

KISA DÖNEM GEOSENTETİK KİL ÖRTÜ-ALT ZEMİN ETKİLEŞİMİNDE MEYDANA GELEN KATYON YER DEĞİŞTİRMESİ

Yasin KARAKUŞ¹, Bilal Enes TAŞKESTİ², Ali Hakan ÖREN³

ÖZ

Bu çalışma, geosentetik kil örtülerin (GKÖ) üzerine yerleştirildiği alt zeminden su emilimini (hidrasyon) ve bu sırada meydana gelen katyon değişimlerini incelemektedir. Bu inceleme geosentetik kil örtünün birim alan başına düşen bentonit kütlesine (BABBK) bağlı olarak yapılmıştır. Çalışma kapsamında farklı BABBK değerlerinde (3.0-5.0 kg/m²) GKÖ'ler hazırlanmıştır. Bu GKÖ'ler optimum su içeriğinin %2 ıslak tarafında sıkıştırılmış siltli kum alt-zemini üzerine yerleştirilmiş ve ortamdan nem almamak üzere tecrit edilmiştir. GKÖ'ler 30 gün boyunca belirli aralıklarla tartılmış ve su içeriği-zaman grafiği elde edilmiştir. Hidrasyon tamamlandıktan sonra GKÖ'lerin su içerikleri belirlenmiş ve içindeki bentonit çıkarılarak yer değiştirebilir katyon miktarları (Na⁺, K⁺, Ca⁺², Mg⁺²) tespit edilmiştir. Hidrasyon sonundaki yer değiştirebilir katyon miktarları ile hidrasyona tabi tutulmamış GKÖ'ler karşılaştırılarak hidrasyon boyunca meydana gelen katyon değişimi ortaya koyulmuştur. Aynı zamanda hidrate edilmiş ve edilmemiş GKÖ'ler ile şişme indisi testleri yapılmış ve sonuçları raporlanmıştır. Sonuç olarak, GKÖ'lerin su içeriklerinin birinci haftada hızlı bir şekilde arttığı ancak 30 güne gelindikçe sabit bir noktaya yaklaştığı görülmüştür. Fakat 30 gün sonunda su içeriğinde önemli miktarda değişim olmamasına rağmen GKÖ ve alt-zemin arasında katyon alışverişinin başladığı görülmüştür.

GİRİŞ

Geosentetik kil örtüler (GKÖ) granüler veya toz haldeki bentonitin iki geotekstil arasına serilmesi ile üretilen kompozit bariyer malzemesidir. GKÖ'ler iki geotekstilin birbirine ısıtma işlemi veya iğnelere bağlanmasıyla üretilir. Bentonitlerin su alarak şişmesi hidrolik iletkenliği düşürerek geçirimsiz bir tabaka oluşmasını sağlar (~2.0×10⁻¹¹ m/s). GKÖ'ler bu düşük geçirgenlik özellikleri sebebiyle lagünlerde, madenlerin atık havuzlarında ve katı

¹ İnşaat Yüksek Mühendisi, KARAKUŞ, Yasin, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Programı, karakus.yasin@ogr.deu.edu.tr

² İnşaat Yüksek Mühendisi, TAŞKESTİ, B.E, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Programı, bilalenes.taskesti@ogr.deu.edu.tr

³ Doç. Dr., ÖREN, A.H., Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, ali.oren@deu.edu.tr

atık depolama sahalarında kullanılmaktadır (Bouazza, 2002, Beddoe vd., 2011, Özdamar Kul & Ören, 2018).

GKÖ'lerin üretiminde genellikle sodyumca zengin bentonit kullanılır. Önceki çalışmalar uzun süre alt-zemin ile etkileşimde kalan GKÖ içindeki sodyumun (Na^+) alt zemindeki çift değerlikli katyonlar (Ca^{+2} , Mg^{+2}) ile yer değiştirdiğini göstermiştir (James vd.,1997, Egloffstein, 2001, Benson & Meer, 2009; Bradshaw et al., 2013; Rowe & Abdelatty, 2012, Kul & Ören, 2019). Bu değişime tek değerlikli sodyumun yer değiştirme yatkınlığının çok değerlikli katyonlara nazaran yüksek olması neden olmuştur (Holtz & Kovacs, 1981). Bu dönüşüm GKÖ'lerin su içeriğinde ve hidrolik iletkenliğinde değişimlere sebep olarak malzemenin bariyer özelliğini kaybetmesine yol açar. Katyon değişimiyle su içeriğindeki düşüş, kil minerallerinin tabakalar arası boşluklarında hangi katyonların hâkim olduğuyla açıklanır (Yeşiller vd., 2019). Bu boşluklarda iki değerlikli katyonlar baskın olduğunda sadece kristal şişme olurken, tek değerlikli katyonlar fazla olduğunda hem kristal hem de ozmotik şişme gerçekleşir (Norrish and Quirk, 1954; Jo et al., 2001; Benson et al., 2010)

James vd. (1997) Viktoria döneminden kalma beş tuğla sütun ve kemer yapılarının çatılarında sızdırmazlık sağlamak için kullanılan GKÖ'ler ile hidrasyon deneyleri yapmıştır. Bu deneylerde kullanılan GKÖ'ler sodyumca zengin Na-bentonit kullanılarak üretilmiştir. Hidrasyon deneyleri derin bir tank içine yerleştirilmiş ince çakıl ve ince kum tabakaları arasına GKÖ'ler koyulmuştur. Giriş ve çıkış boruları yardımıyla temin edilen akış ile GKÖ'lerin hidrasyonu sağlanmıştır. Hidrasyon sonunda yapılan yer değiştirebilir katyon testi sonucunda GKÖ içerisindeki bentonitin Na^+ içeriği %63'ten %41'e düşerken Ca^{+2} içeriğinin %41'den %51'e yükseldiği görülmüştür. Çalışmada, bu değişim sebebiyle bentonit üzerinde büzülme ve çatlakların meydana geldiği de bildirilmiştir.

Rowe ve Abdelatty (2012) tarafından yapılan çalışmada, Bentofix-NSL adıyla bilinen Na-bentonit, kalsiyumca zengin ve optimum su içeriğinin +2 ıslak tarafında (%13.9) sıkıştırılmış siltli kum üzerinde 1100 güne kadar hidrate edilmiştir. Belirli zaman aralıklarında aldıkları örneklerle katyon değişimi ve hidrolik iletkenlik deneyleri yapmışlardır. Derinliği 100 cm, çapı ise 60 cm olan bir tank içinde sıkıştırılmış alt-zeminin kalsiyum içeriği değiştirilerek iki farklı konsantrasyonun katyon değişimine etkisi incelenmiştir. Yürütülen deneylerin sonucunda GKÖ içerisindeki bentonitin iki değerlikli katyonlarının yüzdesinin artmasıyla hidrolik iletkenlik değerlerinde de önemli ölçüde artmışlar görülmüştür. Başlangıçta hidrate edilmemiş GKÖ içerisinde %77 sodyum, %20 kalsiyum bulunurken 1100 gün hidrasyon sonrasında Na^+ %48'e düşmüş, Ca^{+2} %38'e çıkmıştır. Aynı zamanda GKÖ'lerin su içeriğinin yaklaşık olarak 300. günden sonra düşmeye başladığı görülmüş ve bu azalmanın katyon değişimi nedeniyle olabileceği ifade edilmiştir.

Bradshaw vd. (2013) alt-zemin türünün katyon değişimine etkisini incelemek amacıyla dört farklı alt-zemin üzerinde hidrate edilmiş GKÖ'leri hidrolik iletkenlik deneyine tabi tutmuşlardır. Bunun için GKÖ'ler esnek duvarlı geçirgenlik ölçer (permametre) içerisinde 30, 90, 180 ve 365 gün boyunca hidrate edilmiş ve bağlı katyonlardaki değişim izlenmiştir. Bu çalışmada katyon değişiminin ilk 30 günde asgari seviyede olduğu, ancak bentonit içerisindeki sodyumun %31'inin bir yıllık hidrasyon sırasında yer değiştirebileceğini belirtilmiştir. Ayrıca bu çalışma, katyon değişiminin etkisini minimize etmek için alt-zeminin optimum su içeriğinin ıslak tarafında sıkıştırılmasını önermektedir.

Bu çalışmada, GKÖ'ler ile sıkıştırılmış alt-zemin arasında katyon değişiminin birim alan başına düşen bentonit kütlesine (BABBK) bağlı incelenmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla, 30

gün hidrate edilmek üzere birim alan başına BABBK değerleri 3.0, 4.0 ve 5.0 kg/m² olan iki farklı GKÖ kullanılmıştır. Böylece, hidrasyon süresinin yanında BABBK değerinin de katyon değişimine etkisi incelenmiştir. Hazırlanan GKÖ'ler PVC kalıplar içerisinde, optimum su içeriğinin %2 ıslak tarafında sıkıştırılmış siltli kum zemin üzerinde, 1 kPa'lık bir yüke maruz bırakılarak hava geçirimsiz bir ortamda hidrate edilmişlerdir. Hidrasyon sonunda GKÖ'lerin su içeriği belirlenmiştir. Hidrasyon deneyleri sonrası GKÖ'ler içerisindeki bentonitlerin bağlı katyonları ölçülmüştür. Bu değerler hidrasyona tabi tutulmamış GKÖ'nün değerleri ile karşılaştırılmıştır. Böylelikle 30 gün içinde katyon değişiminin ne derecede gerçekleştiği görülmüştür.

MALZEME ve YÖNTEM

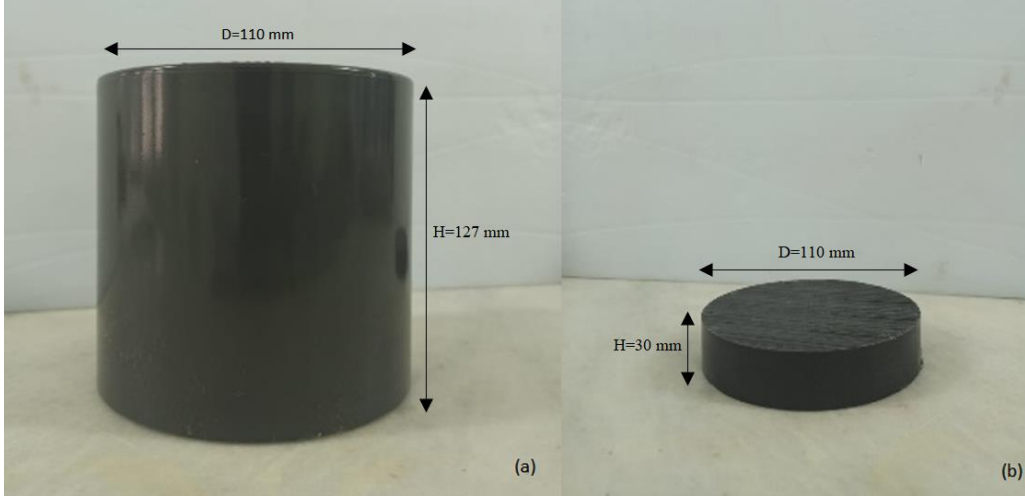
MALZEMELER

Bu çalışmada, alt-zemin malzemesi olarak bir katı atık depolama sahası yakınlarından alınmış doğal zemin malzemesi kullanılmıştır. Zemin önce No.4 elekten geçirilerek çakıl ve taş parçaları örnekten uzaklaştırılmıştır. Elenmiş doğal zemin malzemesi Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırması Sistemi'ne (USCS) göre siltli kum (SM) olarak sınıflandırılmıştır. ASTM D698-12 takip edilerek Standart Proctor Enerjisi ile sıkıştırılan bu zeminin optimum içeriği %12, maksimum kuru birim hacim ağırlığı 19.0 kN/m³ olarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan GKÖ'ler rulo halinde yerel bir firmadan temin edilmiştir. GKÖ'lere ait özellikler Tablo 1'de özetlenmiştir. P-GKÖ polimer katkılı bir bentonitten üretilmiştir.

Tablo 1 Çalışmada kullanılan GKÖ'lerin özellikleri

GKÖ Özellikleri	P-GKÖ	Na-GKÖ
BABBK (kg/m ²)	3.2-4.0	3.0-5.0
Üretim yöntemi	İğnelenmiş	İğnelenmiş
Taşıyıcı Geotekstil	Örgülü	Örgülü
Örtü Geotekstil	Örgüsüz	Örgüsüz
Başlangıç su içeriği (%)	21	16
Özgül Ağırlık, G _s	2.71	2.70
Likit Limit (%)	222	231
Plastik Limit (%)	51	61
Plastisite İndeksi (%)	171	170
Kil İçeriği (%)	95	87
Şişme İndisi (mL/2g)	26.5	21.5

Alt-zemin tabakası özel üretilmiş polivinil klorür (PVC) kalıplar içerisinde sıkıştırılmıştır. Kompaksiyon deneyinde kullanılan kalıplar 11.0 cm çapında, 12.7 cm yüksekliğindedir. GKÖ'lerin hidrasyonu kompaksiyon deneyinde kullanılan PVC kalıplar üstünde gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). GKÖ'lerin üzerine 1 kPa'lık yük uygulanmıştır.



Şekil 1 Hidrasyon deneyleri için özel olarak imal edilen (a) PVC kalıp ve (b) başlığın genel görünümü

YÖNTEMLER

Alt-zeminin Sıkıştırılması

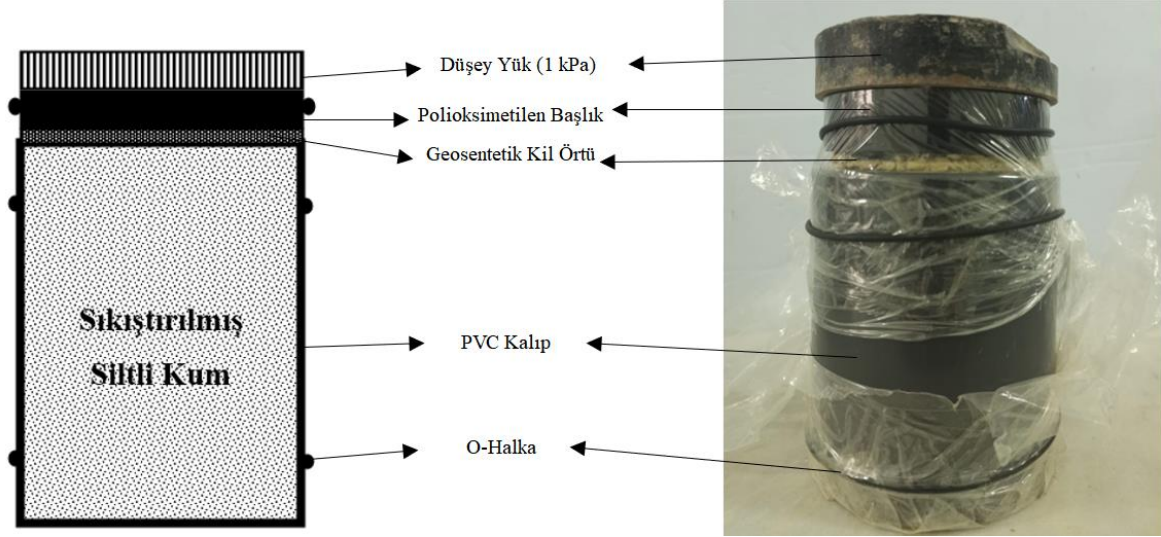
Çalışma kapsamında alt-zemin malzemesi olarak kullanılan siltli kum, optimum su içeriğinin %2 ıslak tarafında hazırlanmıştır. Numune plastik bir leğen içerisinde püskürteç yardımı ile kademeli olarak su eklenerek istenilen su içeriği değerine getirilmiştir. Bu işlem sırasında sonrasında ıslak zemin plastik poşete koyulmuş ve ıslatma suyunun zemin içerisindeki homojen dağılımının sağlanması amacıyla 24 saat bekletilmiştir. Bekleme süresi sona erdiğinde ıslak zemin tekrar plastik bir leğene aktarılmış ve tekrar karıştırılmıştır. Sonrasında, Şekil 1’de gösterilen PVC kalıplar içerisinde ASTM standardına göre Standart Proctor Enerjisinde sıkıştırılmıştır. Kalıp boyutlarına bağlı olarak hesaplanan gerekli darbe sayısı 32 olarak belirlenmiştir. Sıkıştırma işlemi kompaksiyon çekici kullanılarak elle yapılmıştır. Sıkıştırma işlemi sırasında her tabakaya, tabakalar arası aderansın sağlanabilmesi amacıyla ince uçlu spatula ile çizikler atılmış ve diğer tabakanın sıkıştırılmasına bundan sonra başlanmıştır.

Hidrasyon için GKÖ Örneklerinin Hazırlanması

Çalışmanın bu kısmında 10 cm çapında GKÖ örnekleri hazırlanmıştır. Metal halka, rulo üzerine yerleştirilmiş ve asetat kalem ile numunenin sınırları belirlenmiştir. Bu sınırlar, bentonit kaybını minimuma indirmek amacıyla deiyonize (damıtık) su ile ıslatılmıştır. Daha sonra metal halkanın keskin uçları ve maket bıçağı yardımıyla GKÖ numunesi rulodan çıkarılmıştır. BABBK değeri ASTM D-5993’e göre hesaplanmıştır. Rulonun farklı yerlerinden alınan GKÖ’ler daha sonra BABBK’lerine göre ayrılmıştır. GKÖ’lerin kütlesi ve BABBK aralığı Tablo 1’de verilmiştir.

GKÖ’ler hidrate edilmek üzere PVC kalıpta sıkıştırılmış olan siltli kum alt-zemini üzerine örgüsüz geotekstil alt tarafta kalacak şekilde yerleştirilmiştir. GKÖ üzerine, delrin olarak bilinen, polioksümetilen (POM) malzemesinden yapılmış dairesel bir örnek koyulmuştur. Streç folyo ile örneğin ortamdan tecridi sağlanmıştır. Geçirimsizliği arttırmak amacıyla delrin üzerine o-halka geçirilmiştir. Streç folyonun PVC kalıp üzerinde kalan kısmı ise yine geçirimsizliği perçinlemek amacıyla bant ile kalıba yapıştırılmış ve üzerine aynı şekilde o-halka geçirilmiştir. PVC kalıbın alt tarafı ise plastik torbayla kapatılmış ve yine o-halka ve bant yardımıyla geçirimsizlik sağlanmıştır. PVC kalıbın alt tarafı hidrasyon süresi boyunca

kapalı tutulmuştur. Hidrasyon düzeneğinin şematik ve gerçek görünüşü Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2 Hidrasyon deneylerinde kullanılan sistemin şematik ve gerçek görünüşleri

Hidrasyon Sonrası GKÖ'lerin ve Alt-Zeminin Su İçeriklerinin Belirlenmesi

Hidrasyon sonrası su içeriklerinin belirlenmesi amacıyla GKÖ'ler 105°C sıcaklıktaki etüvde 24 saat kurutulmuştur. Daha sonra, birbirine iğnelenmiş olan örgülü ve örgüsüz geotekstillerin lifleri maket bıçağı yardımı ile kesilerek bentonit çıkarılmıştır.

Bağlı Katyonların Belirlenmesi

Hidrate edilmiş ve edilmemiş GKÖ'ler içerisinde çıkarılan bentonitler kullanılarak bağlı kation testi yürütülmüştür (ASTM: D7503-18, 2020). Bu deney kapsamında No.10 elekten geçirilmiş 10 gram kuru bentonite 40 mL amonyum asetat (NH_4OAc) eklenmiş ve 5 dakika boyunca 30 devir/dakikada karıştırılarak 24 saat bekletilmiştir. 24 saat sonunda 15 dakika boyunca 30 devir/dakikada tekrar döndürüldükten sonra Buchner hunisine yerleştirilmiş 2.5 μm külsüz filtre kâğıdı yardımıyla 10 kPa basınç altında 4 defa 30 ml'lik amonyum asetat ile süzdürülmüştür. Bu deney sonunda süzdürülen sıvı 250 mL'lik balon jojeye aktarılmış ve pH dengesi için nitrik asit eklendikten sonra 250 mL'ye tamamlanmış ve bağlı kationları belirlemek amacıyla ICP Testi için saklanmıştır.

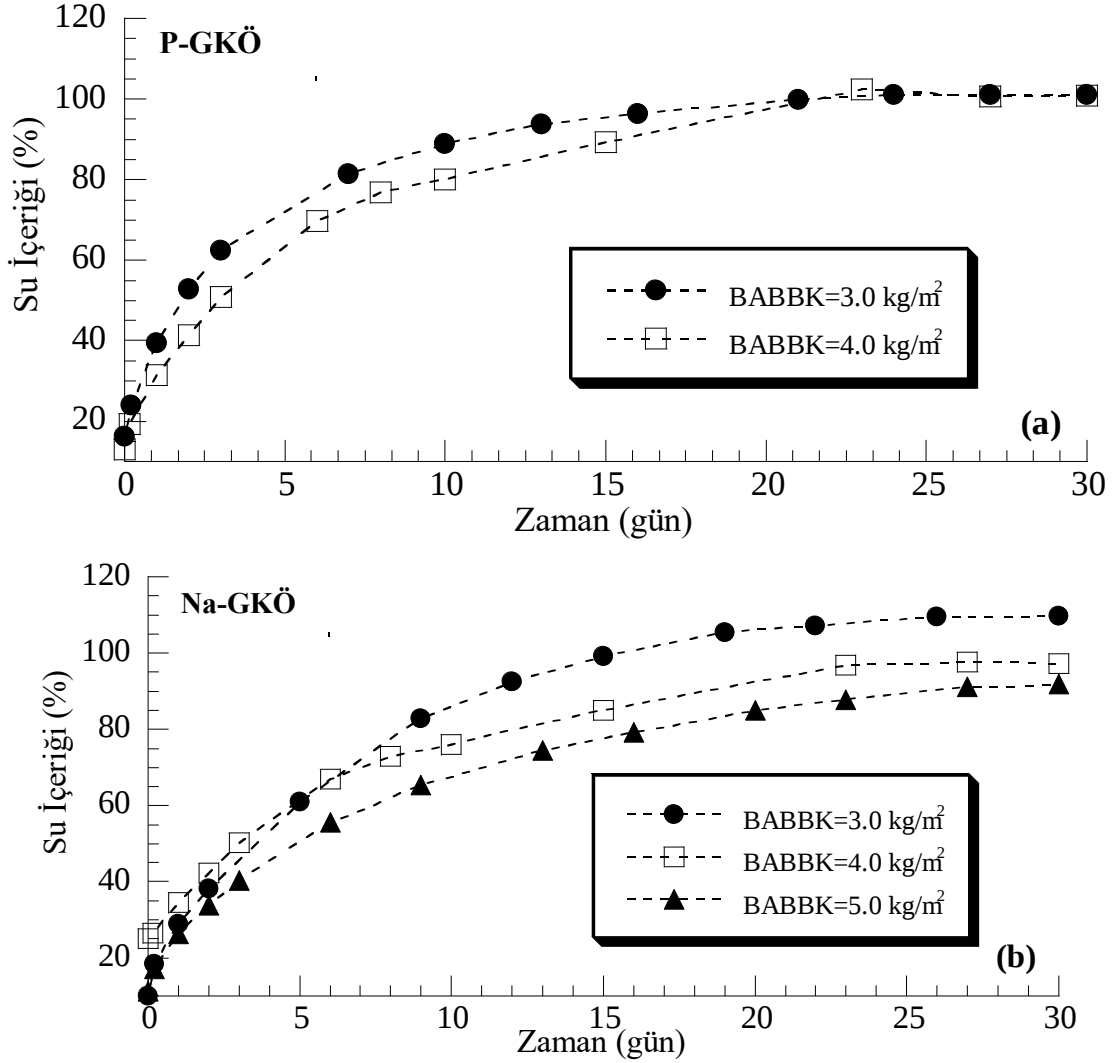
Şişme İndislerinin Belirlenmesi

Hidrasyon süresi sonunda GKÖ'lerin içerisinde çıkarılan bentonitler ile şişme indeksi deneyi yapılmıştır (ASTM D5890 – 19, 2010). Bu amaç doğrultusunda 2 gram bentonit tartılmış ve 90 ml seviyesine kadar saf su ile doldurulmuş dereceli silindir içerisine 10 dakika aralıklarla ve her seferinde 0.1 gram boşaltmak kaydıyla 20 defada boşaltılmıştır. Bütün numune boşaltıldıktan sonra dereceli silindir 100 ml'ye kadar saf su ile tamamlanmıştır. Bu örnekler 24 saat şişmeye bırakılmış ve 24 saat sonunda şişme değerleri okunmuştur.

BULGULAR ve TARTIřMA

HİDRASYON SONRASI GKÖ'LERİN SU İÇERİKLERİ

GKÖ'lerin su içeriği siltli kum alt-zemini üzerinde 30 gün hidrate edildikten sonra belirlenmiştir. Hidrasyon süresince alınan ölçümlerle su içeriği-zaman grafikleri çizilmiř ve bu grafikler şekil 3'te gösterilmiřtir.



şekil 3 İki farklı GKÖ için su içeriği-zaman grafikleri: (a) P-GKÖ (b) Na-GKÖ

Genel olarak, su içeriği-zaman grafiklerinde elde edilen sonuçlardan BABBK değerinin artmasıyla nihai su içeriğinin düştüğü görölmüştür. İlk 10 günde alt-zemin ve GKÖ arasındaki emme basıncı farkı sebebiyle hidrasyon büyük oranda bu periyotta gerçekleşmiştir. Alt-zemin su kaybettiķe ve GKÖ su aldıķa bu emme basıncı farkı azalmış ve su içeriği-zaman grafiği yataylaşmıştır (Anderson et al., 2012; Acikel et al., 2018, 2019). Polimer katkılı bentonit ile üretilen P-GKÖ 30 gün sonunda incelenen iki BABBK değerinde de (3.0 ve 4.0 kg/m²) %101 su içeriğine ulaşmıştır. Na-GKÖ'nün 30 günlük hidrasyon sonu

nihai su içerikleri BABBK 3.0, 4.0 ve 5.0 kg/m² değerleri için sırasıyla %110, %97 ve %92 olarak belirlenmiştir.

HİDRASYON SIRASINDA KATYON DEĞİŞİMİ

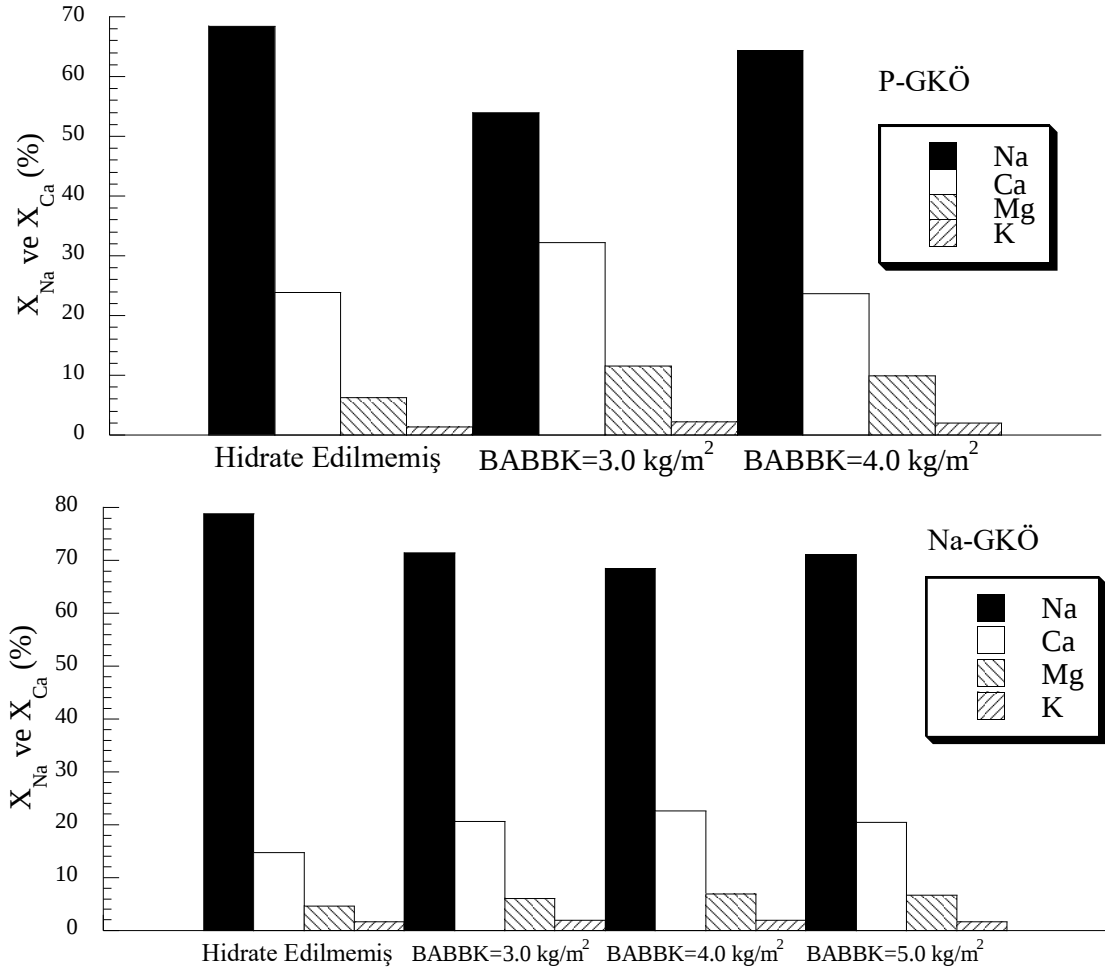
Siltli kum alt-zemini üzerinde 30 gün boyunca hidrate edilen çeşitli BABBK'ya sahip iki farklı türden GKÖ'lerin hidrasyon süresi sonunda bağlı katyonları belirlenmiştir. Bağlı katyon analiz sonuçları Tablo 2'de özetlenmiştir. Genel itibariyle, GKÖ'lerin şişmesini büyük ölçüde kontrol eden tek değerlikli katyonların konsantrasyonundaki en dramatik düşüş P-GKÖ'de BABBK 3.0 kg/m² değerinde gözlemlenmiştir.

BABBK değerlerinin katyon değişimini belirleyen iki önemli katyon olan Ca⁺² ve Na⁺ açısından değerlendirilmesi amacıyla Şekil 4 aşağıda verilmiştir. Şekil 4a'da P-GKÖ'den elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. P-GKÖ'de hidrate edilmemiş durumda %68.4 Na⁺ mevcut iken BABBK 3.0 kg/m² değerinde hazırlanıp 30 gün hidrate edilmiş P-GKÖ'de bu oran %54.0'e düşmüştür. Bu değer BABBK 4.0 kg/m²'de hazırlanan GKÖ ile kıyaslandığında daha düşüktür (54.0 ve 64.4). Buna mukabil çift değerlikli katyonların BABBK 3.0 kg/m² değerinde %30.2'den %43.8'e yükseldiği belirlenmiştir.

Şekil 4b'de Na-GKÖ'den elde edilen bağlı katyonlar yüzdesi değerlendirilmiştir. Na-GKÖ için farklı BABBK değerlerinde hazırlanan GKÖ'lerin tek değerlikli ve çift değerlikli katyonlarının yüzdelere bariz bir fark görülemese de hidrasyonun ilk 30 gününde de katyon değişiminin gerçekleştiği görülebilmektedir. Na-GKÖ'de en dramatik katyon değişimi BABBK 4.0 kg/m² değerinde hazırlanan GKÖ'de görülmüştür. Bu GKÖ'de tek değerlikli katyon yüzdesi %80.5'ten %70.5'e düşerken çift değerlikli katyonların yüzdesi ise %19.5'ten %29.6'ya yükselmiştir.

Tablo 2 Hidrasyon sonrası GKÖ'lerin nihai su içerikleri, bağlı katyon konsantrasyonları ve tek değerlikli (X_m) ve çift değerlikli (X_D) katyonların konsantrasyonu toplamı

GKÖ Türü	BABBK (kg/m ²)	Hidrasyon (gün)	Süresi	Bağlı Katyonlar (%)					
				Na ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	X _m	X _D
P-GKÖ	-	Hidrate edilmemiş		68.4	23.9	6.3	1.4	69.8	30.2
	3.0	30		54.0	32.2	11.6	2.2	56.2	43.8
	4.0	30		64.4	23.7	9.9	2.0	66.4	33.6
Na-GKÖ	-	Hidrate edilmemiş		78.8	14.7	4.7	1.7	80.5	19.5
	3.0	30		71.4	20.5	6.2	1.9	73.3	26.7
	4.0	30		68.4	22.7	6.9	1.8	70.5	29.6
	5.0	30		71.1	20.6	6.6	1.7	72.8	27.2



Şekil 4 (a) P-GKÖ için (b) Na-GKÖ' için BABBK'nin katyon değişimine etkisi

ŞİŞME İNDİSİ TESTİ SONUÇLARI

Bu çalışma kapsamında şişme indisi deneyleriyle katyon değişiminin bentonit üzerindeki değişime fiziksel etkisi de araştırılmıştır. Bu deneyler, öncelikle hidrate edilmemiş GKÖ'lerden çıkarılan bentonitler üzerinde, daha sonra da 30 gün hidrate edilen GKÖ örneklerinden çıkarılan bentonitler üzerinde yapılmıştır. Şişme indislerinin hidrate edilen bentonitlerde az da olsa düşmesi beklenmiştir. Bu deneylere ait sonuçlar aşağıda Tablo 3'te sunulmuştur. Hidrate edilmemiş P-GKÖ ve Na-GKÖ ile yapılan testlerde bu GKÖ'lerin şişme indisleri sırasıyla 26.5 ve 21.5 ml/2g olarak elde edilmiştir. Hidrate edilmiş P-GKÖ'lerin şişme indislerinde keskin bir düşüş gözlemlenirken, hidrate edilmiş Na-GKÖ'lerde böylesine keskin bir düşüş olmasa da hafif bir düşüş görülmüştür. Şişme indislerine BABBK'nin etkisi ise kısa süreli hidrate edilen numuneler üzerinde sınırlı olarak görülebilmektedir.

Tablo 3 Şişme indisi testi sonuçları

GKÖ Türü	BABBK (kg/m ²)	Hidrasyon Süresi (gün)	Şişme indisi (ml/2g)
P-GKÖ	-	Hidrate edilmemiş	26.5
	3.0	30	19.5
	4.0	30	19.0
Na-GKÖ	-	Hidrate edilmemiş	21.5
	3.0	30	19.0
	4.0	30	18.5
	5.0	30	18.5

TEST SONUÇLARININ TARTIŞILMASI

Bağlı katyon testi sonuçları yardımıyla yapılan tartışmalarda hidrasyonun erken dönemlerinde BABBK'nin değişmesinin katyon değişimine bir etkisi olmadığı yönünde bir görüş bildirilebilir. Örneğin, Na-GKÖ'lerin 30 gün sonu Na⁺ konsantrasyonu BABBK 3.0 kg/m² için %71.4 iken BABBK 5.0 kg/m² olan örnek için %71.1 değerinde kalmıştır. Ancak, nihai su içerikleri sırasıyla %110 ve %92 olan bu iki örnek arasındaki bu fark, bariz bir fark olarak değerlendirilmemiştir. P-GKÖ'den hazırlanan örneklerde 3.0 ve 4.0 kg/m² BABBK değerleri için Na⁺ konsantrasyonları için benzer bir durum söz konusu olsa da BABBK 3.0 kg/m² değerinde hazırlanan örnekte tek değerlikli katyonların oranı %13.6 azalırken çift değerlikli katyonların oranı aynı oranda artmıştır. Genel anlamda, GKÖ'lerin farklı BABBK değerlerinde hazırlanmasının hidrasyonun kısa dönemlerinde katyon değişimine etkisi olduğu kısıtlı da olsa görülebilir.

P-GKÖ'de BABBK 3.0 kg/m² değeriyle BABBK 4.0 kg/m² değerinde hazırlanan örnekler arasında tek değerlikli katyonlar ve çift değerlikli katyonların yüzdeleri arasında önemli fark görülmüştür. Buna sebep olarak 3.0 kg/m² BABBK değerinde hazırlanan örnekteki boşluk oranının 4.0 kg/m² BABBK değerinde hazırlanan örnekteki boşluk oranından daha az olması sebebiyle yüzdece daha fazla su alması ve böylece bu nemli ortamda katyon değişiminin daha yüzdece fazla gerçekleşmesi gösterilebilir.

Bradshaw vd. (2013) tarafından yapılan çalışmalarda ilk 30 günde hazırlanan örneklerden elde edilen bentonitler ile yapılan deneylerde bu sürede gözle görülür bir katyon değişimi olmadığı bildirilirken bu çalışmada ilk 30 günde bir katyon değişimi meydana geldiği görülmüştür. Bunun sebebinin alt-zemindeki kalsiyum konsantrasyonu olabileceği düşünülmektedir. Katyon değişimini yöneten iki majör katyon olan kalsiyum ve sodyumun alt-zemindeki ve GKÖ içerisindeki konsantrasyon farklarının oluşturduğu konsantrasyon gradyanının bu sonuca sebep olduğu düşünülmektedir. Abdelatty vd. (2012) tarafından yürütülen çalışmalarda ilk 450 günde katyon değişiminin çoğunun tamamlandığı bildirilmiştir. Ancak bu çalışmada kısa dönemdeki etki araştırılmamıştır. Aynı zamanda güçlü bir Ca⁺² (1600-1700 mg/l) içeriğine sahip siltli kum alt-zemininde hidrate edilmesi sonucu elde edilen sonuçlar konsantrasyon farkının katyon değişimine katkı sağladığı savını destekler niteliktedir.

Şişme indisi deneyi sonuçları incelendiğinde P-GKÖ'nün şişme indisindeki dramatik düşüş ile Na⁺ içeriğindeki azalmanın paralel olması göze çarpmaktadır (26.5 mL/2g'a karşılık 19.0 mL/2g). Benzer bir şekilde, sodyum içeriğinde hafif bir düşüş gözlenen Na-GKÖ'nün şişme indisinde de keskin bir azalma yerine görece az bir düşüş elde edilmiştir (21.5 mL/2g'a

karşılık 19.0 mL/2g). Buradan bentonit içerisindeki Na^+ oranının şişme indisini doğrudan etkilediği yönünde bir çıkarıma varılabilir. Bir diğer deyişle, çarpıcı bir şekilde olmasa da şişme indisinin BABBK değeriyle azaldığı söylenebilir. Fakat bu konu uzun süreli hidrasyon çalışmalarıyla desteklenmelidir.

SONUÇLAR

Bu çalışmada iki farklı GKÖ, siltli kum alt-zemini üzerinde 30 gün hidrasyona tabi tutulmuş ve bu süre sonunda GKÖ ile alt-zemin arasındaki katyon etkileşiminin kısa dönemdeki davranışı açıklanmıştır. PVC kalıplar içerisinde optimum su içeriğinin %2 ıslak tarafında sıkıştırılan siltli kum zemini üzerinde hidrate edilen GKÖ'ler içerisinde çıkarılan bentonitler ile bağlı katyon deneyi yapılmış ve sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Önceki çalışmalarda elde edilen bulguların aksine ilk 30 günde katyon değişiminin varlığı bu çalışma ile ortaya koyulmuştur. P-GKÖ'ler ile yapılan hidrasyon deneyleri sonunda bentonit içerisindeki tek değerlikli katyonların konsantrasyonları yaklaşık %4-%14 oranında azalmıştır. Ayrıca literatürde BABBK değerinin alt-zemin ve GKÖ arasındaki katyon değişimini nasıl etkilediğine dair çalışma eksikliği mevcuttur. Bu çalışmayla birlikte BABBK'nin hidrasyonun kısa dönemdeki etkisi ortaya koyulmuştur. Elde edilen sonuçlar BABBK değerindeki farklılığın katyon etkileşimini hidrasyonun erken dönemlerinde sınırlı derecede etkilediğini göstermiştir. .

Teşekkür

Bu çalışma, 119R044 numaralı projeden kapsamında yapılmıştır. TÜBİTAK'a projeye verdiği bu maddi destek için teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- Acikel, A.S., Gates, W.P., Singh, R.M., Bouazza, A., Rowe, R.K., 2018. Insufficient initial hydration of GCLs from some subgrades: Factors and causes. *Geotext. Geomembranes* 46, 770–781. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2018.06.007>
- Acikel, A.S., Rowe, R.K., Brachman, R.W.I., Baral, A., Su, G., 2019. The impact of multi-component hypersaline wetting on soluble and exchangeable cations and water retention behaviour of MX80 bentonite. *Appl. Clay Sci.* 180. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.105174>

- Anderson, R., Rayhani, M. T., & 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>
- ASTM: D2487 (2006). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), *ASTM International, West Conshohocken, PA, USA*, <https://doi.org/10.1520/D7503-10>
- ASTM D5890 – 19. (2010). Standard Test Method for Swell Index of Clay Mineral Component of Geosynthetic. *Annual Book of ASTM Standards, i*, 20–23. <https://doi.org/10.1520/D5890-11.2>
- ASTM: D5993 (2018). Standard Test Method for Measuring Mass per Unit Area of Geosynthetic Clay Liners, 1. *ASTM International, West Conshohocken, PA, USA*, <https://doi.org/10.1520/D7503-10>
- ASTM: D698 (2012). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)), *ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012*, <https://doi.org/10.1520/D7503-10>
- ASTM: D7503-18. (2020). Standard Test Method for Measuring the Exchange Complex and Cation Exchange Capacity of Inorganic Fine-Grained Soils 1. *ASTM International, West Conshohocken, PA, USA*, 1–5. <https://doi.org/10.1520/D7503-10>
- Benson, C. H., & Meer, S. R. (2009). Relative Abundance of Monovalent and Divalent Cations and the Impact of Desiccation on Geosynthetic Clay Liners. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(3), 349–358. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2009\)135:3\(349\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2009)135:3(349))
- Beddoe, R. A., Take, W. A., & Rowe, R. K. (2011). Water-retention behavior of geosynthetic clay liners. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(11), 1028–1038. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000526](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000526)
- Bradshaw, S. L., Benson, C. H., & Scalia, J. (2013). Hydration and Cation Exchange during Subgrade Hydration and Effect on Hydraulic Conductivity of Geosynthetic Clay Liners. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(4), 526–538. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0000793](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000793)
- Egloffstein, T. A. (2001). Natural bentonites - Influence of the ion exchange and partial desiccation on permeability and self-healing capacity of bentonites used in GCLs. *Geotextiles and Geomembranes*, 19(7), 427–444. [https://doi.org/10.1016/S0266-1144\(01\)00017-6](https://doi.org/10.1016/S0266-1144(01)00017-6)
- [Holtz R. D., Kovacs, W. D. \(1981\). An Introduction to Geotechnical Engineering. Prentice Hall](#)
- James, A. J., Fullerton D. & Drake, R. (1997). Field Performance of GCL Under Ion Exchange Conditions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(October), 897-901.
- Özdamar Kul, T., & Ören, A. H. (2018). Liquid limit based assessment of geosynthetic clay liners subject to hydration and hydraulic conductivity testings. *Geotextiles and Geomembranes*, 46(4), 436–447. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2018.03.009>
- Kul, T. O., & Ören, A. H. (2019). Hydration of geosynthetic clay liners (GCLs) on compacted zeolite. *Geosynthetics International*, 26(1), 81–91. <https://doi.org/10.1680/jgein.18.00038>
- Norrish, K., Quirk, J. Crystalline Swelling of Montmorillonite: Use of Electrolytes to Control Swelling. *Nature* 173, 255–256 (1954). <https://doi.org/10.1038/173255a0>

- Rowe, R. K., & 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)
- Yesiller, N., Hanson, J. L., Risken, J. L., Benson, C. H., Abichou, T., & Darius, J. B. (2019). Hydration Fluid and Field Exposure Effects on Moisture-Suction Response of Geosynthetic Clay Liners. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145(4), 04019010. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0002011](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0002011)