

## DÜŞÜK BİRİM ALAN BAŞINA BENTONİT KÜTLESİ İÇEREN BİR GEOSENTETİK KİL ÖRTÜNÜN BARIYER PERFORMANSI

### BARRIER PERFORMANCE OF GEOSYNTHETIC CLAY LINER WITH LOW BENTONITE MASS PER UNIT AREA

Taylan Cem AYTEKİN<sup>1</sup>, Ali Hakan ÖREN<sup>2</sup>

#### ÖZET

Bu çalışma, polimerle zenginleştirilmiş düşük birim alan başına bentonit kütlesine (BABBK) sahip bir geosentetik kil örtünün (GKÖ) hidrolik iletkenlik özelliklerini incelemektedir. Bir atık depolama sahasında uygulaması yapılmış bu GKÖ'nün BABBK değerleri 2.3-3.8 kg/m<sup>2</sup> arasında değişmektedir. Hidrolik iletkenlik deneyi öncesinde laboratuvara kurulmuş özel bir görüntü alma düzeneğiyle GKÖ'nün başlangıç durumu resmedilmiş ve oldukça boşluklu bir yapıda olduğu belirlenmiştir. Hidrolik iletkenlik deneyi başlatıldığında bu boşlukların suyun geçişine beklendiği ölçüde izin vermediği; buna da boşlukların polimerle dolu olmasının sebep olduğu anlaşılmıştır. Bu deneyde GKÖ'nün hidrolik iletkenlik değeri 10<sup>-11</sup> m/s mertebesinde ölçülmüştür. Bununla birlikte, çıkış sıvısındaki bulanıklık, akış sırasında polimerin sızma kuvveti etkisiyle GKÖ'den dışarı çıktığını göstermiştir. Sonraki deneylerde hidrolik eğim yavaş yavaş artırılarak düşük geçirimsizlik değerlerinin kalıcılığı, polimerin GKÖ'den süpürülme durumu ve uygulanan hidrolik eğimin etkisi incelenmiştir. Bu çalışmanın, polimerle zenginleştirilmiş GKÖ'lerin hidrolik iletkenlik özelliklerinin anlaşılmasına katkı sağlayarak, atık depolama sahalarında GKÖ'lerin daha etkin bir şekilde kullanılmasına ve atık depolama sahalarının sürdürülebilir yönetimi için daha etkin çözümlerin geliştirilmesine yardımcı olması beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler: geosentetik kil örtü, polimer, hidrolik iletkenlik, atık depolama sahası, sürdürülebilir yönetim

#### ABSTRACT

This study examines the hydraulic conductivity of a polymer-enriched geosynthetic clay liner (GCL) with low bentonite mass per unit area (MPUA). The MPUA values of this GCL, which was applied in a landfill, vary between 2.3-3.8 kg/m<sup>2</sup>. Before the hydraulic conductivity test, the initial state of the GCL was depicted with a special imaging device installed in the laboratory and it was determined that it had a very porous structure. When the hydraulic conductivity test was started, it was observed that the gaps between the bentonite aggregates did not allow the flow of water as expected. This was caused by the

<sup>1</sup> Yüksek Lisans Öğrencisi, Dokuz Eylül Üniversitesi, [aytekin.taylancem@ogr.deu.edu.tr](mailto:aytekin.taylancem@ogr.deu.edu.tr) (Sorumlu yazar)

<sup>2</sup> Profesör, Dokuz Eylül Üniversitesi, [ali.oren@deu.edu.tr](mailto:ali.oren@deu.edu.tr)

gaps filled with polymers. In this test, the hydraulic conductivity of GCL was measured  $10^{-11}$  m/s. However, blurred effluent water indicated that seepage induced polymer elution occurred from the GCL during flow. In subsequent tests, the hydraulic gradient was gradually increased and the permanence of low permeability, the condition of polymer elution from the GCL, and the effect of the applied hydraulic gradient were examined. It is expected that this study will contribute to the understanding of the hydraulic conductivity of polymer-enriched GCLs, helping to use GCLs more effectively in landfills and developing more effective solutions for the sustainable management of landfills.

Key words: geosynthetic clay liner, polymer, hydraulic conductivity, waste disposal site, sustainable management

## 1. Giriş

Geosentetik kil örtüler (GKÖ) atıkların çevreden izole edilmesi veya atık depolama sahalarının üzerinin örtülerek rehabilite edilmeleri için kullanılan fabrikada üretilmiş malzemelerdir (Koerner, 2005). Bariyer olarak kullanılan bu malzeme, içerdiği bentonit sayesinde düşük geçirimsizliğe ve yüksek şişme gösterme potansiyeline sahiptir (Estornell and Daniel, 1992; Petrov et al., 1997). Bentonit farklı minerallerden oluşan, ancak ağırlıklı olarak montmorillonit minerali içeren bir üründür. Bazı durumlarda bentonit içerisindeki montmorillonit miktarı %80'in üzerinde olabilmektedir (Lee and Shackelford, 2005; Shackelford et al., 2000).

Katyon değişimi nedeniyle GKÖ geçirgenliğinin zamanla artışının önüne geçebilmek için polimerli bentonit kullanılmaya başlanmıştır. Polimer bakımından zengin bentonit kullanıldığı durumda GKÖ'lerin geçirimsizliğinin zamanla azaldığı ve hidrolik iletkenliğin düşük değerini daha uzun süreli muhafaza ettiği raporlanmıştır (Chen et al., 2019; Di Emidio et al., 2015; Li et al., 2021).

GKÖ içinde polimer kullanımı ve buna yönelik araştırmalar arttıkça malzeme içindeki polimerin de tek başına yeterli olamayabileceği sonucu ile karşılaşmıştır. Hidrolik iletkenlik deneyleri esnasında uygulanan hidrolik eğim değeri ile polimerlerin GKÖ içerisinde dışarı çıkabileceği görülmüştür. Scalia vd. (2014) ve Scalia ve Benson (2017) akış ile polimerin GKÖ içinden dışarı çıkabileceğini gösteren çalışmalara yer vermişlerdir.

Polimerli bentonitin GKÖ içinde kullanılması, hidrolik iletkenliğin Na-GKÖ'lere göre daha uzun süre düşük kalmasına izin vermesine karşılık kesin bir çözüm sağlayamamaktadır. Ayrıca, GKÖ'nün BABBK'sinin hidrolik iletkenlik üzerinde önemli etkisi olduğu göz önünde bulundurulursa bu durum düşük BABBK'ye sahip polimerli GKÖ'ler için soru işaretleri barındırmaktadır.

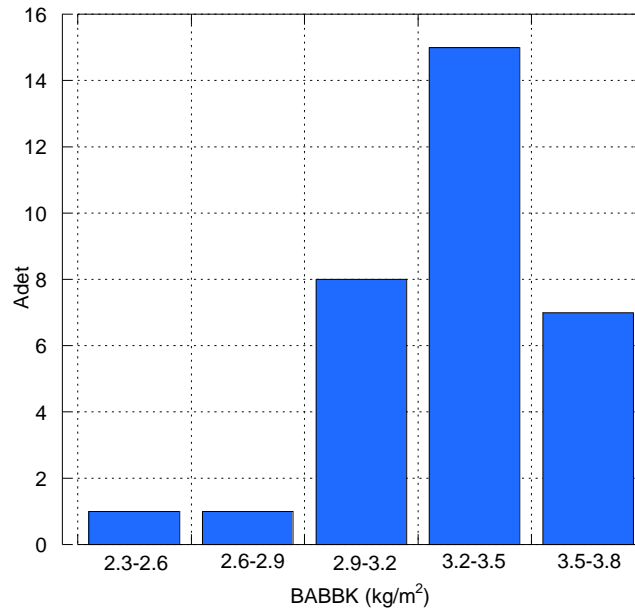
Bu çalışmanın amacı düşük BABBK'ye sahip polimerli bir GKÖ'nün farklı hidrolik eğimler altında hem GKÖ içerisinde polimerin dışarıya süpürülme durumu, hem de uzun dönem hidrolik iletkenlik performansı incelenmiş ve tartışılmıştır. Ülkemizde bir atık depolama sahasında kullanıldığı bilinen bu GKÖ'nün bariyer performansının belirlenmesi ile ileride bu tip GKÖ'lerin tercih edilip edilmemesi hakkında önemli bilgi sağlanacaktır.

## 2. MATERYALLER VE TEST METOTLARI

### 2.1. Geosentetik Kil Örtü

Deneylerde kullanılacak GKÖ bir atık depolama sahasında kullanılmış polimerli bentonit içeren bir GKÖ (P-GKÖ)'dür. Bu P-GKÖ'ye ait bir rulo Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda bulunmaktadır.

P-GKÖ rulosundan 32 adet 100 mm çapında numune kesilerek her bir P-GKÖ'nün birim alan başına bentonit kütlesi (BABBK) belirlenmiştir (ASTM D5993-99, 2010). Bu GKÖ'nün BABBK değerleri 2.3-3.8 kg/m<sup>2</sup> arasında değişmekte olup, bu değer aralığı 5 kısma bölünüp her kısımda yer alan P-GKÖ adedi Şekil 1'de verilmiştir. P-GKÖ rulosundan dökülen bentonitler toplanarak bentonitin ve P-GKÖ'nün sahip olduğu başlangıç su içeriği belirlenmiştir.



Şekil 1. P-GKÖ'nün rulo içindeki BABBK dağılımı

Kesilen 32 adet numuneden farklı BABBK'ye sahip 3 adet P-GKÖ seçilmiş olup, seçilen P-GKÖ'lerin geometrik ölçümleri ve BABBK değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. GKÖ geometrik ölçümleri ve BABBK değerleri

GKÖ No	D1 (cm)	D2 (cm)	t1 (cm)	t2 (cm)	t3 (cm)	t4 (cm)	BABBK (kg/m <sup>2</sup> )
#1	10.6	10.5	0.40	0.42	0.42	0.39	2.34
#2	10.0	10.2	0.54	0.51	0.50	0.51	3.25
#3	10.2	10.3	0.44	0.55	0.49	0.45	2.89

P-GKÖ'lerin boşluklu yapısını belirlemek amacıyla laboratuvardaki karanlık bir odada ışık ve görüntü alma düzeneği kurulmuştur. Deneylere başlamadan önce kurulan bu düzenek vasıtasıyla P-GKÖ'lerin fotoğrafları çekilmiş ve oldukça boşluklu bir yapıda oldukları görülmüştür (Şekil 2).



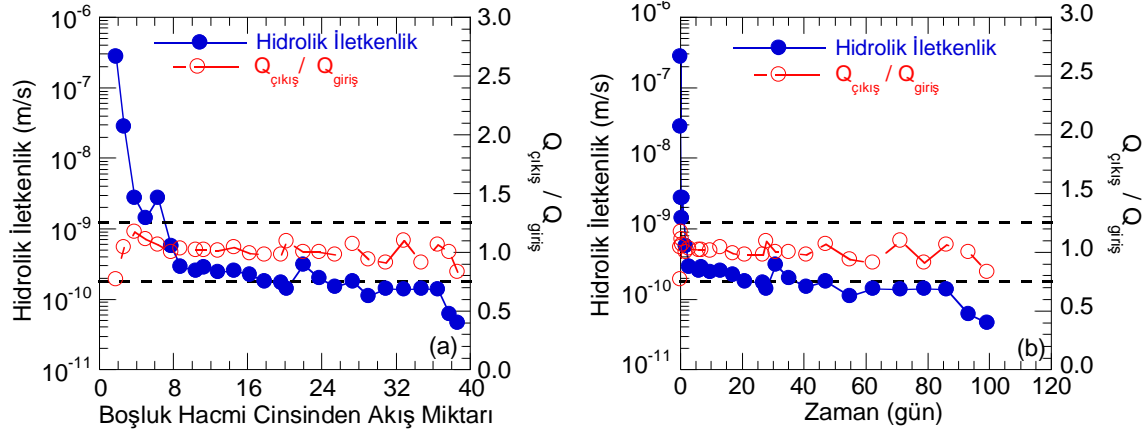
Şekil 2. Görüntü alma düzeneği ve ışık altında P-GKÖ'nün yapısı

## 2.2. Hidrolik İletkenlik Deneyi

P-GKÖ'nün hidrolik iletkenlik deneyleri esnek duvarlı permametreler kullanılarak yapılmıştır. Hidrolik iletkenlik deneylerinde ASTM D6766-12 (2012) takip edilmiştir. Deneylerde hücre basıncı 35 kPa olarak tutulmuştur. Yapılan deneylerde de arazide olduğu gibi akış yönünün yukarıdan aşağıya olması sağlanmıştır. Örnek içinden geçen sıvı miktarı hücreye bağlı büret üzerinden ölçülmüş, çıkan sıvı ise ölçekli mezürde biriktirilmiştir. Deneylerle ilgili detaylar yazarların önceki çalışmalarından izlenebilir (Benson et al., 2010; Ören et al., 2017; Özdamar Kul and Ören, 2019).

## 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Hidrolik iletkenlik deneyleri esnasında uygulanan hidrolik eğim değeri deneyler için önemli bir yer tutmuştur. Farklı BABBK'ye sahip P-GKÖ'ler kullanılacağından yüksek hidrolik eğimlerde polimerin P-GKÖ'den süpürülmesi mümkün olabilmektedir. İlk yapılan hidrolik iletkenlik deneyi (#1) yüksek bir hidrolik eğimde (yaklaşık 100) başlatılmıştır. Bu deneye ait hidrolik davranış Şekil 3'te verilmiş olup hidrolik iletkenlikler, boşluk hacmi cinsinden akış miktarının (BHCAM) fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Şekil 3'te ikinci y-ekseninde  $Q_{\text{çıkış}}/Q_{\text{giriş}}$  değerleri gösterilmiştir. Fiziksel olarak deneyin tamamlanabilmesi için bu oranın  $1.0 \pm 0.25$  olması gerekmektedir. Şekil 3 üzerinde bu aralık yatay kesikli çizgilerle gösterilmiştir. Şekil 3'te de görüldüğü üzere  $Q_{\text{çıkış}}/Q_{\text{giriş}}$  değerleri bu aralıkta gerçekleşmiştir. Bu GKÖ'nün hidrolik iletkenliği başlangıçta yüksek iken ( $\sim 10^{-7}$  m/s) 8 BHCAM'de  $10^{-10}$  m/s'ye inmiş; daha sonra yavaşça azalarak deney sonunda  $4.6 \times 10^{-11}$  m/s ölçülmüştür (Şekil 3a). Nihai hidrolik iletkenlik son üç değerlerin ortalaması alınarak  $8.1 \times 10^{-11}$  m/s hesaplanmıştır. Aynı GKÖ'nün hidrolik iletkenlik davranışı Şekil 3b'de zamana bağlı gösterilmiştir. Buradan, hidrolik iletkenliğin ilk 5 gün içinde hızla azaldığı ve düşük hidrolik iletkenliğin yaklaşık 100 gün devam eden deney boyunca muhafaza edildiği görülmektedir (Şekil 4). Hidrolik iletkenlikte ani azalmanın polimerin su ile temas ettiğinde hızla hidrate olup bentonit parçacıkları arasındaki boşlukları kapatmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 3. #1 GKÖ'nün (BABBK'si  $2.35 \text{ kg/m}^2$ ) hidrolik iletkenlik davranışının: a) boşluk hacmi cinsinden akış miktarı (BHCAM) ve b) zamana bağlı gösterimleri

İlk yapılan hidrolik iletkenlik deneyinde (#1) GKÖ içinden akış başladıktan sonra permametrenin çıkış ağzının bağlı olduğu dereceli mezürde bulanıklık gözlenmiştir (Şekil 4). Daha önce Na-bentonite sahip GKÖ'lerle yapılan deneylerde gözlenmeyen bu bulanıklığın serbest haldeki polimerlerin süpürülmesi nedeniyle oluştuğu değerlendirilmiştir. Bu bulanıklık bir süre devam etmiş, daha sonra GKÖ'den sızan su berraklaşmıştır. Dolayısıyla serbest polimerlerin GKÖ'den süpürülmesinin deney başında gerçekleştiği, daha sonra ise polimerler su alıp şiştikçe süpürülmenin ortadan kalktığı söylenebilir.

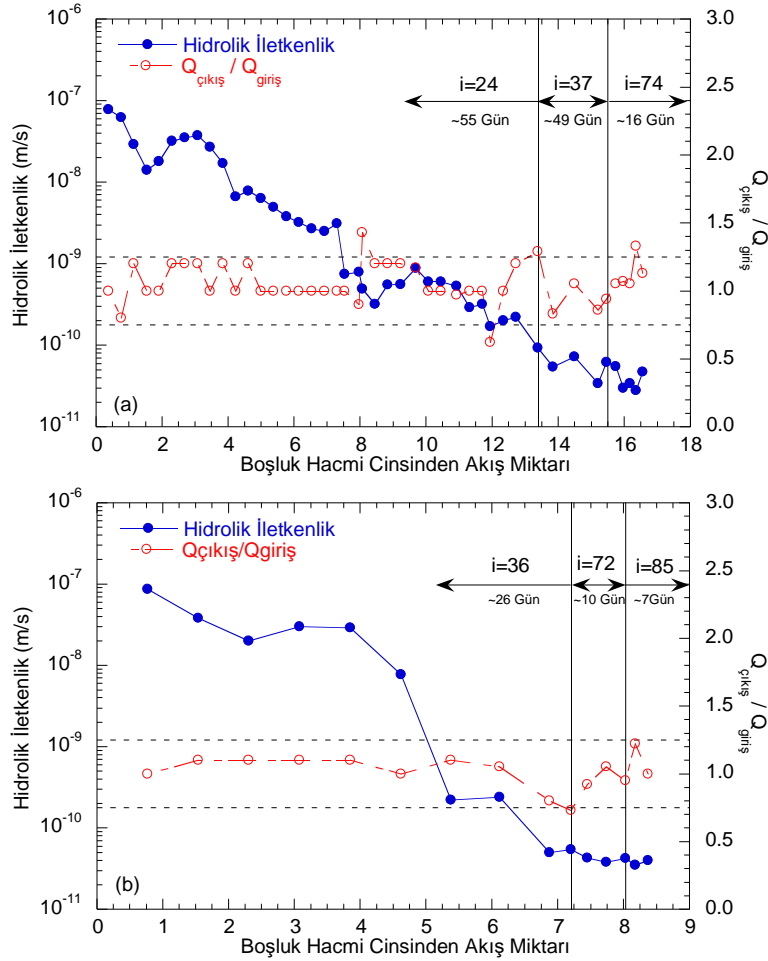


Şekil 4. #1 deneyde P-GKÖ'den ayrılan polimerin çıkış sıvısında (solda) görüntüsünün saf su (sağda) ile karşılaştırılması.

İlk deney sonunda GKÖ içinden polimerin süpürülmesi söz konusu olduğundan diğer iki deneyde hidrolik eğim değeri düşükten başlatılarak kademeli olarak artırılmıştır. Böylece düşük hidrolik eğimde de polimerin GKÖ'den dışarı çıkmasının mümkün olup olmayacağı incelenmiştir. Hidrolik eğim değerlerinin artırılması sonucunda düşük geçirimsilik değerlerinin kalıcılığı 2 ve 3 numaralı (#2 ve #3) GKÖ'lerde incelenmiştir. GKÖ'lerde hidrolik eğim değerleri belirli bir değerden başlatılmış olup ( $i=24$  ve  $i=36$ ), her GKÖ için 2 kere artırılarak farklı hidrolik eğimlerde hidrolik iletkenlik değerleri elde edilmiştir (Şekil 5a-b).

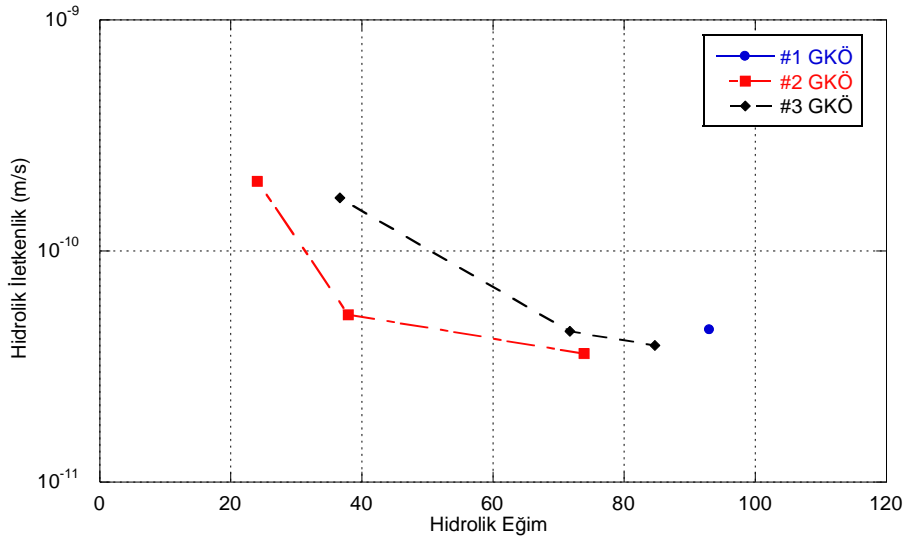
2 numaralı GKÖ'de (#2) hidrolik iletkenlik deneyi 24 hidrolik eğim ile başlatılmıştır. Şekil 5a'da hidrolik iletkenlikler BHCAM'nin fonksiyonu olarak gösterildiğinden bu eğim altında deneyler daha uzun sürdürülmüş gibi anlaşılabilir, ancak ölçümler yaklaşık 2 ay boyunca yapılmıştır. Hidrolik iletkenlik başlangıçta yüksek iken ( $8.0 \times 10^{-8}$  m/s) daha sonra kademeli olarak azalmıştır ( $2.0 \times 10^{-10}$  m/s). Bu nedenle 2 ay süre, 13.5 BHCAM'ye tekabül etmiştir. Hidrolik eğim 37'ye yükseltildiğinde hidrolik iletkenlikler  $2.0 \times 10^{-10}$  m/s'den  $5.3 \times 10^{-11}$  m/s'ye yaklaşık dört kat düşmüştür. Bu eğimde de ölçümler yaklaşık 2 ay sürdürülmüştür. Bunun karşılığı olan BHCAM daha kısadır, zira hidrolik iletkenlikler önemli ölçüde düşüktür. Hidrolik eğim iki kat artırılıp 74'e yükseltildiğinde hidrolik iletkenlikler bir miktar daha düşmüştür ( $4.7 \times 10^{-11}$  m/s). Bu eğimde hidrolik iletkenlik ölçümleri üç aydır devam etmekte olup  $4.7 \times 10^{-11}$  m/s değeri zaman içinde değişebilir.

3 numaralı GKÖ ile (#3) yapılan deneyde de benzer aşamalar izlenmiştir (Şekil 5b). 36 hidrolik eğim değeriyle başlayan deneyde başlangıç hidrolik iletkenlik değeri  $8.6 \times 10^{-8}$  m/s iken 25 günün ardından bu değer 172 kat azalarak  $5.0 \times 10^{-11}$  m/s değerine ulaşmıştır. 25 günün ardından hidrolik eğim değeri 2 katına çıkarılmış, bunun sonucunda hidrolik iletkenlik değerinde bir miktar düşüş yaşanmıştır ( $3.8 \times 10^{-11}$  m/s). BHCAM=7.5 değerine ulaşılan gün 25. gün iken 8 değerine ulaşılan gün 35 olarak raporlanmıştır. Bu deney de hala devam ettirilmektedir.



Şekil 5. GKÖ'lerin hidrolik iletkenlikleri üzerinde hidrolik eğimin etkisi: a) #2 GKÖ (BABBK'si 3.25 kg/m<sup>2</sup>) ve b) #3 GKÖ (BABBK'si 2.89 kg/m<sup>2</sup>).

Her üç GKÖ için hidrolik eğim değeri artışına karşılık nihai hidrolik iletkenliklerde meydana gelen değişimler Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6'dan da görüldüğü gibi hidrolik iletkenlikler düşük hidrolik eğimlerde nispeten daha yüksek ( $2.0 \times 10^{-10}$  m/s), yüksek hidrolik eğimlerde daha düşüktür ( $\sim 4.0 \times 10^{-11}$  m/s). Hidrolik iletkenlik düşük hidrolik eğimde yüksek olmasına rağmen hala bariyerler için izin verilen üst limitin ( $\sim 1.0 \times 10^{-9}$  m/s) altında kalmaktadır. Hidrolik iletkenlik, eğimin 24 ile 70 arasında değiştiği aralıkta azalırken hidrolik eğim 70'i geçtiğinde değişmemiştir. Hidrolik iletkenlik değerlerinde gözlenen bu düşüş birden fazla şekilde yorumlanabilir. Hidrolik eğimin artması ile GKÖ içinde bulunan polimerlerin daha hızlı şişmesi ve GKÖ içindeki boşlukları tıkaması veya GKÖ içinde bulunan serbest polimerlerin çıkış sıvısı ile süpürülmesi sonucunda içsel erozyon oluşması söz konusu olabilir. Burada elde edilen sonuca göre polimerin hidrate olması ile bentonit parçacıkları arasındaki boşlukların kapandığı ve hidrolik iletkenliğin kademeli olarak düştüğü görülmektedir. Eğim daha da arttırıldığında içsel erozyon olabilir.



Şekil 6. Kullanılan üç GKÖ için hidrolik eğim-hidrolik iletkenlik arasındaki ilişki

#### 4. SONUÇLAR

Farklı BABBK değerlerine sahip 3 adet GKÖ üzerinde yapılan bu çalışmada, hidrolik eğimin yavaş yavaş arttırılması sonucunda elde edilen düşük geçirimsizlik değerlerinin kalıcılığı, GKÖ'ler içinde bulunan serbest polimerin GKÖ'lerden süpürülme durumu ve uygulanan hidrolik eğimin etkisi incelenmiştir.

Polimerin GKÖ içinden süpürülüp süpürülmeyeceğini gözlemlemek için 1 numaralı GKÖ (#1) ile yapılan hidrolik iletkenlik deneyi yüksek bir hidrolik eğimde gerçekleştirilmiştir ( $i=93$ ). Deney başlangıcında gözlenen çıkış sıvısının bulanık görüntüsü GKÖ yapısında bulunan serbest polimerlerin GKÖ'den süpürüldüğünü göstermiştir. Polimer hidrate oldukça bu polimerin GKÖ'den dışarı çıkması durmuştur.

Hidrolik eğim değerinin hidrolik iletkenlik deneylerine etkisini incelemek amacıyla 2 ve 3 numaralı GKÖ'ler (#2 ve #3) ile deneyler yapılmıştır. Sırasıyla 24 ve 36 hidrolik eğimle başlatılan bu deneylerde eğimler arttırılarak (sırasıyla önce 37'ye ardından 74'e ve önce 72'ye ve ardından 85'e) hidrolik iletkenlik değerinde nasıl bir etki yaratacağı gözlenmek istenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda hidrolik eğim artışının hidrolik iletkenlik değerinde düşüşe sebep olduğu ( $10^{-11}$  mertebeleri) görülmüştür. Bu azalışın anlık hidrolik eğim artışından bağımsız olduğu, devam eden durumda geçirimsizlik değerinin sürekliliğini koruduğu gözlenmiştir (Şekil 6).

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma sonuçları, Dokuz Eylül Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (DEÜ BAP) kapsamında desteklenen 3529 numaralı projeden elde edilmiştir. Maddi ve manevi desteği için Dokuz Eylül Üniversitesi Rektörlüğüne teşekkür ederiz.

## KAYNAKLAR

- ASTM D5993-99, 2010. Standard Test Method for Measuring Mass Per Unit of Geosynthetic Clay Liners. ASTM Int. West Conshohocken, PA, USA 99, 1–4. <https://doi.org/10.1520/D5993-99R09.2>
- ASTM D6766-12, 2012. Standard test method for evaluation of hydraulic properties of geosynthetic clay liners permeated with potentially incompatible aqueous solutions, in: ASTM International, West Conshohocken, PA, USA. pp. 1–9. <https://doi.org/10.1520/D6766-12>. Copyright
- Benson, C.H., Ören, A.H., Gates, W.P., 2010. Hydraulic conductivity of two geosynthetic clay liners permeated with a hyperalkaline solution. *Geotext. Geomembranes* 28, 206–218. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2009.10.002>
- Chen, J., 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)
- Di Emidio, G., Mazzieri, F., Verástegui-Flores, R.-D., Van Impe, W., Bezuijen, A., 2015. Polymer-treated bentonite clay for chemical-resistant geosynthetic clay liners. *Geosynth. Int.* 22, 1–13. <https://doi.org/10.1680/gein.14.00036>
- Estornell, P., Daniel, D.E., 1992. Hydraulic Conductivity of Three Geosynthetic Clay Liners. *J. Geotech. Eng.* 118, 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))
- Koerner, R.M., 2005. *Designing with Geosynthetics*, 5th ed. Pearson/Prentice Hall, New Jersey.
- Lee, J.-M., Shackelford, C.D., 2005. Impact of bentonite quality on hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 131, 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., Peng, D., 2021. Hydraulic conductivity of bentonite-polymer composite geosynthetic clay liners permeated with bauxite liquor. *Geotext. Geomembranes* 49, 420–429. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2020.10.015>
- Ören, A.H., Öztürk, M., Özdamar Kul, T., Nart, Z., 2017. Hydraulic conductivity of sodium



- and polymerized sodium GCLs to CuCl<sub>2</sub> solution, in: Second International Symposium on Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics (CPEG2). pp. 1–5.
- Özdamar Kul, T., Ören, A.H., 2019. Hydration of geosynthetic clay liners (GCLs) on compacted zeolite. *Geosynth. Int.* 26. <https://doi.org/10.1680/jgein.18.00038>
- Petrov, R.J., Rowe, R.K., Quigley, R.M., 1997. Selected factors influencing GCLhydraulic conductivity. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 123, 683–695.
- Scalia, J., Benson, C.H., 2017. Polymer Fouling and Hydraulic Conductivity of Mixtures of Sodium Bentonite and a Bentonite-Polymer Composite. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 143, 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., Shackelford, C.D., 2014. Long-term hydraulic conductivity of a bentonite-polymer composite permeated with aggressive inorganic solutions. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 140, 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., Lin, L., 2000. Evaluating the Hydraulic Conductivity of GCL Permeated with Non-standard Liquids. *Geotext. Geomembranes* 18, 133–161.

## SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
BABBK	Birim Alan Başına Bentonit Kütlesi	GKÖ	Geosentetik Kil Örtü
MPUA	Mass Per Unit Area	GCL	Geosynthetic Clay Liner
P-GKÖ	Polimerli Geosentetik Kil Örtü	Na-GKÖ	Sodyum Bentonit Geosentetik Kil Örtü
BHCAM	Boşluk Hacmi Cinsinden Akış Miktarı		