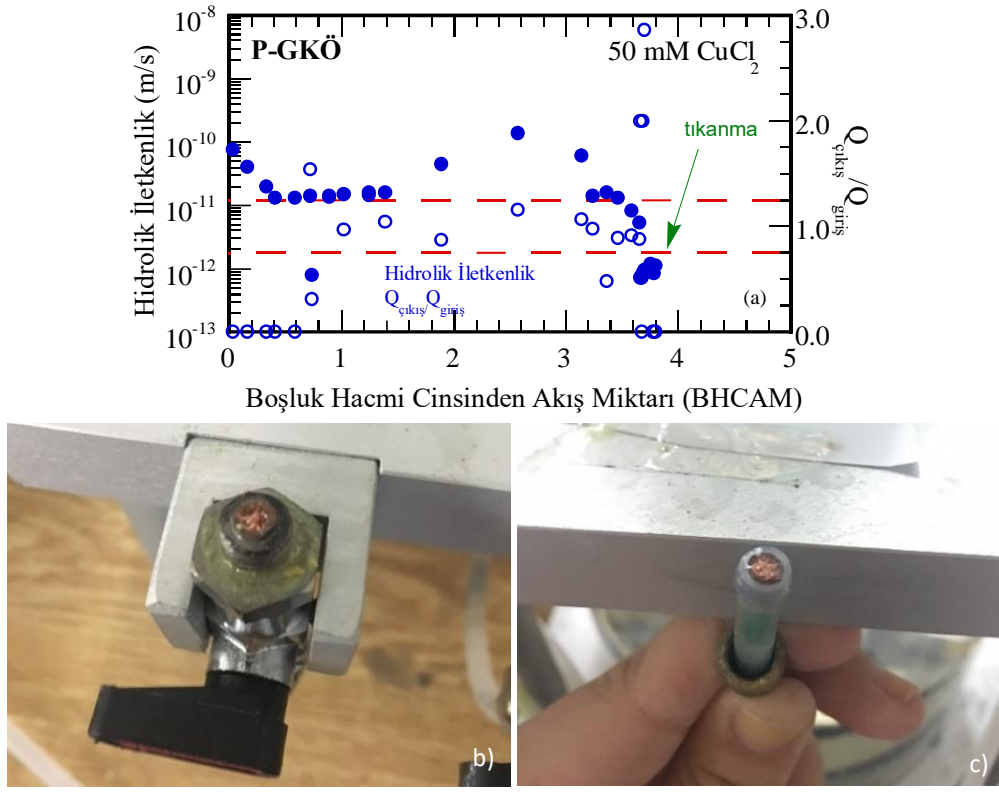
Şekil 12 Na-GKÖ'nün soda külü sızıntı suyuyla a) hidrolik iletkenlik davranışı, b) pH ve Eİ ölçümü sonuçları, c) çıkış sıvısı konsantrasyonları ve ç) çıkış ve girişteki konsantrasyonların oranlanması

#### 4.8. Deneyde Karşılaşılabilecek Özel Durumlar

##### Permametrede Tıkanma Meydana Gelmesi

Hidrolik iletkenlik deneyleri uzun süren deneyler olduğu için zaman içerisinde akış miktarı radikal bir şekilde azalmaya başlayabilir. Bu durumda sistem içerisinde bir tıkanma meydana gelmiş olması oldukça muhtemeldir. İlk olarak yapılması gereken hücrenin diğer çıkış vanası açılarak cam borudaki sıvının bu kanaldan da çıkıp çıkmadığı kontrol edilir. Eğer sıvı çıkışı varsa, giriş kanalı tıkanmış demektir. Bu durumda cam boru bağlantısı akışın gerçekleştiği kanala bağlanır. Zamanla bu kanal da tıkanırsa hücre açılarak gözle

inceleme yapılır. Tıkalı kanallar açılabilirse açılır veya hortum, bağlantı aparatları yenisiyle değiştirilir. Bu duruma güzel bir örnek Şekil 13'te verilmiştir (Ören vd., 2017).



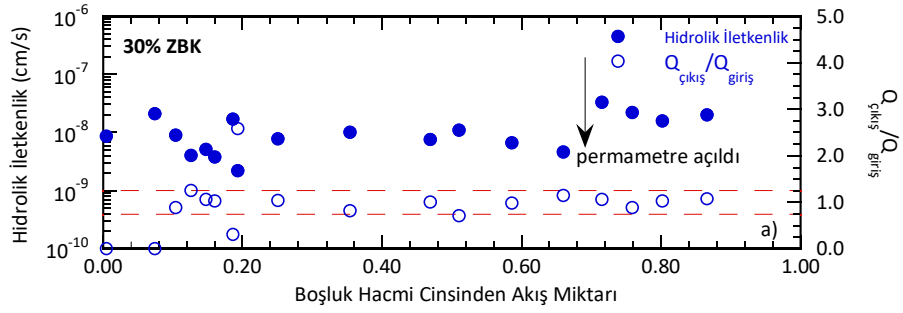
Şekil 13 Polimer GKÖ'nün (P-GKÖ) 50 mM CuCl<sub>2</sub> çözeltisi ile yapılan: a) hidrolik iletkenlik deneyi, b) bağlantı aparatında ve c) hortumda bakırın zamanla birikmesiyle meydana gelen tıkanma (Ören vd., 2017)

Şekil 13a-c'den de görülebileceği gibi CuCl<sub>2</sub> ile yapılan hidrolik iletkenlik deneyinde hidrolik iletkenlik düşük seyrederken zamanla akışın da yavaş olması sebebiyle tıkanma meydana gelmiş ve hidrolik iletkenlik aniden düşmüştür. Yukarıda bahsedildiği şekilde permametre üzerindeki diğer kanal üzerinden deneye devam edilmek istenmiş, ancak akış gerçekleşmemiştir. Bunun üzerine permametre açılmış ve Şekil 13b ve Şekil 13c'de görüldüğü gibi bakırın bağlantı aparatı ve hortumu tamamen tıkadığı görülmüştür. Bağlantı aparatının metal olmasının bakırla etkileşime girmesinde etkili olmuş ve bunun üzerine permametre üzerindeki tüm bağlantı aparatları plastik aksamlarla değiştirilmiştir. Bunun üzerine 50 mM CuCl<sub>2</sub> çözeltisi ile deney tekrarlanmış ve deneyler sorunsuz bir şekilde tamamlanabilmiştir. Daha sonra konsantrasyon seviyesi 100 mM'a artırılmış, bu konsantrasyonda da deney permametrede tıkanma meydana gelmeden yapılabilmektedir (Ören vd., 2018).

#### Uzun Süren Deney Sonrasında Numunede Bakteri Oluşması

Hidrolik iletkenlik deneyleri düşük geçirimsizlik altında oldukça uzun süren deneylerdir. Bazen deney süreleri beş yılın üzerine çıkabilmektedir. Deney süresince numune, permametre içinde kapalı ortamda kaldığı için bakteri oluşumu kaçınılmaz olarak gerçekleşmektedir. Özellikle sızıntı suları ile deney yapıldığında bakteri oluşumu daha hızlı olmaktadır. Oluşan bakteriler zamanla akış kanallarını tıkararak hidrolik iletkenliğin düşük ölçülmesine sebep olabilir (Şekil 14a). Bakteriler numune dışında poroz taş veya poroz taş yerine kullanılan örgüsüz geotekstili de tıkeyabilmektedir (Şekil 14b). Burada dikkat edilmesi gereken husus, bakteri varlığında meydana gelen tıkanmanın hiçbir zaman Şekil 13a'da gösterildiği gibi akışı tamamen durduracak şekilde olmayabileceğidir. Şekil 13a'da gösterilen davranışın aksine hidrolik iletkenlik zaman içerisinde yavaş yavaş düşer (Şekil 14a). Bu durumda yapılması gereken deneyin durdurulması ve poroz taş veya geotekstilin yenisi ile değiştirilerek yola devam edilmesidir. Numune üzerinde yapılacak bir şey yoktur, ancak bu durumun üstesinden gelebilmek için deney başında süzdürülecek sıvı içerisine az miktarda biyosit eklenebilir (Tong ve

Shackelford, 2016). Böylece bakteri oluşumu büyük ölçüde engellenmiş olur. Ne kadar biosit ekleneceği ise deneme-yanılma yolu ile belirlenebilir. Zira her numune için farklı miktarlarda biosit eklenmesi gerebilir.



Şekil 14 Sızıntı suyu süzdürülen %30 bentonite sahip zeolit bentonit karışımının (%30 ZBK): a) hidrolik iletkenlik davranışı ve b) numune ve geotekstilde meydana gelen bakteri oluşumu.

#### Elektrik Kesintisi Durumu

Hidrolik iletkenlik deneyleri uzun süren deneyler olduğu için bu süre zarfında uzun süreli elektrik kesintileri yaşanabilmektedir. Özellikle deneye çok önceden başlanmışsa ve katyon değişimi henüz tamamlanmamışsa deneyin bozulması oldukça can sıkıcı bir durum oluşturmaktadır. Bu durumla karşılaşmamak için alınabilecek en basit önlem panelin ve hava kompresörünün bir güç kaynağına bağlanmasıdır. Bu yapılmadan elektrik kesintisi meydana geldiğinde paneldeki basıç sıfıra düşeceğinden cam borudaki sıvı lateks membran ile numune yan yüzü arasına dolacağından numunenin şekli "fıçı"ya dönüşmektedir. Bu durumla karşılaşıldığında bir örnek daha hazırlanarak deneye yeniden başlanması gerekir.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Burada bariyer tasarımı için çok önemli bir parametre olan hidrolik iletkenlik deneyleri hakkında genel bilgi sunulmuş, deneylerde dikkat edilecek hususlar hakkında önceki çalışmalardan elde edilen tecrübeler paylaşılmıştır. Bariyer malzemelerinden sıkıştırılmış bentonitli karışımlar ve geosentetik kil örtüler (GKÖ) ile yapılmış daha önceki deneylerden örnekler sunulmuştur.

Bariyer tasarımı esnasında izlenmesi gereken yol şu şekilde özetlenebilir: Bariyer için alternatif malzemeler belirlenerek laboratuvara getirilir, bu malzemeler üzerinde geoteknik tanımlama deneyleri yapılır. Eğer bariyer malzemesi killi doğal bir zemin malzemesi veya bentonitli bir karışım ise belirli bir enerji veya farklı enerjiler altında sıkıştırma deneyleri yapılarak malzemelerin sıkıştırma eğrileri elde edilir. Eğrinin optimum su içeriğinin %2-3 kısmında kalacak şekilde yeni bir örnek hazırlanır ve bu örnek kalıptan çıkarılarak esnek duvarlı permametre hücresinde hidrolik iletkenlik deneyine tabi tutulur. Bu malzemenin farklı su içeriklerindeki

hidrolik iletkenlik davranışının belirlenmesi de önemlidir. Bu nedenle optimumun ıslak kısmına ilave olarak optimumun kuru kısmında ve optimum su içeriğinde de örnekler hazırlanarak su içeriği-hidrolik iletkenlik ilişkisi elde edilmektedir. Bariyer malzemesi GKÖ ise önceden bir sıkıştırma işlemine gerek yoktur. GKÖ ile yapılan deneylerde öne çıkan durum GKÖ'nün önceden ıslatılıp ıslatılmayacağı hususudur. GKÖ'ler sahada zemin üzerine yerleştirilip altındaki zeminden su emdiğinden su içeriği %10-16 seviyelerinden %60'ın üzerine çıkmaktadır. Bu durumu yansıtmak için GKÖ permametrede önceden ıslatılmaktadır. Önıslatma adı verilen bu durumdan sonra süzdürme işlemine geçilir. Önıslatmada kullanılan sıvı damıtık su veya çeşme suyudur.

Sıkıştırılmış kil, bentonitli karışımlar ve GKÖ'lerin hidrolik iletkenlik deneyleri düşük efektif gerilme ve hidrolik eğimler altında yapılmaktadır. Ancak düşük eğimler deney süresinin uzun olmasıyla sonuçlanmaktadır. Akış hızını arttırmak hidrolik eğimin arttırılmasıyla mümkündür. Hidrolik eğimin arttırılması numune içerisinden erozyona veya küçük parçacıkların hareket ederek akış kanallarını tıkamasına sebep olabilir. Yüksek hidrolik eğimler altında deney yapılırken düşük eğimle deneye başlamak esastır. Deneye bir süre devam edildikten sonra hidrolik eğim kademeli arttırılarak hidrolik iletkenlik davranışındaki değişimin izlenmesi gerekir. Eğer eğim artışının hidrolik iletkenlik davranışına etkisi gözlenmezse kontrollü bir şekilde hidrolik eğim arttırılarak deneye devam edilir.

Hidrolik iletkenlik deneylerinde süzdürme sıvısı olarak sahaya özgü sıvıların kullanılması tavsiye edilmektedir. Eğer bariyer malzemesi bir atık depolama sahasının tabanı veya şevinde kullanılacaksa bu bariyer malzemesi atıktan kaynaklanacak sızıntı suyuyla temas edebilir anlamına gelmektedir. Bu durumda sahaya özel sıvıya en yakın sıvı ile deneylerin yapılması önemlidir. Bu sıvı en yakın atık depolama sahasından alınabileceği gibi içeriği tahmin edilebiliyorsa laboratuvarında sentetik olarak da hazırlanabilir. Aynı zamanda bariyer malzemesi zeminle temas ettiğinden dolayı bariyerdeki sodyum ile zemindeki kalsiyum ve magnezyum gibi çift değerlikli katyonlar yer değiştirir. Katyon değişimi permabilitenin artışına yol açtığından zemindeki katyonlar belirlenerek sentetik su hazırlanır. Bu sentetik suyla da hidrolik iletkenlik deneylerinin yapılması tavsiye edilmektedir. Buna ilave olarak her zaman bariyerin su ile hidrolik iletkenlik deneyinin yapılması hem bir referans noktası elde etmek hem de diğer sıvılarla elde edilen sonuçların karşılaştırılması için gereklidir. Diğer yanda, bariyer eğer suyun depolandığı yerlerde veya atık depolama sahaslarında örtü olarak kullanılacaksa (örtüde yağmur ve kar suları ile etkileşimde bulunabilir) su ve sentetik suyla deney yapmak yeterli olmaktadır.

Hidrolik iletkenlik deneyi sırasında numuneye giren ve çıkan su hacmi önemlidir. Fiziksel denge koşulunun sağlanıp sağlanmadığını gösteren bu işlem rutin olarak yapılan bir ölçümdür. Hidrolik iletkenlik deneylerinde fiziksel denge koşulu kısa sürede sağlanırken, kimyasal denge koşulunu sağlamak deneyin uzamasını sağlayan bir unsurdur. Deney sırasında numuneye giren ve çıkan sudan numune alınması oldukça önemlidir. Bu sıvı numuneler üzerinde pH, elektriksel iletkenlik ve katyon belirleme analizleri yapılarak kimyasal denge koşullarının sağlanıp sağlanmadığı belirlenmelidir. Özellikle GKÖ ile yapılan deneylerden sonra bentonit içindeki katyonlar da kimyasal bir işlemle çıkarılarak bentonitteki sodyumun hangi katyon ile yer değiştirdiği belirlenmektedir.

Hidrolik iletkenlik deneyleri devam ederken bakteri oluşumu veya kullanılan süzdürme sıvısına bağlı olarak bağlantı aparatlarında ve hortumlarda tıkanma gözlenebilir. Bunlar dışında, uzun süreli elektrik kesintisi panel sisteminden basınç akışını durduracağından bir anda basınç neredeyse sıfıra düşmektedir. Bu durumda cam borudaki su basıncı hücre basıncından yüksek olacağından lateks membran ile numune arasına su dolmaktadır. Numunenin permametre hücreindeki şekli bir anda "fıçı" benzeri bir şekle bürünmektedir. Böylesi durumlarla karşılaşıldığında deney sonlandırılarak yeni bir numune konmalıdır.

Yukarıda anlatılanlar ışığında hidrolik iletkenliğin oldukça uzun ve meşakkatli bir deney olduğu ve sabır gerektirdiği görülmektedir. Hidrolik iletkenlik deneylerinde akış yavaş olduğunda bir hafta – 10 günde bir seviye okumasının kaydedilmesi yeterli olmaktadır. Zira  $10^{-11}$  m/s hidrolik iletkenlik seviyelerine ulaşmak için 10 günde 50 ml hacimli cam boruda gözlenen seviye düşüşü yaklaşık 10 ml olmaktadır. Bu kadarlık bir seviye farkı oluşması ölçüm almak için yeterlidir, ancak hidrolik iletkenlik deneylerini etkileyen pek çok unsur olduğu göz önüne alınırsa permametrelerin ve cam boruların teker teker kontrol edilmesi ve deneylerin nasıl gittiğinin takip edilmesi gerekmektedir.

## TEŞEKKÜR

Tüm bu çalışmaların yapılması imkanını bana veren ve 2012.KB.FEN.006 numaralı projeye maddi destek sağlayan Dokuz Eylül Üniversitesi'ne ve bu çalışmadaki bulguların büyük kısmının üretilmesini 111M718 ve 119R044 numaralı projeleri destekleyerek sağlayan TÜBİTAK'a sonsuz teşekkür ederim. Ayrıca, akademik birikimime önemli katkı sağlayan ve burada sunulan çalışma konusunda yurt dışında farklı projelerde yer almama BİDEP 2219 bursu ile vesile olan TÜBİTAK'a bir kez daha teşekkür ederim. Laboratuvar ağırlıklı tüm bu çalışmaların yürütülmesinde yüksek lisans ve doktora öğrencilerimin payı ve emeği büyüktür. Ayrıca, Dr. Tuğçe Özdamar Kul'un tavsiye ve yardımları ile kimyasal analizlerdeki becerileri ve yorumları benim için oldukça kıymetli olmuştur. Onlara da içtenlikle teşekkür ederim. Bu süre zarfında desteklerini esirgemeyen eski (emekli ve ayrılan) ve mevcut DEÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Anabilim Dalı öğretim üyelerine de teşekkürü bir borç bilirim.

## KAYNAKLAR

- Abichou, T., Benson, C. H., ve Edil, T. B. (2002). Micro-structure and hydraulic conductivity of simulated sand-bentonite mixtures. *Clays and Clay Minerals*, 50(5), 537-545. <https://doi.org/10.1346/000986002320679422>
- Acikel, A. S., Gates, W. P., Singh, R. M., Bouazza, A., ve Rowe, R. K. (2018). Insufficient initial hydration of GCLs from some subgrades: Factors and causes. *Geotextiles and Geomembranes*, 46(6), 770-781. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2018.06.007>
- Alston, C., Daniel, D. E., ve Devroy, D. J. (1997). Design and construction of sand-bentonite liner for effluent treatment lagoon, Marathon, Ontario. *Canadian Geotechnical Journal*, 34(6), 841-852. <https://doi.org/10.1139/t97-054>
- Anderson, R., Rayhani, M. T., ve Rowe, R. K. (2012). Laboratory investigation of GCL hydration from clayey sand subsoil. *Geotextiles and Geomembranes*, 31, 31-38. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2011.10.005>
- Ashmawy, A. K., El-Hajji, D., Sotelo, N., ve Muhammad, N. (2002). Hydraulic performance of untreated and polymer-treated bentonite in inorganic landfill leachates. *Clays and Clay Minerals*, 50(5), 546-552. <https://doi.org/10.1346/000986002320679288>
- ASTM:D7503-10. (2010). *ASTM D7503-10 Standard Test Method for Measuring the Exchange Complex and Cation Exchange Capacity of Inorganic Fine Grained Soils*. August, 3-4. <https://doi.org/10.1520/D7503>
- ASTM: D5084-10. (2011). Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated Porous materials using a flexible wall permeameter. *ASTM International, West Conshohocken, PA, USA*, C, 1-23. <https://doi.org/10.1520/D5084-10.1.3.2>
- ASTM D7100-11. (2011). Standard Test Method for Hydraulic Conductivity Compatibility Testing of Soils with Aqueous Solutions 1. *American Society for Testing and Materials*. <https://doi.org/10.1520/D7100-11>
- ASTM:D6766-12. (2014). Standard Test Method for Evaluation of Hydraulic Properties of Geosynthetic Clay. *ASTM International, West Conshohocken, PA, USA*, 1-9. <https://doi.org/10.1520/D6766-12>. Copyright
- Athanassopoulos, C., Benson, C., Donovan, M., ve Chen, J. (2015). Hydraulic Conductivity of a Polymer - Modified GCL Permeated with High - pH Solutions. *Geosynthetics 2015*, 1, 181-186.
- Benson, C. H., Daniel, D. E., ve Boutwell, G. P. (1999). Field performance of compacted clay liners. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125(5), 390-403.
- Benson, C. H., ve Daniel, D. E. (1990). Influence of Clods on the Hydraulic Conductivity of Compacted Clay. *Journal of Geotechnical Engineering*, 116(8), 1231-1248. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1990\)116:8\(1231\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1990)116:8(1231))
- Boardman, B. T., ve Daniel, D. E. (1996). Hydraulic Conductivity of Desiccated Geosynthetic Clay Liners. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(3), 204-208. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1996\)122:3\(204\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:3(204))
- Bouazza, A., Ali, M. A., Gates, W. P., ve Rowe, R. K. (2017). New insight on geosynthetic clay liner hydration: the key role of subsoils mineralogy. *Geosynthetics International*, 24(2), 139-150. <https://doi.org/10.1680/jgein.16.00022>
- Boynton, S. S., ve Daniel, D. E. (1985). Hydraulic Conductivity Tests on Compacted Clay. *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(4), 465-478. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1985\)111:4\(465\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1985)111:4(465))

- Bradshaw, S. L., Benson, C. H., ve 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. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000793](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000793)
- Broderick, G. P., ve Daniel, D. E. (1990). Stabilizing compacted clay against chemical attack. *Journal of Geotechnical Engineering*, 116(10), 1549-1567.
- Cartaud, F., Touze-Foltz, N., ve Duval, Y. (2005). Experimental investigation of the influence of a geotextile beneath the geomembrane in a composite liner on the leakage through a hole in the geomembrane. *Geotextiles and Geomembranes*, 23(2), 117-143. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2004.09.003>
- Chapuis, R. P. (1990). Sand-bentonite liners: predicting permeability from laboratory tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 27(1), 47-57. <https://doi.org/1139/t90-005>
- Chapuis, R. P. (2002). The 2000 R.M. Hardy Lecture: Full-scale hydraulic performance of soil-bentonite and compacted clay liners. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(2), 417-439. <https://doi.org/10.1139/t01-092>
- Chen, J., Tian, K., ve Benson, C. H. (2019). Hydraulic conductivity of bentonite-polymer geosynthetic clay liners to coal combustion product leachates. *Environmental Science and Engineering*, 664-671. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-2224-2\\_82](https://doi.org/10.1007/978-981-13-2224-2_82)
- Chevrier, B., Cazaux, D., Didier, G., Gamet, M., ve 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>
- Daniel, D. E. (1984). Predicting Hydraulic Conductivity of Clay Liners. *Journal of Geotechnical Engineering*, 110(2), 285-300. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1984\)110:2\(285\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1984)110:2(285))
- Daniel, D.E. (1994). State-of-the-art: Laboratory hydraulic conductivity tests for saturated soils, Hydraulic Conductivity and Waste Containment Transport in Soil, ASTM STP 1142 30 (1994).
- Daniel, D. E., ve Benson, C. H. (1990). Water Content-Density Criteria for Compacted Soil Liners. *Journal of Geotechnical Engineering*, 116(12), 1811-1830. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1990\)116:12\(1811\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1990)116:12(1811))
- Daniel, D. E. (1989). In situ hydraulic conductivity tests for compacted clay. *Journal of Geotechnical Engineering*, 115(9), 1205-1226.
- Daniel, D. E. ve Bowders, J. J. (1988). Hydraulic Conductivity of Compacted Clay to Dilute Organic Chemicals. *Journal of Geotechnical Engineering*, 113(12), 1432-1448.
- Daniel, D. E., Trautwein, S. J., ve Goswami, P. K. (1997). Measurement of Hydraulic Properties of Geosynthetic Clay liners using a flow box. *Testing and Acceptance Criteria for Geosynthetic Clay Liners, ASTM STP 1*, 196-207.
- Daniel, D. E., Yung-Kwang, W., ve Wu, Y. K. (1993). Compacted Clay Liners and Covers for Arid Sites. *Journal of Geotechnical Engineering*, 119(2), 223-237. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1993\)119:2\(223\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1993)119:2(223))
- Day, S. R. ve Daniel, D. E. (1985). Hydraulic conductivity of two prototype clay liners. *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(8), 957-970.
- De Camillis, M., Di Emidio, G., Bezuijen, A., ve Verástegui-Flores, R. D. (2016). Hydraulic conductivity and swelling ability of a polymer modified bentonite subjected to wet-dry cycles in seawater. *Geotextiles and Geomembranes*, 44(5), 739-747. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2016.05.007>
- Di Emidio, G., Mazzieri, F., Verástegui-Flores, R.-D., Van Impe, W., ve Bezuijen, A. (2015). Polymer-treated bentonite clay for chemical-resistant geosynthetic clay liners. *Geosynthetic International*, 22(1), 1-13. <https://doi.org/10.1680/gein.14.00036>
- Elsbury, B. R., Daniel, D. E., Sraders, G. a., ve Anderson, D. C. (1990). Lessons Learned from Compacted Clay Liner. *Journal of Geotechnical Engineering*, 116(11), 1641-1660. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1990\)116:11\(1641\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1990)116:11(1641))
- Estornell, P., ve Daniel, D. E. (1992). Hydraulic Conductivity of Three Geosynthetic Clay Liners. *Journal of Geotechnical Engineering*, 118(10), 1592-1606. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1992\)118:10\(1592\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1992)118:10(1592))
- Ewais, A. M. R., Rowe, R. K., Rimal, S., ve Sangam, H. P. (2018). 17-year elevated temperature study of HDPE geomembrane longevity in air, water and leachate. *Geosynthetic International*, 25(5), 525-544. <https://doi.org/10.1680/jgein.18.00016>
- Foreman, B., ve Daniel, D. E., (1986). Permeation of compacted clay with organic chemicals. *Journal of Geotechnical Engineering*, 112(7), 669-681.

- Gleason, M. H., Daniel, D. E., ve Eykholt, G. R. (1997). Calcium and sodium bentonite for hydraulic containment applications. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(5), 438-445. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1997\)123:5\(438\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1997)123:5(438))
- Haug, M. D., ve Wong, L. C. (1992). Impact of molding water content on hydraulic conductivity of compacted sand-bentonite. *Canadian Geotechnical Journal*, 29(2), 253-262. <https://doi.org/10.1139/t92-029>
- Henken-Mellies, U., ve Gartung, E. (2004). Long-term observation of alternative landfill capping systems - field tests on a landfill in Bavaria. *Land Contamination & Reclamation*, 12(1), 21-28. <https://doi.org/10.2462/09670513.636>
- Henken-Mellies, W.-U., ve Schweizer, A. (2011). Long-term performance of landfill covers - results of lysimeter test fields in Bavaria (Germany). *Waste management & research: the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA*, 29(1), 59-68. <https://doi.org/10.1177/0734242X10385748>
- Holtz, R., Kovacs, W., ve Sheahan, T. (2011). *An introduction to geotechnical engineering* (2nd bs). Pearson. <https://trid.trb.org/view/214980>
- Jo, H. Y., Benson, C. H., ve Edil, T. B. (2004). Hydraulic conductivity and cation exchange in non-prehydrated and prehydrated bentonite permeated with weak inorganic salt solutions. *Clays and Clay Minerals*, 52(6), 661-679.
- Jo, H. Y., Benson, C. H., Shackelford, C. D., Lee, J.-M., ve Edil, T. B. (2005). Long-term hydraulic conductivity of a geosynthetic clay liner permeated with inorganic salt solutions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(4), 405-417. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:4\(405\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:4(405))
- Jo, H. Y., Katsumi, T., Benson, C. H., ve Edil, T. B. (2001). Hydraulic conductivity and swelling of nonprehydrated GCLs permeated with single-species salt solutions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(7)(July), 557-567.
- Karakuş, Y., Taşkesti, B. E., ve 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>
- Katsumi, T., Ishimori, H., Ogawa, A., Maruyama, S., ve Fukagawa, R. (2008). Effects of water content distribution on hydraulic conductivity of prehydrated GCLs against calcium chloride solutions. *Soils and Foundations*, 48(3), 407-417. <https://doi.org/10.3208/sandf.48.407>
- Katsumi, T., Ishimori, H., Ogawa, A., Yoshikawa, K., Hanamoto, K., ve Fukagawa, R. (2007). Hydraulic Conductivity of Nonprehydrated Geosynthetic Clay Liners Permeated With Inorganic Solutions and Waste Leachates. *Soils and Foundations*, 47(1), 79-96. <https://doi.org/10.3208/sandf.47.79>
- Katsumi, T., Ishimori, H., Onikata, M., ve Fukagawa, R. (2008). Long-term barrier performance of modified bentonite materials against sodium and calcium permeant solutions. *Geotextiles and Geomembranes*, 26(1), 14-30. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2007.04.003>
- Kaya, A., ve Durukan, S. (2004). Utilization of bentonite-embedded zeolite as clay liner. *Applied Clay Science*, 25(1-2), 83-91. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2003.07.002>
- Kayabalı, K. (1997). Engineering aspects of a novel landfill liner material: bentonite-amended natural zeolite. *Engineering Geology*, 46(2), 105-114. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(96\)00102-0](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(96)00102-0)
- Kayabalı, K., ve Kezer, H. (1998). Testing the ability of bentonite-amended natural zeolite (clinoptinolite) to remove heavy metals from liquid waste. *Environmental Geology*, 34(2-3), 95-102. <https://doi.org/10.1007/s002540050259>
- Kenney, T. C., Veen, W. A. Van, Swallow, M. A., ve Sungaila, M. A. (1992). Hydraulic conductivity of compacted bentonite-sand mixtures. *Canadian Geotechnical Journal*, 29(3), 364-374. <https://doi.org/10.1139/t92-042>
- Kim, W.-H. K., ve Daniel, D. E. (1992). Effects of Freezing on Hydraulic Conductivity of Compacted Clay. *Journal of Geotechnical Engineering*, 118(7), 1083-1097. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1996\)122:1\(85\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:1(85))
- Kleppe, ve Olson. (1985). Desiccation cracking of soil layers.pdf. *In the hydraulic barriers in soil and rock, STP 874, ASTM, Philadelphia*, 263-275.
- Koerner, R. M. (2005). *Designing with Geosynthetics* (5th bs). Pearson/Prentice Hall.
- Kolstad, D., Benson, C., ve Edil, T. (2004). Hydraulic conductivity and swell of nonprehydrated geosynthetic clay liners permeated with multispecies inorganic solutions. *Journal of Geotechnical and ...*, December, 1236-1249. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130)



- Komine, H. (2004). Simplified evaluation on hydraulic conductivities of sand-bentonite mixture backfill. *Applied Clay Science*, 26(1-4 SPEC. ISS.), 13-19. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2003.09.006>
- Kul, T. O., ve Ören, A. H. (2016). The Hydration of Low-Quality GCL Overlying a Sandy Soil. *Geotechnical Special Publication, 2016-Janua*(271 GSP). <https://doi.org/10.1061/9780784480144.009>
- Lee, J. M., Shackelford, C. D., Benson, C. H., Jo, H. Y., ve Edil, T. B. (2005). Correlating index properties and hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(11), 1319-1329.
- Lee, J.-M., ve Shackelford, C. D. (2005a). Concentration dependency of prehydration effect for a geosynthetic clay liner. *Soils and Foundations*, 45(4), 27-41.
- Lee, J.-M., ve Shackelford, C. D. (2005c). Impact of bentonite quality on hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(1), 64-77. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:1\(64\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:1(64))
- Li, Q., Chen, J., Benson, C. H., ve Peng, D. (2021). Hydraulic conductivity of bentonite-polymer composite geosynthetic clay liners permeated with bauxite liquor. *Geotextiles and Geomembranes*, 49(2), 420-429. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2020.10.015>
- Mazzieri, F., Di Emidio, G., Fratolocchi, E., Di Sante, M., ve Pasqualini, E. (2013). Permeation of two GCLs with an acidic metal-rich synthetic leachate. *Geotextiles and Geomembranes*, 40, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2013.07.011>
- McWatters, R. S., Rowe, R. K., Wilkins, D., Spedding, T., Jones, D., Wise, L., Mets, J., Terry, D., Hince, G., Gates, W. P., Di Battista, V., Shoaib, M., Bouazza, A., ve Snape, I. (2016). Geosynthetics in Antarctica: Performance of a composite barrier system to contain hydrocarbon-contaminated soil after three years in the field. *Geotextiles and Geomembranes*, 44(5), 673-685. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2016.06.001>
- Ozhan, H. O. (2018). Hydraulic capability of polymer-treated GCLs in saline solutions at elevated temperatures. *Applied Clay Science*, 161(February), 364-373. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.05.007>
- Ören, A. H., Durukan, S., ve Kayalar, A. Ş. (2014). Influence of compaction water content on the hydraulic conductivity of sandbentonite and zeolite-bentonite mixtures. *Clay Minerals*, 49(1), 109-121. <https://doi.org/10.1180/claymin.2014.049.1.09>
- Ören, A. H., Kaya, A., ve Kayalar, A. Ş. (2011). Hydraulic conductivity of zeolite-bentonite mixtures in comparison with sand-bentonite mixtures. *Canadian Geotechnical Journal*, 48(9), 1343-1353. <https://doi.org/10.1139/t11-042>
- Ören, A. H., Öztürk, M., Kul, T. Ö., ve Nart, Z. (2018). Barrier performance of geosynthetic clay liners to copper (II) chloride solutions. *Environmental Geotechnics*, 7(7), 491-500. <https://doi.org/10.1680/jenge.18.00024>
- Ören, A. H., Öztürk, M., Özdamar Kul, T., ve Nart, Z. (2017). Hydraulic conductivity of sodium and polymerized sodium GCLs to CuCl<sub>2</sub> solution. *Second International Symposium on Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics (CPEG2)*, 1-5.
- Özdamar Kul, T., ve 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>
- Özdamar Kul, T., ve Ören, A. H. (2019). Hydration of geosynthetic clay liners (GCLs) on compacted zeolite. *Geosynthetics International*, 26(1). <https://doi.org/10.1680/jgein.18.00038>
- Park, M. G., Benson, C. H., ve Edil, T. B. (2012). Comparison of batch and double compartment tests for measuring voc transport parameters in geomembranes. *Geotextiles and Geomembranes*, 31, 15-30. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2011.09.001>
- Park, M.-G., Edil, T. B., ve Benson, C. H. (2012). Modeling Volatile Organic Compound Transport in Composite Liners. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(6), 641-657. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000630](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000630)
- Petrov, R. J., Kerry Rowe, R., ve Quigley, R. (1997). Comparison of Laboratory-Measured GCL Hydraulic Conductivity Based on Three Permeameter Types. *Geotechnical Testing Journal*, 20(1), 49. <https://doi.org/10.1520/gtj11420j>
- Petrov, R. J., ve Rowe, R. K. (1997). Geosynthetic clay liner (GCL) - chemical compatibility by hydraulic conductivity testing and factors impacting its performance. *Canadian Geotechnical Journal*, 34(6), 863-885. <https://doi.org/10.1139/cgj-34-6-863>

- Petrov, R. J., Rowe, R. K., ve Quigley, R. (1997). Selected factors influencing GCL hydraulic conductivity. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(8), 683-695.
- Qian, X., Koerner, R. M., ve Gray, D. H. (2002). Geotechnical aspects of landfill design and construction. *Prentice Hall*, 717.
- Rayhani, M. T., Rowe, R. K., Brachman, R. W. I., Take, W. A., ve 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>
- Razakamanantsoa, A. R., Barast, G., ve Djeran-maigre, I. (2012). Hydraulic performance of activated calcium bentonite treated by polyionic charged polymer. *Applied Clay Science*, 59, 103-114. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2012.01.022>
- Rowe, R. K., ve Abdelatty, K. (2012). Effect of a Calcium-Rich Soil on the Performance of an Overlying GCL. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(4), 423-431. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000614](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000614)
- Rowe, R. K., Brachman, R. W. I., Hosney, M. S., Take, W. A., ve Arnepalli, D. N. (2017). Insight into hydraulic conductivity testing of geosynthetic clay liners ( GCLs ) exhumed after 5 and 7 years in a cover. *Canadian Geotechnical Journal*, 1138(March), 1118-1138.
- Rowe, R. K., ve Fan, J. (2021). Effect of geomembrane hole geometry on leakage overlain by saturated tailings. *Geotextiles and Geomembranes*, 49(6), 1506-1518. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2021.06.004>
- Rowe, R. K., Garcia, J. D. D., Brachman, R. W. I., ve Hosney, M. S. (2019). Chemical interaction and hydraulic performance of geosynthetic clay liners isothermally hydrated from silty sand subgrade. *Geotextiles and Geomembranes*, 47(6), 740-754. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2019.103486>
- Rowe, R. K., ve Hamdan, S. (2021). Effect of wet-dry cycles on standard & polymer-amended GCLs in covers subjected to flow over the GCL. *Geotextiles and Geomembranes*, 49(5). <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2021.03.010>
- Rowe, R. K., ve Hoor, A. (2009). Predicted temperatures and service lives of secondary geomembrane landfill liners. *Geosynthetics International*, 16(2), 71-82. <https://doi.org/10.1680/gein.2009.16.2.71>
- Rowe, R. K., ve 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. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2020.12.007>
- Rowe, R. K., Sangam, H. P., ve Lake, C. B. (2003). Evaluation of an HDPE geomembrane after 14 years as a leachate lagoon liner. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(3), 536-550. <https://doi.org/10.1139/t03-019>
- Ruhl, J. L., ve Daniel, D. E. (1997). Geosynthetic clay liners permeated with chemical solutions and leachates. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(4), 369-381. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1997\)123:4\(369\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1997)123:4(369))
- Salemi, N., Abtahi, S. M., Rowshanzamir, M. A., ve Hejazi, S. M. (2019). Improving hydraulic performance and durability of sandwich clay liner using super-absorbent polymer. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 21(3), 1055-1071. <https://doi.org/10.1177/1099636217707559>
- Sällfors, G., ve Öberg-Högsta, A. L. (2002). Determination of hydraulic conductivity of sand-bentonite mixtures for engineering purposes. *Geotechnical and Geological Engineering*, 20(1), 65-80. <https://doi.org/10.1023/A:1013857823676>
- Sarabian, T., ve Rayhani, M. T. (2013). Hydration of geosynthetic clay liners from clay subsoil under simulated field conditions. *Waste Management*, 33(1), 67-73. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.08.010>
- Scalia, J., ve Benson, C. H. (2010). Effect of permeant water on the hydraulic conductivity of exhumed GCLs. *Geotechnical Testing Journal*, 33(3). <https://doi.org/10.1520/GTJ102609>
- Scalia, J., Benson, C. H., Edil, T. B., Bohnhoff, G. L., ve Shackelford, C. D. (2011). Geosynthetic clay liners containing bentonite polymer nanocomposite. *Geo-Frontiers*, 2001-2009. [https://doi.org/10.1061/41165\(397\)204](https://doi.org/10.1061/41165(397)204)
- Scalia, J., ve Benson, C. H. (2017). Polymer Fouling and Hydraulic Conductivity of Mixtures of Sodium Bentonite and a Bentonite-Polymer Composite. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(4), 1-13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT)
- Scalia, J., Benson, C. H., Bohnhoff, G. L., Edil, T. B., ve Shackelford, C. D. (2014). Long-term hydraulic conductivity of a bentonite-polymer composite permeated with aggressive inorganic solutions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(3), 1-13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001040](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001040)
- Shackelford, C. D., Benson, C. H., Katsumi, T., Edil, T. B., ve Lin, L. (2000). Evaluating the Hydraulic Conductivity of GCL Permeated with Non-standard Liquids. *Geotextiles and Geomembranes*, 18, 133-161.

- Shackelford, C. D., Sevick, G. W., ve Eykholt, G. R. (2010). Hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners to tailings impoundment solutions. *Geotextiles and Geomembranes*, 28(2), 149-162. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2009.10.005>
- Stern, R. T., ve Shackelford, C. D. (1998). Permeation of sand-processed clay mixtures with calcium chloride solutions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(3), 231-241. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1998\)124:3\(231\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1998)124:3(231))
- Taşkesti, B. E., Özdamar-Kul, T., ve Ören, A. H. (2019). Influence of mass per unit area on the hydration of GCLs over silty sand. *Proceedings of the XVII ECSMGE-2019*. <https://doi.org/10.32075/17ECSMGE-2019-0905>
- T.C. Çevre, Ş. ve İ. D. B. (2015). *Maden Atıkları Yönetmeliği*, 1-7.
- T.C. Çevre, Ş. ve İ. D. B. (2015). Çevresel Göstergeler, Atık, 7.2 Atık Düzenli Depolama Tesis Sayısı-Belediye Sayısı-Hizmet Verilen Nüfus
- Tong, S., ve Shackelford, C. D. (2016). Standardized hydraulic conductivity testing of compacted sand-bentonite mixtures. *Geotechnical Testing Journal*, 39(6), 20150204. <https://doi.org/10.1520/GTJ20150204>
- Vasko, S., young Jo, H., ve Katsumi, T. (2001). *Hydraulic conductivity of partially prehydrated geosynthetic clay liners permeated with aqueous calcium chloride solutions*. *Di*, 685-699.
- Wang, B., Xu, J., Chen, B., Dong, X., ve Dou, T. (2019). Hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners to inorganic waste leachate. *Applied Clay Science*, 168(August 2018), 244-248. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.11.021>
- Wireko, C., Abichou, T., Tian, K., Zainab, B., ve Zhang, Z. (2022). Effect of incineration ash leachates on the hydraulic conductivity of bentonite-polymer composite geosynthetic clay liners. *Waste Management*, 139(June 2021), 25-38. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.011>
- Zainab, B., Wireko, C., Li, D., Tian, K., ve Abichou, T. (2021). Hydraulic conductivity of bentonite-polymer geosynthetic clay liners to coal combustion product leachates. *Geotextiles and Geomembranes*, 49(5), 1129-1138. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2021.03.007>