

MADEN ATIK SULARINA KARŞI GEOSENTETİK KİL ÖRTÜLERİN BARIYER PERFORMANSININ İNCELENMESİ

BARRIER PERFORMANCE OF GEOSYNTHETIC CLAY LINERS TO MINING WASTEWATER

Asena İrem DEMİR SÜRER¹, Tuğçe ÖZDAMAR KUL², Ali Hakan ÖREN³

ÖZET

Bu çalışmada, birim alan başına bentonit kütlesinin (BABBK) geosentetik kil örtülerin (GKÖ) hidrolik iletkenlik davranışı üzerine etkisi incelenmiştir. Maden atık sahalarındaki durumu temsil etmesi adına laboratuvar ortamında sentetik soda külü sızıntı suyu (SKSS) ve kömür külü sızıntı suyu (KKSS) hazırlanmıştır. BABBK'sı 3.0 kg/m², 4.0 kg/m² ve 5.0 kg/m² olan GKÖ'ler içerisinde SKSS ve KKSS süzdürülerek hidrolik iletkenlik deneylerine tabi tutulmuştur. Hidrolik iletkenlik deneyleri 35 kPa efektif gerilme altında ön ıslatmasız şekilde yapılmıştır. Sonuçlar doğrultusunda BABBK'nın artışıyla hidrolik iletkenlik değerlerinin azaldığı görülmüştür. BABBK 3.0 kg/m²'den 5.0 kg/m²'ye çıktığı zaman hidrolik iletkenlik değerinin SKSS ile yapılan deneylerde 5 merteye (100000 kat), KKSS süzdürülen deneylerde ise 2 merteye (100 kat) azaldığı görülmüştür. BABBK'nın artmasıyla hidrolik iletkenlik değerinde meydana gelen düşüş SKSS geçirilerek yapılan deneylerde fazladır. Bu farkın sebebi SKSS'nin iyonik gücünün yüksek olmasıdır. Süzüntü sıvısının iyonik gücü arttıkça BABBK'nın hidrolik iletkenlik üzerindeki etkisi daha önemli bir hal almaktadır. Benzer durum GKÖ'lerin şişme indisi testleri için de geçerlidir. İyonik gücü yüksek olan SKSS içerisinde bentonitin şişme indisi 9 ml/2g iken KKSS ile yapılan şişme indisi testinde bu değer 21 ml/2g olarak bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Hidrolik iletkenlik, geosentetik kil örtü, birim alan başına bentonit kütlesi, soda külü sızıntı suyu, kömür külü sızıntı suyu

ABSTRACT

In this study, the influence of mass per unit area (MPUA) on the hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners was investigated. GCLs with 3.0 kg/m², 4.0 kg/m² and 5.0 kg/m² were tested with trona ash leachate (TAL) and coal combustion leachate (CCL), which are the coal combustion products (CCP), to represent the mine tailings facilities. Hydraulic

¹ İnşaat Mühendisi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, demirasena@hotmail.com (Sorumlu yazar)

² Dr., Dokuz Eylül Üniversitesi Geoteknik Ana Bilim Dalı, tugce.ozdamar@deu.edu.tr

³ Prof. Dr., Dokuz Eylül Üniversitesi Geoteknik Ana Bilim Dalı, ali.oren@deu.edu.tr

conductivity tests were conducted on non-prehydrated specimens at an effective stress of 35 kPa. Results showed that the hydraulic conductivity values decreased with an increase in the MPUA of GCLs. That is, the hydraulic conductivity of GCLs permeated with TAL and CCL decreased up to five and two orders of magnitude when MPUA increased from 3.0 kg/m² to 5.0 kg/m², respectively. Furthermore, the difference between the hydraulic conductivities was more pronounced when GCLs were permeated with TAL. Similar results were also seen in the swell index of GCLs. The swell indices of bentonite were also determined as 9 and 21 ml/2g with TAL and CCL, respectively.

Keywords: *Hydraulic conductivity, geosynthetic clay liners, mass per unit area, trona ash leachate, coal combustion leachate*

1. GİRİŞ

Kömür yanma atıkları, kömürle çalışan enerji santrallerinde kömürün yanması sonucu oluşan atık yan ürünlerdir. Kömür yanma atıkları arasında uçucu kül, alt kül, baca gazı kükürt giderme (FGD) malzemeleri, kazan cürufu ve kömür yanmasının diğer yan ürünleri bulunur. Geri dönüştürülemeyen atıklar, maden atık havuzlarında depolanmaktadır. Özellikle su ile temas ettiklerinde, çeşitli ana ve eser katyon-anyonların salınımı meydana gelmektedir. Meydana gelen bu salınımla birlikte atıklar yeraltı suyuna sızabilmekte ve kirliliğe sebep olabilmektedir (Sönmez ve Işık, 2020).

Kömür yanma atıkları içerisinde bulunan toksik maddelerin sızıntısının önlenmesi çevre kirliliği ve insan sağlığı açısından büyük önem arz etmektedir. Amerika Birleşik Devletleri çevre ajansının (USEPA) maden atıklarının bertarafına ilişkin yayınladığı kurallarda, depolama alanlarında hidrolik iletkenliğin 1×10^{-9} m/s'yi geçmemesi şartıyla kompozit örtülerin (en az 0.6 m sıkıştırılmış kil tabakasının üzerinde geomembran) kullanılması gerektiği belirtilmiştir. Yapılan düzenlemelerde kompozit örtülerin yerine geosentetik kil örtülerin de (GKÖ) kullanılabileceği ifade edilmiştir (Federal Register, 2015).

GKÖ'ler genellikle örgülü ve örgüsüz geotekstillerin arasına ince bir bentonit tabakası serildikten sonra iğnelenerek üretilen sentetik malzemelerdir (Koerner, 2005). Sızıntılara karşı bariyer olarak kullanılan GKÖ'nün geçirimsizliği, içindeki bentonitin hidrolik iletkenlik özelliği ile ilişkilendirilmektedir (Benson ve Meer, 2009; Jo et vd., 2005, 2001; Ören ve Demirkıran 2015; Özdamar Kul ve Ören 2018; Petrov vd., 1997; Petrov ve Rowe 1997; Scalia vd., 2014).

Yüksek su tutma ve şişme kapasitesine sahip bentonitin suya karşı hidrolik iletkenliği oldukça düşüktür ($\sim 10^{-11}$ m/s). Kömür yanma ürün sızıntı suları bünyesinde bol miktarda çift değerlikli iyon (Ca^{+2} ve Mg^{+2}) içermektedir. GKÖ içerisindeki bentonit bu sıvılar ile karşılaştığında katyon değişimine maruz kalarak geçirimsizliğini önemli ölçüde kaybedebilmektedir (Bouazza, 2002; De Camillis vd., 2016; Kolstad vd., 2004; R. J. Petrov vd., 1997; Ruhl ve Daniel, 1997; Scalia vd., 2014; Setz vd., 2017; Shackelford vd., 2000).

Son dönemdeki çalışmalar maden atık sıvılarının GKÖ'lerin hidrolik iletkenliği üzerindeki etkisini incelemektedir (Chen vd. 2018, 2019; Zainab ve Tian, 2020; Zainab vd. 2021). Yapılan çalışmalarda genel olarak ön ıslatma, efektif gerilme ve polimer katkısının GKÖ'lerin bariyer performansına etkisi irdelenmiştir. Elde edilen sonuçlar efektif gerilmenin

artmasının, GKÖ'nün hidrasyona tabi tutulmasının ve GKÖ'ye eklenen polimer katkıların hidrolik iletkenliği önemli ölçüde azalttığını göstermektedir (Chen vd. 2018, 2019; Zainab ve Tian, 2020; Zainab vd. 2021). Ancak yapılan bu çalışmalarda GKÖ içerisindeki bentonitin birim alan başına bentonit kütlesinin (BABBK) GKÖ'nün maden atık suları ile geçirimsizliğine etkisi irdelenmemiştir.

Son dönemde GKÖ'ler üzerinde yapılan çalışmalarda BABBK'nin hidrolik iletkenlik üzerinde önemli bir etkisi olabileceği vurgulanmıştır (Rowe ve Hamdan, 2021; Salemi vd., 2018). Süzüntü sıvısı olarak damıtık su (DS) kullanıldığı durumlarda BABBK'deki artışın hidrolik iletkenlikte eser miktarda azalmaya yol açtığı araştırmacılar tarafından belirtilmiştir (Ören vd., 2022; Von Maubeuge ve Ehrenberg, 2014). Ancak süzüntü sıvısının DS'den farklı olması durumunda BABBK'nin hidrolik iletkenlik üzerindeki etkisi detaylı olarak incelenmemiştir. Bu sebeple, burada sunulan çalışma kapsamında maden atık sularının farklı BABBK'lere sahip GKÖ'lerin hidrolik iletkenlik davranışına etkisi irdelenmiştir.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Malzemeler

Geosentetik Kil Örtü (GKÖ)

Çalışma kapsamında yerel bir üreticiden temin edilen GKÖ kullanılmıştır. BABBK'nin etkisinin irdelenmesi için GKÖ rulosundan 110 mm çapında örnekler kesilmiştir. Kesilen örneklerin BABBK'leri ASTM: D5993-14'e göre belirlenmiştir. GKÖ'ler BABBK'si 3.0 kg/m², 4.0 kg/m² ve 5.0 kg/m² olacak şekilde sınıflandırılmıştır. BABBK'si 3.0±0.2 kg/m² olan GKÖ; GKÖ-3, 4.0±0.2 kg/m² olan GKÖ-4 ve 5.0±0.2 kg/m² olan GKÖ-5 olarak isimlendirilmiştir.

Süzüntü Sıvıları

Yapılan deneyler kapsamında süzüntü sıvısı olarak, maden atık sularını temsil etmesi adına soda külü sızıntı suyu (SKSS) ve kömür külü sızıntı suyu (KKSS) kullanılması planlanmıştır. Bu sıvılar laboratuvar ortamında sentetik olarak hazırlanmıştır. Maden atık sularından SKSS'nin hazırlanması sırasında CaSO₄, Na₂SO₄, MgSO₄ ve K₂SO₄ tuzları; KKSS'nin hazırlanması sırasında ise CaSO₄, Na₂SO₄, MgSO₄, K₂SO₄, NaCl ve CaCl₂ tuzları DS içerisinde çözündürülmüştür. Hazırlanan süzüntü sıvıları laboratuvarında 5 litrelik musluklu bidonlar içerisinde muhafaza edilmiştir.

İyonik güç (I), kimyasalların GKÖ'lerin hidrolik iletkenliği üzerindeki etkisini ifade ederken dikkate alınan önemli bir parametredir (Kolstad vd., 2004). İyonik güç, aşağıdaki verilen Denklem 1 ile tanımlanır:

$$I = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n c_i z_i^2 \quad (1)$$

burada c_i= geçirgen çözeltideki i iyonunun molar konsantrasyonu; ve z_i= i. iyonun değeridir. Hazırlanan çözeltilerin kimyasal özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Süzüntü sıvılarının kimyasal özellikleri

Kimyasal Özellikler	Soda Külü Sızıntı Suyu SKSS	Kömür Külü Sızıntı Suyu KKSS
Na ⁺ (mM)	647.00	10.00
K ⁺ (mM)	5.77	1.52
Ca ⁺² (mM)	11.80	7.02
Mg ⁺² (mM)	6.11	0.80
SO ₄ ⁻² (mM)	414.00	16.50
Cl ⁻ (mM)	-	2.00
İyonik Güç (mM)	758.3	39.5

2.2. Yöntemler

Hidrolik İletkenlik Deneyi

Hidrolik iletkenlik deneyleri esnek duvarlı permametre hücreleri içerisinde 35 kPa'lık hücre basıncı altında ve ortalama 40 hidrolik eğim değerinde gerçekleştirilmiştir (ASTM:D6766-14, 2014). GKÖ örneklerin ağırlıkları tartılmış; yükseklik ve çapları kumpas yardımı ile ölçülmüştür. Örnek çeperinden bentonit kaybının önlenmesi ve deneyler sırasında çeperden sızdırmazlığın sağlanması için GKÖ örneklerinin çevresi bentonit pastası ile sıvanmıştır. Daha sonra iki adet örgüsüz geotekstil arasına yerleştirilen örnekler permametre hücresinin alt ve üst başlıkları arasına konmuştur. Sistemde sızdırmazlığın sağlanması için örnek çevresi tekrar bentonit pastası ile sıvanmış, üzerine lateks membran geçirildikten sonra alt ve üst başlığa üçer adet O-halka takılmıştır. Deneyler başlatılmadan önce, giriş vanası açık çıkış vanası kapalı halde 24 saat kendi sıvılarıyla hidrate edilmiştir. 24 saatin sonunda akış yukarıdan aşağıya olacak şekilde, çıkış vanası açılarak deneyler başlatılmıştır. Çıkış sıvıları 100 ml seviyeli mezürler içerisinde toplanmıştır.

Serbest Şişme Deneyi

GKÖ'lerin şişme indisleri rulodan alınan GKÖ'ler (bundan sonra orijinal GKÖ olarak isimlendirilecektir) için ve hidrolik iletkenlik deneyleri tamamlandıktan sonraki durumlar için ayrı ayrı belirlenmiştir. Orijinal GKÖ'lerin şişme indisleri süzüntü sıvıları (SKSS ve KKSS) ve DS ile belirlenirken; hidrolik iletkenlik sonrası GKÖ'lerin şişme indisleri DS ile belirlenmiştir.

Deneyler ASTM:D5890-11'de (2011) belirtilen yöntem uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla öncelikle GKÖ'lerin içinden çıkarılan bentonitler 105°C'de kurutulmuş, daha sonra havanda dövülerek toz haline getirilmiş ve standart No.200 (75µm) elekten elenmiştir. Eleme işlemi sonrasında şişme indisinin belirlenmesi için 2 g numuneler ayrılmıştır. Daha sonra, kullanılacak 2 g bentonitten 0.1 g'lık örnekler alınıp 90 ml seviyesine kadar sıvıyla dolu ölçekli cam mezür içine serbest halde dökülmüştür. Her adımda 0.1 g'lık bentonit 30 s mezür içine boşaltılmış ve hidrate olması için 10 dakika beklenmiştir. Bu işleme 2 g örnek bitinceye kadar devam edilmiştir. İşlem sonunda mezürdeki su seviyesi 100 ml seviyesine tamamlanmış ve mezür ağzı parafilm ile kapatılarak bentonitin bir gün boyunca şişmesini tamamlaması beklenmiştir. Bir gün sonraki şişme miktarı cam mezürden okunarak kaydedilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Hidrolik İletkenlik

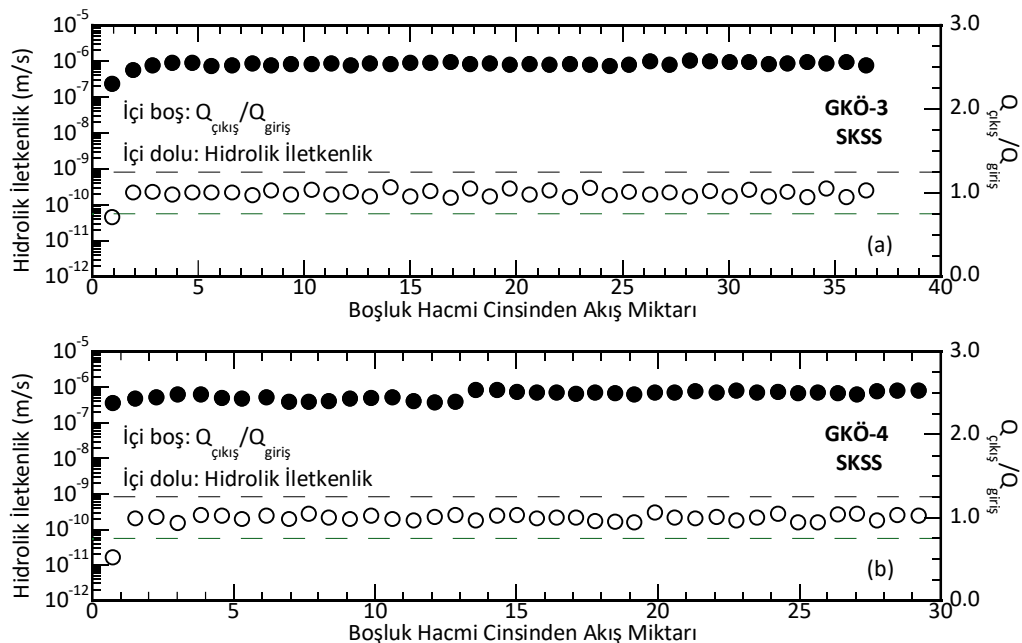
Bu çalışma kapsamında BABBK'si 3.0 kg/m^2 , 4.0 kg/m^2 ve 5.0 kg/m^2 olan GKÖ'ler ile 6 adet hidrolik iletkenlik deneyi gerçekleştirilmiştir. SKSS ve KKSS kullanılarak yapılan hidrolik iletkenlik deneylerinden elde edilen nihai sonuçlar Tablo 2'de verilmiştir. SKSS ile yapılan deneylerde GKÖ'lerin hidrolik iletkenlikleri 10^{-7} - 10^{-11} m/s aralığında değişirken KKSS ile yapılan deneylerde 10^{-9} - 10^{-11} m/s mertebelerinde hidrolik iletkenlikler bulgulanmıştır. Süzüntü sıvısı türü ve BABBK'ye bağlı olarak GKÖ'lerin hidrolik iletkenliklerinin önemli ölçüde değiştiği gözlemlenmiştir (Tablo 2).

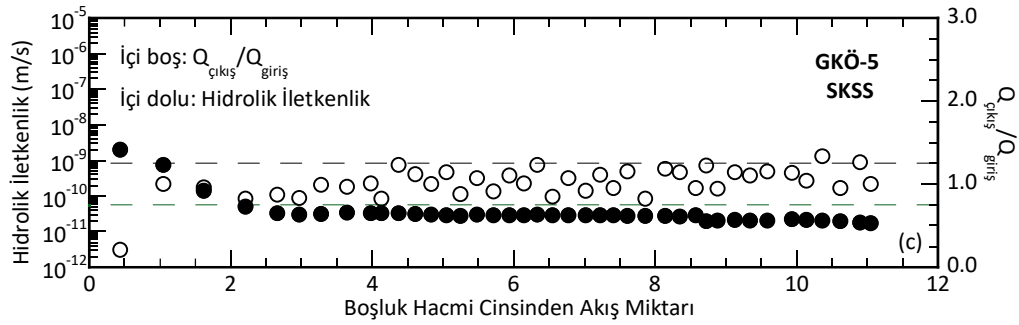
Tablo 2. Hidrolik iletkenlik deneylerinin nihai sonuçları

GKÖ	Süzüntü Sıvısı	Hidrolik İletkenlik (m/s)	BHCAM	Deney Süresi (gün)
GKÖ-3	SKSS	8.7×10^{-7}	36.5	~ 1
GKÖ-4	SKSS	7.7×10^{-7}	29.23	~ 1
GKÖ-5	SKSS	1.6×10^{-11}	11.05	349
GKÖ-3	KKSS	3.3×10^{-9}	46.3	204
GKÖ-4	KKSS	1.1×10^{-11}	4.54	307
GKÖ-5	KKSS	1.6×10^{-11}	9.77	420

SKSS ile Hidrolik İletkenlik

Çalışma kapsamında GKÖ'lerin SKSS ile hidrolik iletkenliği BABBK'ye göre irdelenmiştir. GKÖ-3, GKÖ-4 ve GKÖ-5'in SKSS ile yapılan hidrolik iletkenlik deneylerinin sonuçları BHCAM'nin fonksiyonu olarak Şekil 1'de verilmiştir. Şekil 1'de içi dolu semboller hidrolik iletkenliği; içi boş semboller ise çıkış sıvısının giriş sıvısına oranını belirtmektedir ($Q_{\text{çıkış}}/Q_{\text{giriş}}$). Ayrıca fiziksel denge koşulu için gerekli sınır koşulları ($Q_{\text{çıkış}}/Q_{\text{giriş}} = 1.0 \pm 0.25$) aynı grafik üzerinde kesikli çizgiler ile gösterilmiştir.

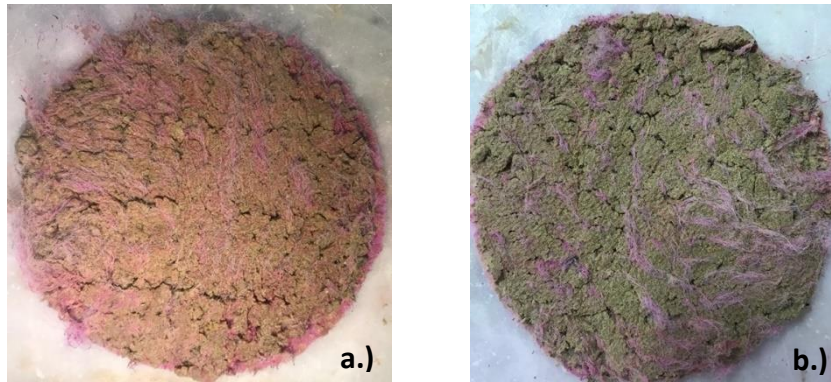




Şekil 1. SKSS ile süzdürülen a) GKÖ-3, b) GKÖ-4 ve c) GKÖ-5'in hidrolik iletkenlik davranışları.

Şekil 1a ve Şekil 1b'den görüleceği gibi GKÖ-3 ve GKÖ-4'ün hidrolik iletkenlik değerleri deneylerin başından sonuna kadar yüksek bulgulanmıştır. Deneyler başlatıldığında hidrolik iletkenlik değerleri GKÖ-3 ve GKÖ-4 için sırasıyla 2.3×10^{-7} m/s, 3.5×10^{-7} m/s'dir. Deneyler devam ettirildiğinde örneklerin hidrolik iletkenlikleri bir miktar artış (~ 3 katlık) göstererek GKÖ-3 için ~ 35 BHCAM'de 7.5×10^{-7} m/s, GKÖ-4 için ise ~ 30 BHCAM'de 7.3×10^{-7} m/s olarak belirlenmiştir.

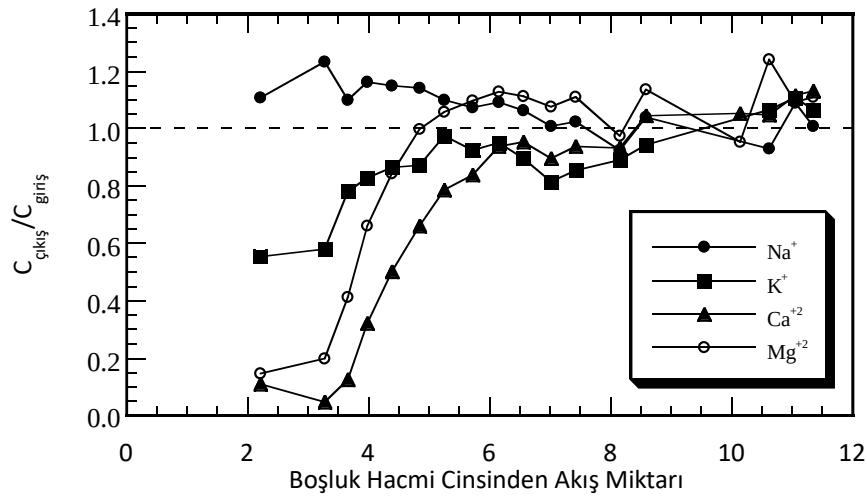
Elde edilen hidrolik iletkenlik değerleri birçok çevre ajansı tarafından önerilen bariyer limit değerinin (2×10^{-9} m/s) üzerindedir. Bu sebeple, deneyler sırasında çeperden sızma olup olmadığının kontrol edilmesi için örnekler Rhodamine boya testi yapılmıştır. Deney sonunda permeametre hücrelerinden çıkarılan GKÖ'lerin tekstilleri bir arada tutan lifleri kesilerek bentonit kısmı açığa çıkarılmış ve görüntülenmiştir (Şekil 2). Şekil 2a-b'de görülen pembe alanlar akışın gerçekleştiği bölgeleri göstermektedir. Şekil 2 detaylı incelendiğinde akışın GKÖ örneklerinin yüzeyi boyunca yer alan liflerden gerçekleştiği herhangi bir çeperden sızma durumunun olmadığı görülmüştür.



Şekil 2. SKSS süzdürülen a) GKÖ-3 ve b) GKÖ-4'ün boya testinden sonraki görüntüleri

Bununla birlikte, GKÖ-5 ile yapılan hidrolik iletkenlik deneylerinde GKÖ-3 ve GKÖ-4'ten farklı bir davranış gözlemlenmiştir. Deney başında 2×10^{-9} m/s olan hidrolik iletkenlik değeri zaman içerisinde de azalarak 10^{-11} m/s mertebelerine kadar düşmüştür (Şekil 1c). BABBK'nin 5.0 kg/m^2 'ye çıkması GKÖ'nün hidrolik iletkenliğini önemli ölçüde azaltmıştır. Başlangıç hidrolik iletkenlik değerleri karşılaştırıldığında GKÖ'nün hidrolik iletkenliğini 100 kat azaltırken; nihai hidrolik iletkenliklere bakıldığında bu fark 10000 kata kadar çıkmıştır. BABBK'nin arttırılması GKÖ'yü SKSS'nin negatif etkilerine dayanıklı hale getirmiştir.

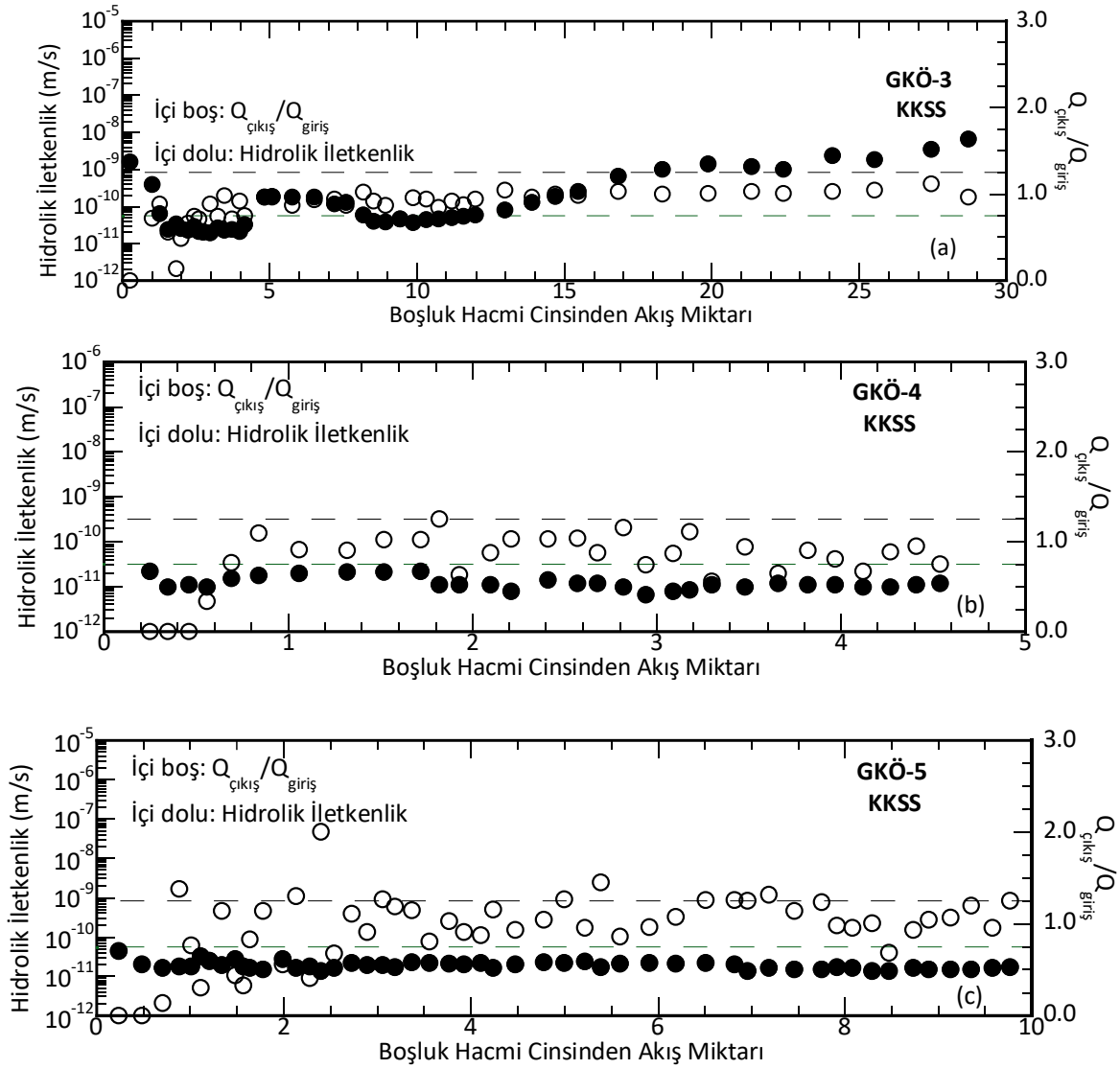
Deneyler sırasında kimyasal dengenin kontrolü için çıkış sıvılarından örnekler alınmıştır. Alınan bu örneklerin katyon (Na^+ , K^+ , Mg^{+2} ve Ca^{+2}) konsantrasyonları ICP-OES cihazı ile belirlenmiştir. Şekil 3'te GKÖ-5'in hidrolik iletkenlik deneyleri süresince alınan çıkış sıvılarının katyon konsantrasyonların giriş sıvısındaki konsantrasyonlara oranı ($C_{\text{çıkış}}/C_{\text{giriş}}$) BHCAM'nın fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Şekil 3'ten görüleceği gibi $C_{\text{çıkış}}/C_{\text{giriş}}$ oranı K^+ , Mg^{+2} ve Ca^{+2} için ~6 BHCAM'ye kadar artış göstermiştir. Na^+ iyonu için $C_{\text{çıkış}}/C_{\text{giriş}}$ deney başından itibaren 1.0'a yakın elde edilmiştir. Bu durum SKSS'nin Na^+ konsantrasyonu açısından zengin olmasından kaynaklanmaktadır. $C_{\text{çıkış}}/C_{\text{giriş}}$ oranının 1.0'a yaklaşması iyonlar için kırılma eğrilerinin oluştuğunu ve kimyasal dengenin sağlandığını ifade etmektedir.



Şekil 3. SKSS ile süzdürülen GKÖ-5'in katyon değişim oranları

KKSS ile Hidrolik İletkenlik

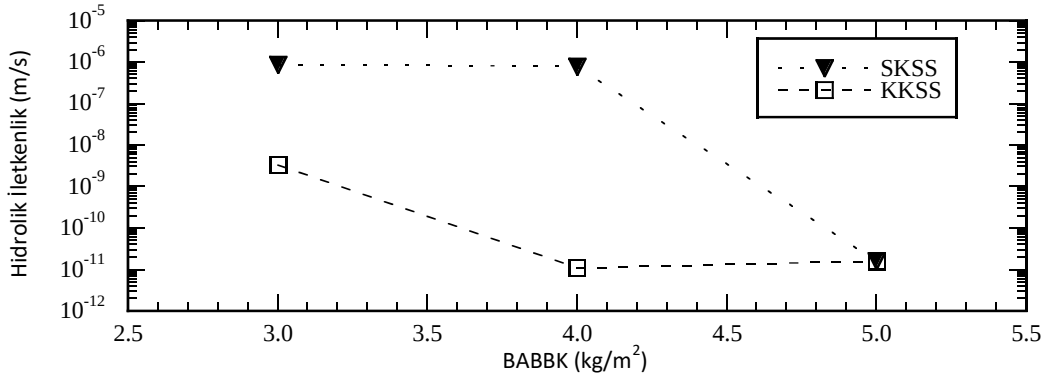
KKSS'nin GKÖ'lerin hidrolik iletkenliğine etkisi GKÖ-3, GKÖ-4 ve GKÖ-5 üzerinde incelenmiştir (Şekil 4). Şekil 4a'dan görüleceği gibi GKÖ-3'ün hidrolik iletkenlik değeri deney başında 10^{-9} m/s mertebelerinde iken zamanla azalmıştır. Ancak örnek içinden yaklaşık 10 BHCAM kadar akış geçtikten sonra hidrolik iletkenlik değeri tekrar artış eğilimine girmiş nihai olarak 3.3×10^{-9} m/s mertebesine ulaşmıştır (Şekil 4a). GKÖ-3'ün hidrolik iletkenliğindeki bu artış GKÖ ile KKSS arasında meydana gelen katyon değişiminden kaynaklanmaktadır. GKÖ içerisindeki bentonitin bünyesindeki Na^+ iyonları KKSS içerisindeki çift değerlikli iyonlarla (Mg^{+2} ve Ca^{+2}) yer değiştirmektedir. Bu durum bentonit parçacıklarının çevresindeki absorbe su tabakasının baskılanmasına ve sıvının geçeceği tercihi akış kanallarının oluşmasına neden olmaktadır (Scalia vd., 2010). Bununla birlikte GKÖ-4 ve GKÖ-5 ile yapılan deneylerde başlangıçta 10^{-10} m/s mertebelerinde olan hidrolik iletkenlikler hafifçe azalmış ve nihai olarak 1.0×10^{-11} m/s'ye inmiştir (Şekil 4b-c).



Şekil 4. KKSS ile süzdürülen a) GKÖ-3, b) GKÖ-4 ve c) GKÖ-5'in hidrolik iletkenlik davranışları.

BABBK'nin Hidrolik İletkenlik Üzerindeki Etkisi

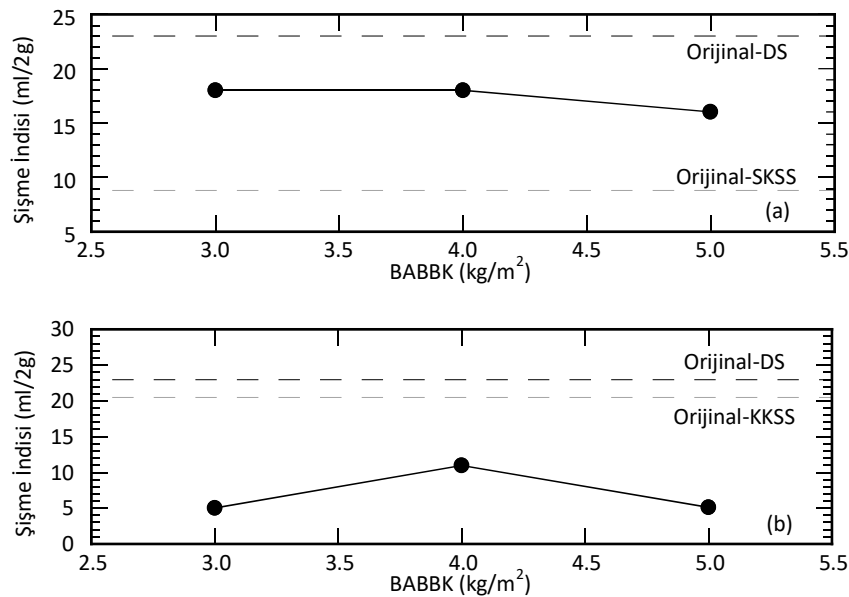
BABBK'nin GKÖ'lerin hidrolik iletkenlik üzerindeki etkisi süzdürme sıvısı türüne bağlı olarak Şekil 5'te incelenmiştir. Şekil 5'ten de görüldüğü üzere BABBK'nin artması GKÖ'nün hidrolik iletkenlik değerinde azalmaya neden olmuştur. Hidrolik iletkenlik değerlerindeki azalma SKSS ile süzdürülen örneklerde BABBK'nin 5.0 kg/m² olduğu durumda gözlemlenirken; KKSS ile süzdürülen örneklerde 4.0 kg/m² BABBK'de görülmüştür. Bu durum SKSS'nin iyonik gücünün KKSS'ye göre önemli ölçüde yüksek olmasından kaynaklanmaktadır ($I_{SKSS}=758$ mM, $I_{KKSS}= 39.5$ mM). Elde edilen sonuçlar, maden atık sıvılarının depolanacağı alanlarda yapılacak uygulamalarda süzöntü sıvısının iyonik gücüne bağlı olarak GKÖ'lerin BABBK değerlerine dikkat edilmesi gerektiğini göstermektedir.



Şekil 5. SKSS ve KKSS süzdürülerek elde edilen nihai hidrolik iletkenlik değerlerinin BABBK'ye göre kıyaslanması.

3.2. Şişme İndisi

Orijinal ve hidrolik iletkenlik deneylerinde kullanılan GKÖ örneklerinin içerisinde çıkarılan bentonitler üzerinde serbest şişme deneyleri yapılmıştır. Orijinal bentonit kullanılarak yapılan serbest şişme deneylerinde GKÖ'nün şişme indisi DS içerisinde 24 ml/2g, SKSS içerisinde 8.8 ml/2g ve KKSS içerisinde ise 20.5 ml/2g bulunmuştur. SKSS ve KKSS ile yapılan deneylerde şişme indisi değerlerinde elde edilen bu fark sıvıların iyonik güçlerinin birbirinden farklı olmasından kaynaklanmaktadır (Jo vd., 2001; Kolstad vd., 2004; Shackelford vd., 2000). SKSS'nin iyonik gücü KKSS'den 20 kat daha yüksektir. Bu da bentonitin şişme indisini sınırlamaktadır. BABBK'nin şişme indisi üzerindeki etkisinin irdelenmesi amacıyla hidrolik iletkenlik deneylerine tabi tutulmuş GKÖ'lerin şişme indisi değerleri ayrıca incelenmiştir. Hidrolik iletkenlik deneylerinden çıkarılan GKÖ'lerin DS ile şişme indislerinin değişimi Şekil 6'da gösterilmiştir. Orijinal GKÖ'den alınan bentonitin DS, SKSS ve KKSS ile elde edilen şişme indisi değerleri de aynı grafikler üzerinde kesikli çizgiler ile belirtilmiştir.



Şekil 6. BABBK'nin a) SKSS, b) KKSS ile süzdürülmüş bentonitlerin şişme indisine etkisi

Şekil 6a ve Şekil 6b'de sırasıyla SKSS ve KKSS ile hidrolik iletkenlik deneylerine tabi tutulmuş GKÖ'lerden alınan bentonitlerin şişme indisi değerlerinin değişimi görülmektedir. SKSS ile

süzdürülmüş GKÖ'lerin deney sonrası şişme indisi değerleri GKÖ-3, GKÖ-4 ve GKÖ-5 için sırasıyla 18 ml/2g, 18 ml/2g ve 16 ml/2g bulunmuştur (Şekil 6a). Elde edilen şişme indisi değerleri orijinal GKÖ'den alınan bentonitin SKSS ile elde edilen şişme indisi değerinden yüksek; DS ile elde edilen değerinden ise düşüktür. Bu beklenen bir durumdur. Zira katyon değişimine uğramış bentonitin suyun seyreltici etkisi nedeniyle şişme indisleri genelde tuz çözeltisinden daha yüksek elde edilmektedir (Ören ve Akar, 2017). Diğer yanda KKSS ile hidrolik iletkenlik sonrası bentonitin her üç BABBK'de DS ile yapılan deneylerde şişme indisi değerleri sırasıyla 5 ml/2g, 11 ml/2g ve 5.1 ml/2g bulunmuştur. Bu değerler orijinal GKÖ'den alınan bentonitin KKSS ile elde edilen şişme indisi değerlerinden oldukça düşüktür. Bu bulgu Chen vd., 2018 ve 2019 ile uyumlu olup, buna yol açan sebep tam olarak bilinmemektedir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında farklı BABBK'lere sahip (3.0 kg/m², 4.0 kg/m² ve 5.0 kg/m²) GKÖ'lerin hidrolik iletkenlikleri maden atık sıvılarından SKSS ve KKSS kullanılarak belirlenmiştir. Buna ilave olarak hidrolik iletkenlik deneylerinden çıkarılan GKÖ'lerin şişme indisleri belirlenerek orijinal bentonitlerin şişme indisi değerleri ile karşılaştırılmıştır. Yapılan deneyler sonunda elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- SKSS ile yapılan deneylerde 3.0 kg/m² ve 4.0 kg/m² BABBK'ye sahip örneklerin hidrolik iletkenlikleri yüksek ($>10^{-9}$ m/s) ölçülmüştür. Bu durum SKSS'nin iyonik gücünün yüksek olması sebebi ile bentonit danelerinin şişmesinin sınırlandırarak lifler üzerinden tercihi akış kanalları oluşturmamasından kaynaklanmıştır. BABBK miktarının artması lifler arasındaki boşlukların bentonit daneleri ile dolmasına ve hidrolik iletkenlik değerinin ~50000 kat azalmasına neden olmuştur.
- KKSS ile yapılan deneylerde ise GKÖ-3'ün hidrolik iletkenliği $\sim 10^{-9}$ m/s iken GKÖ-4 ve GKÖ-5'in $\sim 10^{-11}$ m/s bulunmuştur. BABBK'nin artırılması GKÖ hidrolik iletkenliğini yaklaşık 100 kat azaltmıştır.
- Süzdürme sıvısı iyonik gücüne bağlı olarak bariyer malzemesi olarak kullanılacak GKÖ'lerde minimum BABBK miktarının değişkenlik gösterebileceği bu çalışma kapsamında ortaya koyulmuştur. Süzdürme sıvısı olarak SKSS kullanılması durumunda minimum 5.0 kg/m²; KKSS kullanılması durumunda ise minimum 4.0 kg/m² BABBK'ye sahip GKÖ kullanılması önerilmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma 119R044 nolu proje kapsamında TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir. TÜBİTAK'a projeye verdiği maddi ve manevi destek için teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

ASTM: D5890-11. 2011. "Standard Test Method for Swell Index of Clay Component of Geosynthetic Clay Liners." ASTM International, West Conshohocken, PA, USA 14:1–7.
ASTM: D5993. 2014. "Standard Test Method for Measuring Mass Per Unit of Geosynthetic Clay Liners." ASTM International, West Conshohocken, PA, USA: 9–12.

- ASTM: D6766-12. 2014. "Standard Test Method for Evaluation of Hydraulic Properties of Geosynthetic Clay." ASTM International, West Conshohocken, PA, USA: 1–9.
- Benson, C., and Meer, S. (2009). "Relative abundance of monovalent and divalent cations and the impact of desiccation on geosynthetic clay liners." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, [10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2009\)135:3\(349\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2009)135:3(349)), 349–358.
- Bouazza, A., 2002. Geosynthetic clay liners. *Geotext. Geomembranes* 20, 3–17. [https://doi.org/10.1016/S0266-1144\(01\)00025-5](https://doi.org/10.1016/S0266-1144(01)00025-5)
- Chen, J.N., Salihoglu, H., Benson, C.H., Likos, W.J., Edil, T.B., 2019. Hydraulic Conductivity of Bentonite–Polymer Composite Geosynthetic Clay Liners Permeated with Coal Combustion Product Leachates. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 145, 04019038. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0002105](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0002105)
- Chen, J.N., Benson, C.H., Edil, T.B., 2018. Hydraulic Conductivity of Geosynthetic Clay Liners with Sodium Bentonite to Coal Combustion Product Leachates. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 144, 04018008. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001844](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001844)
- De Camillis, M., Di Emidio, G., Bezuijen, A., Verástegui-Flores, R.D., 2016. Hydraulic conductivity and swelling ability of a polymer modified bentonite subjected to wet–dry cycles in seawater. *Geotext. Geomembranes* 44, 739–747. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2016.05.007>
- Jo, Ho Young, Takeshi Katsumi, Craig H. Benson, and Tuncer B. Edil. 2001. "Hydraulic Conductivity and Swelling of Nonprehydrated GCLs Permeated with Single-Species Salt Solutions." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 127(7):557–67.
- Jo, H.Y., Benson, C.H., Shackelford, C.D., Lee, J.-M., Edil, T.B., 2005. Long-Term Hydraulic Conductivity of a Geosynthetic Clay Liner Permeated with Inorganic Salt Solutions. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 131, 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))
- Koerner, Robert M. 2005. *Designing with Geosynthetics*. Pearson Prentice Hall.
- Kolstad, D., Benson, C., and Edil, T. (2004). "Hydraulic conductivity and swell of nonprehydrated GCLs permeated with multi-species inorganic solutions." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, [10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:12\(1236\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:12(1236)), 1236–1249.
- Ören, Ali Hakan, and Havva Demirkıran. 2015. "Geosentetik Kil Örtülerin Hidrolik İletkenliklerinin Laboratuvarda Belirlenmesi Üzerine Bir Çalışma." *Teknik Dergi* 26(4):7191–7213.
- Özdamar Kul, Tuğçe, and a. Hakan Ören. 2018. "Liquid Limit Based Assessment of Geosynthetic Clay Liners Subject to Hydration and Hydraulic Conductivity Testings." *Geotextiles and Geomembranes* 46(4):436–47.
- Ören, A.H., Taşkesti, B.E., Özdamar Kul, T., 2022. Evaluating the Hydration and Hydraulic Performance of a Geosynthetic Clay Liner (GCL) in Terms of Bentonite Mass per Unit Area. *Int. J. Geosynth. Gr. Eng.* 8. <https://doi.org/10.1007/s40891-022-00372-4>
- Petrov, Robert J., and R. Kerry Rowe. 1997. "Geosynthetic Clay Liner (GCL) - Chemical Compatibility by Hydraulic Conductivity Testing and Factors Impacting Its Performance." *Canadian Geotechnical Journal* 34(6):863–85.
- Petrov, Robert J., R. Kerry Rowe, and Robert M. Quigley. 1997. "Selected Factors Influencing GCL Hydraulic Conductivity." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 123(8):683–95.

- Rowe, R.K., Hamdan, S., 2021. Effect of wet-dry cycles on standard & polymer-amended GCLs in covers subjected to flow over the GCL. Geotext. Geomembranes 49, 1165–1175. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2021.03.010>
- Ruhl, J.L., Daniel, D.E., 1997. Geosynthetic clay liners permeated with chemical solutions and leachates. J. Geotech. Geoenvironmental Eng. 123, 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, Niloofar, Seyed Mehdi Abtahi, Mohammadali Rowshanzamir, and Seyed Mehdi Hejazi. 2018. “Geosynthetic Clay Liners: Effect of Structural Properties and Additives on Hydraulic Performance and Durability.” Environmental Earth Sciences 77(5):1–13.
- Setz, M.C., Tian, K., Benson, C.H., Bradshaw, S.L., 2017. Effect of ammonium on the hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners. Geotext. Geomembranes 45, 665–673. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2017.08.008>
- Scalia, J., Benson, C., Bohnhoff, G., Edil, T., and Shackelford, C. (2014). “Long-term hydraulic conductivity of a bentonite-polymer composite permeated with aggressive inorganic solutions.” J. Geotech. Geoenviron. Eng., [10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001040,04013025](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001040,04013025).
- Scalia, Joseph, and Craig H. Benson. 2010. “Preferential Flow in Geosynthetic Clay Liners Exhumed from Final Covers with Composite Barriers.” Canadian Geotechnical Journal 47(10):1101–11.
- Shackelford, Charles D., Craig H. Benson, Takeshi Katsumi, Tuncer B. Edil, and L. Lin. 2000. “Evaluating the Hydraulic Conductivity of GCLs Permeated with Non-Standard Liquids.” 18:133–61.
- Sönmez, G., Işık, M., 2020. Kömür Yanma Atıklarının Çevresel Etkileri Ve Kullanım Alanları. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg. 9, 72–83. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.546144>
- U.S. EPA, 2015. Environmental Protection Agency 40 CFR Parts 257 and 261 Hazardous and Solid Waste Management System; Disposal of Coal Combustion Residuals From Electric Utilities; Final Rule / Rules and Regulations. Fed. Regist. 80.
- Von Maubeuge, K.P., Ehrenberg, H., 2014. Investigation of bentonite mass per unit area requirements for Geosynthetic Clay Liners. 10th Int. Conf. Geosynth. ICG 2014.
- Zainab, B., Tian, K., 2020. Geo-Congress 2020 GSP 316 289. pp. 579–586.
- Zainab, B., Wireko, C., Li, D., Tian, K., Abichou, T., 2021. Hydraulic conductivity of bentonite-polymer geosynthetic clay liners to coal combustion product leachates. Geotext. Geomembranes 49, 1129–1138. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2021.03.007>

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
GKÖ	Geosentetik Kil Örtü	Z_i	İyonun değeri
BABBK	Birim Alan Başına Bentonit Kütlesi	I	İyonik Güç
BHCAM	Boşluk Hacmi Cinsinden Akış Miktarı	$Q_{giriş}$	GKÖ içine giren su miktarı
SKSS	Soda Külü Sızıntı Suyu	$Q_{çıkış}$	GKÖ içinden geçen su miktarı
KKSS	Kömür Külü Sızıntı Suyu	$Q_{giriş} / Q_{çıkış}$	Giren suyun çıkan suya oranı
DS	Damıtık Su	$K_{giriş}$	Giriş sıvısındaki iyon konsantrasyonu
c_i	İyonunun molar konsantrasyonu	$K_{çıkış}$	Çıkış sıvısındaki iyon konsantrasyonu