

GEOSENTETİK KİL ÖRTÜ İÇİNDEKİ BOŞLUKLARIN HİDRASYON SIRASINDA KAPANMASININ NİTEL VE NİCEL İZLENMESİ

QUALITATIVE AND QUANTITATIVE MONITORING OF THE CLOSING OF VOIDS IN GEOSYNTHETIC CLAY LINER DURING HYDRATION

Tuğçe Özdamar Kul¹, Nilhan Demirci², Okan Önal³, Ali Hakan Ören⁴

ÖZET

Geosentetik kil örtüler (GKÖ'ler) mühendislik uygulamalarında sıklıkla kullanılan bariyer malzemeleridir. Bu örtüler yapılarında bulunan bentonitlerin üretim sırasındaki düzensiz dağılımına bağlı olarak içeriğinde boşluklar ihtiva etmektedir. Kullanılan birim alan başına bentonit kütlesine (BABBK) bağlı olarak boşlukların malzeme içerisindeki alansal dağılımı değişkenlik göstermektedir. Bu boşluklar, GKÖ'lerin serildikleri alt zeminden hidrasyon yolu ile su çekmeleri sonucu içeriğindeki bentonitin şişmesi ile azalmakta ve hatta kapanabilmektedir. Burada sunulan çalışmada, GKÖ'lerin hidrasyon sürecindeki su içeriği ve boşluk durumundaki değişimlerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, 3 farklı BABBK'ye (5.5 kg/m², 6.7 kg/m² ve 7.6 kg/m²) sahip GKÖ örnekleri optimum su içeriğinin %2 ıslak kısmında sıkıştırılmış alt zemin tabakaları üzerinde 1 kPa gerilme altında 32 gün hidrate edilmiştir. Hidrasyon sırasında su içeriğinin ve boşluk durumundaki değişimlerin belirlenmesi için GKÖ'ler belirli aralıklarla sistemden çıkarılmış, ağırlıkları tartılmış ve görüntülemeleri yapılmıştır. Görüntüleme işlemleri sonucunda elde edilen fotoğraflar MATLAB programı yardımı ile sayısallaştırılmıştır. Elde edilen verilerden yararlanılarak GKÖ'nün ihtiva ettiği boşluklar kısmi açık alan ve açık alan olarak ayrıştırılmıştır. Bu alanların GKÖ toplam alanına bölünmesi ile toplam açık alan oranları belirlenmiştir. Hidrasyon süresinin artması ile GKÖ su içerikleri %67-%77 aralığında belirlenmiştir. BABBK'nın artmasının GKÖ su içeriği ve toplam açık alan oranı üzerinde azaltıcı etkisi olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Geosentetik kil örtü, su içeriği, birim alan başına bentonit kütlesi, görüntüleme

¹ Araş.Gör. Dr., Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Buca, İzmir, tugce.ozdamar@deu.edu.tr (Sorumlu yazar)

² İnşaat mühendisi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Programı, demirci.nilhan@ogr.deu.edu.tr

³ Prof., Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Buca, İzmir, okan.onal@deu.edu.tr

⁴ Prof., Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Buca, İzmir, ali.oren@deu.edu.tr

ABSTRACT

Geosynthetic clay liners (GCLs) are commonly used as barrier materials in engineering applications. These liners contain voids due to the irregular distribution of granular bentonites during manufacturing. The spatial distribution of voids within the material varies depending on the bentonite mass per unit area (MPUA). These voids decrease and can even close as the bentonite in the GCL swells due to hydration from the underlying subsoil during installation. The aim of this study is to determine the water content and changes in void distributions of GCLs during hydration. For this purpose, GCL samples with three different MPUAs (5.5 kg/m², 6.7 kg/m², and 7.6 kg/m²) were hydrated over compacted subsoil at 2% wet side of optimum water content under 1 kPa stress up to 30 days. During hydration, GCLs were periodically removed from the system, weighed, and imaged to determine changes in water content and void distributions. The photographs obtained from the image process were digitized using MATLAB. Based on the obtained data, the voids contained in the GCL were categorized as partially open area and open area. Then, total open area ratios were determined by dividing these areas by the total area of the GCL. GCL water contents were determined within the range of 67% - 77% by increasing the hydration duration. It was observed that an increase in MPUA decreases the final water content and total open area of the GCL.

Keywords: Geosynthetic clay liner, water content, bentonite mass per unit area, image processing

1. GİRİŞ

Geosentetik kil örtüler (GKÖ), atık depolama alanlarında, su rezervuarlarında ve diğer mühendislik uygulamalarında geçirimsizlik sağlamak amacıyla yaygın olarak kullanılan kompozit malzemelerdir. Bu örtüler, uygulama sırasında doğal su içeriğinde araziye yerleştirilmektedir. Zemin ile temasın ardından GKÖ alt zeminden su emerek bünyesine su almaya başlamaktadır (Meer ve Benson, 2007). Böylece GKÖ içerisindeki bentonit şişmekte ve GKÖ içindeki boşlukların azalmasına sebep olmaktadır. GKÖ içindeki boşlukların kapanmaya başlamasıyla hidrolik iletkenlik değerlerinde de zamanla azalma meydana gelmektedir. Laboratuvarda bu süreç, GKÖ'lerin sıkıştırılmış zemin örnekleri üzerine yerleştirilerek hidrasyona maruz bırakılmaları sureti ile resmedilebilmektedir (Anderson et al., 2012; Rayhani et al., 2011; Rowe ve Abdelatty, 2012).

Hidrasyon süreci, GKÖ'lerin hidrolik iletkenliğinde önemli bir rol oynamaktadır. Genel olarak yapılan çalışmalar, önceden hidrasyona maruz kalmış GKÖ'lerin hidrolik iletkenliğinin, hidrasyona maruz kalmamış olanlara göre daha düşük olduğunu göstermektedir (Bouazza vd., 2017; Bradshaw vd., 2013; Meer ve Benson, 2007; Özdamar Kul ve Ören, 2018; Rowe ve Abdelatty, 2012). Ancak, bazı durumlarda GKÖ'ler hidrasyondan sonra bile yüksek hidrolik iletkenlik gösterebilmektedir. Bu durumun alt zemin su içeriği, alt zemin tipi ve minerolojisi, GKÖ tipi ve çevresel koşullar gibi çeşitli faktörlerden kaynaklanabileceği literatürde vurgulanmış; ancak GKÖ içerisindeki bentonitin dağılımının ve hidrasyon sonrasında boşlukların ne oranda kapandığı gibi konular son yıllarda araştırılmaya başlanmıştır (Rowe vd. 2017; Rowe ve Hamdan, 2021; Li ve Rowe

2020, 2022). Bu verileri elde etmek için görüntü işleme tekniklerinin kullanılabilceği düşünülmektedir.

Görüntü işleme teknikleri, kamera ile yoğun ışık kaynağı altında elde edilen görüntülerin çeşitli programlar kullanılarak katmanlara, alanlara vb. dönüştürülerek sayısallaştırıldığı sistematik yaklaşımların kullanılması esasına dayanmaktadır (Santmarina ve Cho, 2004). Dolayısı ile GKÖ içerisindeki bentonitin dağılımının ve zaman içerisinde alt zeminden su alarak yaptığı yanal şişme davranışının belirlenmesinde de görüntü işleme teknikleri kullanılabilir. Burada sunulan çalışmada laboratuvarda farklı BABBK'lerde yapay olarak imal edilen GKÖ örneklerinin sıkıştırılmış siltli kum tabakası üzerinde hidrasyon davranışı incelenmiş ve görüntü işleme teknikleri kullanılarak bu süreç içerisinde GKÖ'nün ihtiva ettiği boşluk miktarları sayısallaştırılmıştır. Bu amaçla, hidrasyon süresi boyunca belirli aralıklarla GKÖ örneği özel bir görüntüleme deney düzeneği kullanılarak görüntülenmiştir. Daha sonra elde edilen görüntüler Matlab programında işlenerek örnek içerisindeki boşluklar sayısallaştırılmıştır.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Malzeme

Çalışma kapsamında yerli bir üreticiden temin edilen sodyum GKÖ içerisinde çıkarılan bentonit ve yine aynı üreticiden temin edilen örgülü ve örgüsüz geotekstiller kullanılmıştır. Üreticiden rulo halinde temin edilen GKÖ'nün içindeki bentonit granüler formda olup doğal su içeriği %16'dır. GKÖ içinden çıkarılan bentonitin likit ve plastik limit değerleri sırasıyla %231 ve %61 olarak elde edilmiştir (ASTM D4318-17). Şişme indisi değeri ise 21.5 ml/2g bulunmuştur (ASTM D5890-19).

GKÖ'ler üzerinde yapılacak olan hidrasyon çalışmaları Aydın Katı Atık Depolama Sahası'ndan alınan doğal zemin malzemesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Zemin %58.5 kum, %31.7 silt ve %9.8 kil boyutunda daneler içermektedir. Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine (USCS) göre siltli kum (SM) olarak sınıflandırılmıştır. Standart Proctor enerjisi altında siltli kumun optimum su içeriği %12, maksimum kuru birim hacim ağırlığı ise 19.1 kN/m³ olarak belirlenmiştir.

2.1. Yöntem

GKÖ Hidrasyon Deneyleri

Hidrasyon deneyleri, sıkıştırılmış siltli kum numuneleri üzerinde PVC kalıplar içinde gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, deneylerde kullanılmak üzere iç çapı 110 mm, yüksekliği 127 mm olan PVC kalıplar ile PVC kalıp ile aynı çapa sahip polioksimetilen malzemeden üretilmiş başlıklar kestirilmiştir. Optimum su içeriğinin %2 ıslak kısmında hazırlanan siltli kum bu kalıplar içerisinde Standart Proctor enerjisi altında sıkıştırılmıştır. Daha sonra sıkıştırılmış siltli kum tabakasının üzerine sırasıyla GKÖ ve polioksimetilen başlık yerleştirilmiştir. Sistemde buharlaşmayı önlemek için PVC kalıplar hava almayacak şekilde streç film ve

nylon ile sarılmış, ardından O-halkalar kullanılarak tam izolasyon sağlanmıştır. Numunelerin üzerine 1 kPa'lık efektif gerilmeye karşılık gelen ağırlıklar yerleştirilmiş ve hidrasyon süreci başlatılmıştır. Hidrasyon deneylerinde kullanılan düzeneğin şematik ve genel görünüşü Şekil 1'de verilmiştir.



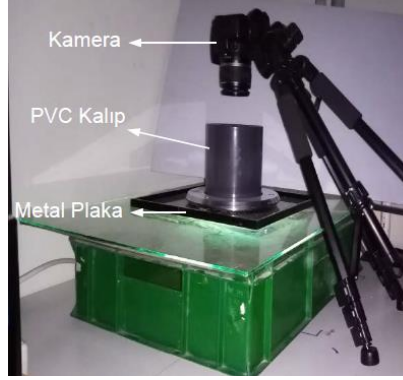
Şekil 1. Hidrasyon deneylerinde kullanılan sistemin şematik ve genel görünüşü

Hidrasyon deneyleri süresince belirli aralıklarla GKÖ'ler PVC kalıplardan çıkarılmış ve ağırlıkları tartılmıştır. Deney sonunda GKÖ örnekleri son kez tartıldıktan sonra etüvde 105°C'de kurutulmuştur. Kuru GKÖ ağırlıkları belirlendikten sonra her kademedeki tartılan ıslak ağırlıklardan kuru ağırlıklar çıkartılarak GKÖ'lerin her tartımda aldıkları su miktarları belirlenmiş ve su kütlesi kuru örnek kütlesine bölünerek GKÖ su içeriği değerleri hesaplanmıştır.

GKÖ Hidrasyon Deneyleri Sırasında Görüntüle İşlemleri

Çalışma kapsamında GKÖ örnekleri içerisindeki boşlukların hidrasyon deneyleri sırasında görüntülenmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla karanlık bir odaya özel bir görüntüleme sistemi kurulmuştur. Görüntü elde etme işlemleri için CANON EOS dijital SLR fotoğraf makinası kullanılmıştır.

Görüntüleme işlemleri sırasında 120 mm çapında kesilmiş GKÖ örnekleri kullanılmış ve GKÖ'nün örgülü geotekstil tarafının aşağıya (ışık kaynağına) örgüsüz geotekstil tarafının da yukarıya (kameraya doğru) bakacak şekilde yerleştirilmesine dikkat edilmiştir. GKÖ'nün görüntüleme sistemindeki siyah plaka ile tam olarak temasını sağlamak ve kenarlardan ışık geçişini engellemek için üstüne ortasında 100 mm çaplı boşluğa sahip bir metal plaka yerleştirilmiştir. Bu plaka üzerine de ışığın dağılmasını önlemek ve karanlık ortamı pekiştirmek için hidrasyonda kullanılan PVC kalıp yerleştirilmiştir. Kamera tripodda yerleştirildikten sonra Şekil 2'de gösterildiği gibi konumlandırılmış ve tripod ayakları sabit hale getirildikten sonra görüntülemeler yapılmıştır.



Şekil 2. Fotoğraf çekimlerinde kullanılan görüntü alma düzeneği

Görüntüleme işlemleri için öncelikle sayısal olarak değerlendirebilecek uygun poz elde etmek amacıyla kameranın kalibrasyonu yapılmıştır. GKÖ ile çekim yaparken karanlık bir ortamda sadece GKÖ altından aydınlatılarak çekim yapılmıştır. Işığın toplanması ve net fotoğraflar çekilebilmesi için kamera ayarları ISO hızı 200, F durağı f/4, poz süresi 30 saniye olacak şekilde ayarlanmıştır. Flaşsız, merkezi ağırlıklı ortalama ile çekim yapılmıştır.

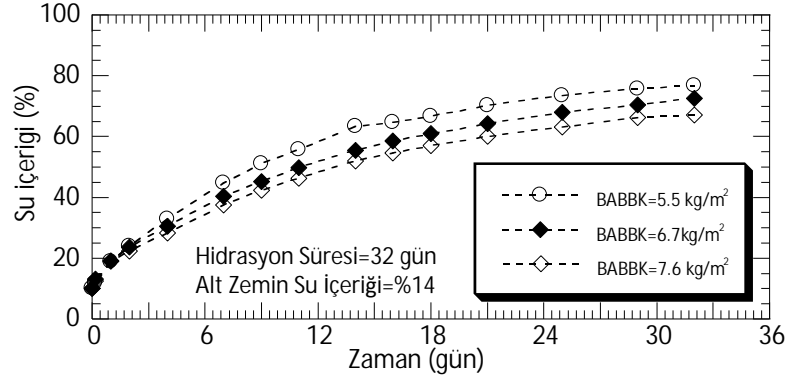
Görüntü İşleme Çalışmaları

GKÖ'deki bentonit parçacıkları ve granülleri tarafından tamamen işgal edilen alanlardan ışık geçememektedir. Diğer bir deyişle, GKÖ içerisinden süzülen yoğun ışık bentonit parçacıkları arasındaki boşluğu ortaya çıkarmaktadır. Bundan dolayı alınan görüntülerde aydınlık alanlar, içerisinde hiç bentonit bulunmayan veya az miktarda bentonit parçacığının bulunduğu bölgeleri temsil edilmektedir. Bu durumda varlığından emin olunan iki alan ortaya çıkmaktadır. Biri tamamen bentonitle kaplanmış "kapalı" alan (K), diğeri ise hiç bentonit bulunmayan "açık" alandır (A). Bu iki sayısal alan değerinin farkı da kısmen kapalı (KK) alan değerini vermektedir.

Elde edilen görüntüler Matlab yazılımında bir program yazılarak analiz edilmiştir. Bunun için GKÖ içinden süzülen ışığın miktar ve yoğunluğu sayısallaştırılmıştır. Matlab, açık (A) ve kapalı (K) alanların sayısal değerini belirlemek için kullanılmıştır. Görüntü işleme 5 adımda gerçekleştirilmiştir. Bunlar görüntüyü elde etme, ön işleme, bölütleme, çıkarım ve yorumlamadır. Sayısal resim elde edildikten sonra görüntü kullanılmadan önce daha başarılı bir sonuç elde edebilmek amacıyla görüntü bazı ön işlemlerden geçirilmektedir. Bu amaçla GKÖ'nün bulunduğu alan dışındaki alanların dikkate alınmaması orijinal görüntüye maskeleme yöntemi uygulanmıştır. Bu işlemde merkez koordinatları ve çapı belirlenen GKÖ dışındaki alanlar tamamen 0 (siyah) değerine sahip olacak şekilde matris formunda bir maske uygulanmıştır. Böylece her bir pikselin gri seviye değeri Matlab programında belirlenmektedir. Çalışma kapsamında görüntülerin arka plandan ayrılması için bütünsel eşikleme yöntemi kullanılmıştır. Konuyla ilgili daha detaylı bilgi Özyanık vd.'de (2022) verilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Sıkıştırılmış alt zemin üzerine yerleştirilip hidrate edilen GKÖ'lerin hidrasyon davranışı Şekil 3'te verilmiştir. GKÖ'lerin su içeriği, GKÖ ile sıkıştırılmış alt zemin arasındaki emme basıncı farkından dolayı hidrasyonun ilk 15 gününde hızla artmıştır. Daha sonra bu farkın azalması ile hidrasyon hızı da azalmıştır. Bir süre sonra GKÖ su içeriğinde önemli bir değişiklik ölçülmemiştir. Başlangıç su içeriği %10 olan GKÖ'lerin nihai su içerikleri BABBK'nin 5.5, 6.7 ve 7.6 kg/m² olması durumunda sırasıyla %77, %73 ve %67 olarak belirlenmiştir.



Şekil 3. Hidrasyon sırasında GKÖ'lerin su içeriğinin değişimi

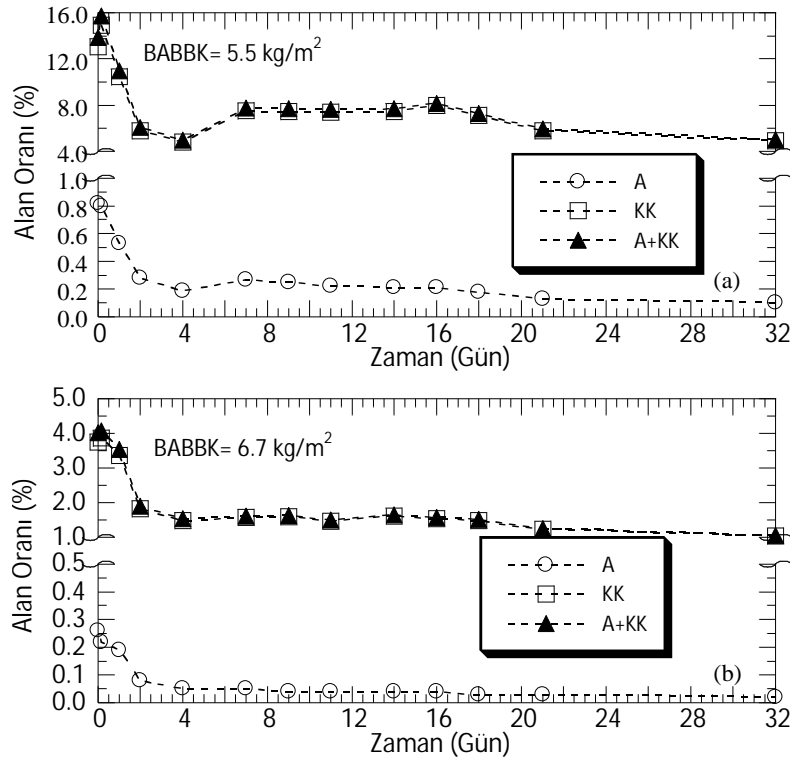
Elde edilen sonuçlar genel olarak incelendiğinde 32 günlük hidrasyon süresi göz önüne alındığında BABBK'sı yüksek olan GKÖ'lerin hidrasyon sonu su içeriği değerlerinin BABBK'si düşük olan GKÖ'lerden daha düşük olduğu görülmüştür. Belirli zaman aralıkları ile GKÖ'lerin hidrasyon süresi içerisinde alınan görüntüleri Şekil 4'te verilmiştir.

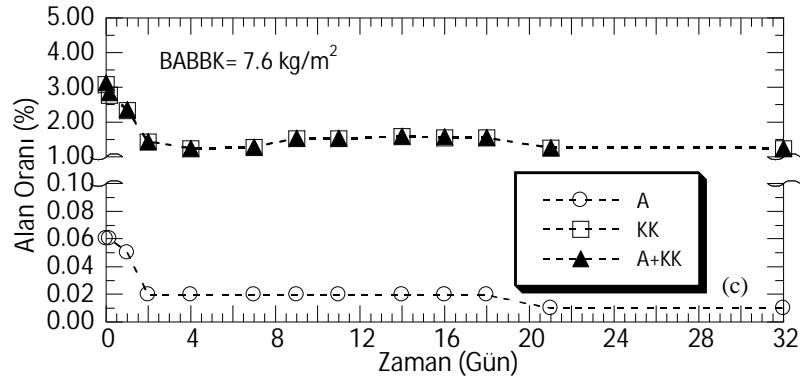
BABBK (kg/m ²)	Zaman				
	t= 0 (Işık açık)	t= 0 (Işık kapalı)	t=1 gün (Işık kapalı)	t=7 gün (Işık kapalı)	t=32 gün (Işık kapalı)
5.5					
6.7					
7.6					

Şekil 4. Farklı BABBK'lere sahip GKÖ'lerin hidrasyon sırasında SLR makine ile çekilmiş görüntüleri

Alt zemin üzerinde hidrate edilen tüm numunelerin her ölçüm anında görüntülemesi yapılmış, ancak çok fazla fotoğraf olduğu için bunlardan bazıları kullanılmıştır. Şekil 4'te kullanılan fotoğraflar GKÖ'lerin hidrasyon öncesi başlangıç durumunu ve birinci gün, yedinci gün (hidrasyonun ortası) ve hidrasyon sonundaki nihai hallerini göstermektedir. Şekil 4'te başlangıç anında BABBK'si düşük olan GKÖ'nün daha fazla boşluğa sahip olduğu görülmektedir. Bundan dolayı kamera ile alınan görüntülerde ışığın geçtiği alanlar bariz şekilde parlak gözükmemektedir. Bununla birlikte hidrasyon ile birlikte GKÖ'lerin içindeki boşluklar önemli miktarda kapanmıştır. Hidrasyon üzerinden 1 gün geçtiğinde bentonit partiküllerinin yanal olarak şişip GKÖ içindeki boşlukları kapatmaya başladığı görülmektedir. Görüntülerdeki parlak kısımların yoğunluğunun azalması boşlukların kapandığının bir göstergesidir. Su içeriği değerlerinin önemli miktarda arttığı ilk 7 gün sonunda bentonit partikülleri arasındaki boşluklar önemli ölçüde kapanmıştır. Deneylerin sonlandırıldığı 32. güne kadar GKÖ'lerin içindeki boşluklar kapanmaya devam etmiş ancak deney sonunda hala partiküller arasında boşlukların kaldığı görülmüştür.

GKÖ'lerin içindeki boşluklar çekilen görüntüler kullanılarak Matlab'te yazılan program aracılığıyla sayısallaştırılmıştır. Yapılan analizlerde GKÖ'lerin içindeki açık alan (A), kısmi kapalı (KK) alan ve kapalı (K) alan değerleri belirlenmiş ve bu değerler GKÖ'lerin toplam alanına bölünerek GKÖ içindeki toplam açık alan oranları hesaplanmıştır. Bu oranların zamana bağlı değişimi Şekil 5'te verilmiştir.





Şekil 5. Faklı BABBK'ye sahip GKÖ'lerin: a) BABBK= 5.5 kg/m², b) BABBK= 6.7 kg/m² ve c) BABBK= 7.6 kg/m² açık (A), kısmi kapalı (KK) ve toplam (A+KK) alanlarının GKÖ'lerin toplam alanına oranlarının zamana bağlı değişimi

Şekil 5'ten de görülebileceği gibi alan oranlarının tümü ilk dört gün içinde hızla azalmıştır. Dördüncü günden yedinci güne kadar GKÖ içindeki boşlukların oranları düşmüştür. Ancak yedinci gün alınan görüntüler üzerinde yapılan değerlendirmelerde GKÖ'lerdeki boşlukların bir miktar arttığı ve bu günden sonra neredeyse sabit kaldığı belirlenmiştir. GKÖ'lerde yedinci günde meydana gelen boşlukların oranındaki minimal artışın sistemdeki buharlaşma ve nem kayıplarından kaynakladığı düşünülmektedir. Genel olarak bakıldığında hidrasyon deneyleri sonunda (A)/Toplam Alan değeri ile KK alanının oransal değeri tüm örneklerde düşmüştür. Dolayısıyla (A+KK)/Toplam Alan değeri ise zamanla azalmıştır. Bu durum bentonitin bünyesine su alıp şişerek zaman içinde GKÖ içerisindeki boşlukları doldurduğunu net bir şekilde göstermektedir. Hidrasyonla birlikte yanal olarak genişleyen bentonit parçacıkları daha üniform bir görüntüye kavuşmuştur.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada Na-GKÖ içindeki bentonitin hidrasyon sırasında sergilediği yanal şişme ve yayılma davranışı gözlenmiştir. Bunun için kamera ve ışık birimlerinden oluşan görüntü alma sistemi karanlık bir odaya kurulmuştur. Sıkıştırılmış zemin tabakası üzerine yerleştirilen GKÖ'nün hidrasyonu ise zamana bağlı yapılan ağırlık ölçümleri ile belirlenmiştir. Bu esnada GKÖ'nün görüntüleri alınarak içindeki bentonitin yatay yönde hareket ederek parçacıklar arası boşlukları kapatması izlenmiştir.

Sonuçlar BABBK bazlı değerlendirildiğinde BABBK'nin hidrasyon su içeriklerine etkisi olduğu görülmüştür. BABBK arttıkça, hidrasyon su içeriği azalmıştır.

GKÖ'nün görüntü alma sisteminde çekilen fotoğraflarından daneler arası boşlukların zamanla azaldığı görülmüştür. Bu azalma Matlab'de yazılan bir program vasıtasıyla sayısallaştırılmıştır. Hidrasyon sonunda daneler arasında hala kapanmayan boşluklar olduğu görülmüştür.

TEŞEKKÜR

Burada sunulan sonuçlar TÜBİTAK 119R044 nolu proje kapsamında yürütülen çalışmalardan elde edilen sonuçların bir bölümünü içermektedir. Yazarlar TÜBİTAK'a projeye verdiği maddi

destek ile bursiyer ve araştırmacı desteği için teşekkür eder. Ayrıca, görüntü alma düzeneğinin laboratuvara kurulmasında ve görüntülerin Matlab programı ile analizinde İnş. Müh. Rabia Özyanık'ın önemli katkıları olmuştur. Kendisine bu çabası ve katkısı için teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Anderson, R., Rayhani, M.T., Rowe, R.K., (2012). "Laboratory investigation of GCL hydration from clayey subsoil", *Geotextiles and Geomembranes* Vol 31, 31–38. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2011.10.005>
- ASTM D4318-17, (2017). Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, in: ASTM International, West Conshohocken, PA, USA. pp. 1–14. <https://doi.org/10.1520/D4318>
- ASTM D5890-11, (2011). Standard test method for swell index of clay mineral component of geosynthetic clay liners, in: ASTM International, West Conshohocken, PA, USA. pp. 7–9. <https://doi.org/10.1520/D5890-11.2>
- ASTM:D422-63, (2007). Standard test method for particle-size analysis of soils, in: ASTM International, West Conshohocken, PA, USA. pp. 1–8. <https://doi.org/10.1520/D042263R07E01.2>
- ASTM:D698-12, (2012). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA 3, 1–13. <https://doi.org/10.1520/D0698-12.1.4>
- ASTM:D5993-99, (2010). Standard Test Method for Measuring Mass Per Unit of Geosynthetic Clay Liners. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA 99, 1–4. <https://doi.org/10.1520/D5993-99R09.2>
- Bouazza, A., Ali, M.A., Gates, W.P., Rowe, R.K., (2017). "New insight on geosynthetic clay liner hydration: the key role of subsoils mineralogy", *Geosynthetics International* 24, 139–150. <https://doi.org/10.1680/jgein.16.00022>
- 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, 526–538. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943.5606.0000793](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943.5606.0000793)
- Li, T.K., Rowe, R.K., (2022). "Self-healing of laboratory eroded defects in a GCL on silty sand", *Geosynthetics International* 29, 43–65. <https://doi.org/10.1680/jgein.21.00023>
- Li, T.K., Rowe, R.K., (2020). "GCL self-healing: Fully penetrating hole/slit hydrated with RO water and 10 mM Ca solution", *Geosynthetics International* 27, 34–47. <https://doi.org/10.1680/jgein.19.00054>
- Meer, S.R., Benson, C.H., (2007). "Hydraulic Conductivity of Geosynthetic Clay Liners Exhumed from Landfill Final Covers", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 133, 550–563. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000407](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000407)
- Rayhani, M.T., Rowe, R.K., Brachman, R.W.I., Take, W.A., Siemens, G., (2011). "Factors affecting GCL hydration under isothermal conditions", *Geotextiles and Geomembranes* 29, 525–533. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2011.06.001>

- 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, 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., 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, 1118–1138.
- Rowe, R.K., 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. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2021.03.010>
- Santamarina, J.C., Cho, G.C., (2004). "Soil behaviour: The role of particle shape", *Advances in Geotechnical Engineering: The Skempton Conference - Proceedings of a Three Day Conference on Advances in Geotechnical Engineering, organised by the Institution of Civil Engineers* 604 617.
- 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, 436 447. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2018.03.009>
- Özyanık, R., Taşkesti B.E., Önal, A.H. (2022). "Hidrasyon sırasında geosentetik kil örtü bentonitindeki değişimlerin görüntü işleme tekniği ile belirlenmesi" Dokuzuncu Ulusal Geosentetikler Konferansı'nda sunumu yapıldı.