

Biyopolimer Katkılı Geosentetik Kil Örtülerde İçsel Erozyon ile Permittivite Tayini

Hakki Oral Özhan^{1,*}

¹Yeditepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34755, İstanbul.

Özet

Geosentetik kil örtü (GKÖ), düşük hidrolik iletkenliği sayesinde tatlı su rezervuarlarında kaplama malzemesi olarak kullanılabilir. GKÖ üzerinde birikebilecek yüksek seviyedeki su, GKÖ içerisindeki bentonitin geotekstillerin arasından sıyrılarak ani hidrolik iletkenlik artışıyla malzemenin kullanılamaz hale gelmesine neden olabilir. Bu etkileşime içsel erozyon denilmektedir. Bu çalışmada GKÖ'nün bentonit bileşenine sırasıyla ağırlıkça %0.25, 0.5, 1, 2, 5 ve 10 oranlarında kitosan ile Na karboksümetil selüloz biyopolimerleri eklenerek üç eksenli hidrolik iletkenlik deneyleri yapılmıştır. GKÖ içerisinde Na ve Ca içerikli iki farklı bentonit kullanılmış olup içsel erozyonu gözlemleyebilmek için GKÖ'ler, dane boyutu 37.5 mm olan iri daneli yuvarlak çakılların üzerine serilerek yüksek hidrolik yükler altında test edilmişlerdir. Bu koşul, karşılaşılabilecek en kötü senaryolardan birini temsil etmektedir. Deney sonuçlarına göre 10 m'lik hidrolik yük altında test edilen bütün GKÖ'lerde içsel erozyon gözlemlenmiştir. Ayrıca içsel erozyondan hemen önce ölçülen permittivite değerleri karşılaştırılarak kullanılan biyopolimerlerin, GKÖ'lerin hidrolik performansını ne ölçüde değiştirdiği araştırılmıştır. Sonuçlara göre GKÖ'lerdeki bentonite %1 kitosan ve %2 selüloz eklenmesi, GKÖ'lerin permittivitesini 2 mertebeden daha yüksek oranda azaltmıştır. Böylelikle çevre dostu, organik katkı malzemesi olan iki farklı biyopolimerin çevre geotekniği uygulamalarında kaplama malzemesinin hidrolik iletkenliğini azaltmasına bağlı olarak bariyer amaçlı kullanımı teşvik edilebilecektir.

Anahtar Sözcükler

Geosentetik Kil Örtü, İçsel Erozyon, Karboksümetil Selüloz, Kitosan, Permittivite

Determination of Internal Erosion and Permittivity of Biopolymer-Added Geosynthetic Clay Liners

Abstract

Geosynthetic clay liner (GCL) can be used as a lining material in freshwater reservoirs due to its very low hydraulic conductivity. The high amount of water that can be collected on top of a GCL might force the bentonite in the GCL to be extruded out of the geotextiles and as a result, the sudden increase in the hydraulic conductivity might cause the GCL to lose its hydraulic capability. This interaction is defined as internal erosion. In this study, triaxial permeability tests were conducted on chitosan and Na carboxymethyl cellulose-added GCLs. These two biopolymers were added to the bentonite component of the GCLs with a content of 0.25, 0.5, 1, 2, 5 and 10% by dry weight respectively. Na and Ca bentonites were used in the GCLs and the GCLs that were placed over a rounded coarse gravel with a grain size of 37.5 mm, were tested at high hydraulic heads in order to observe internal erosion. This condition represents one of the worst-case scenarios. Test results indicated that all of the GCLs experienced internal erosion at a hydraulic head of 10 m. Furthermore, the permittivity values of the GCLs just before internal erosion, were measured and the effects of the biopolymers on the GCL's hydraulic performance were investigated. According to the test results, 1% chitosan and 2% Na carboxymethyl cellulose addition to the bentonite component of the GCLs resulted in more than 2 orders of magnitude decrease in permittivity. Due to the results of this study, the usage of two different biopolymers that are environmentally friendly organic additives can be encouraged to be used as barriers in geoenvironmental application by decreasing the hydraulic conductivity of the lining material.

Keywords

Carboxymethyl Cellulose, Chitosan, Geosynthetic Clay Liner, Internal Erosion, Permittivity

1. Giriş

Tatlı su rezervuarlarının en yaygın kullanım alanları, endüstriyel ve tarımsal faaliyetler için su biriktirmek ve orman yangınlarını önleyebilmek için helikopterlere su sağlamaktır (Bouazza 2002; Özhan ve Güler 2013). Tatlı su rezervuarlarının suya karşı geçirgenliğini en aza indirmek için geosentetik kil örtü (GKÖ) kullanmak, çok tercih edilen bir yöntemdir (Bouazza 2002). Bu rezervuarlarda toplanan su miktarı genellikle 30 m'yi aşmaz (Özhan ve Güler 2013; Zohary ve Ostrovsky 2010). Yüksek su seviyeleri ise GKÖ üzerine etkiyen hidrolik yükün artmasına sebep olur.

Aşırı hidrolik yüke maruz kalan GKÖ'nün içerisindeki bentonit kili, GKÖ'nün geotekstillerinden dışarı kaçabilir (Hosney 2014). GKÖ'nün içerisindeki bentonitin belli bir miktarın altına düşmesi sonucunda GKÖ'nün hidrolik iletkenliği 3-5 mertebe yükselir ve GKÖ, bariyer özelliğini kaybederek kullanılamaz hale gelir. Bu olaya içsel erozyon denir (Rowe ve Orsini 2003; Shan ve Chen 2003). İçsel erozyonu tetikleyen en önemli etkenlerden biri, GKÖ'nün altında bulunan zeminin dane boyutudur. Dane çapı arttıkça içsel erozyon riski de artmaktadır (Özhan ve Güler 2016; Shan ve Chen 2003). GKÖ'nün serileceği zemin, sivri ve köşeli parçacıklar içeriyorsa GKÖ'nün delinme riskine karşı altına geomembran takviyesi yapılır. Altındaki zeminin yuvarlak ve yassı parçacıklardan oluşması durumunda ise GKÖ, tek başına kullanılabilir (Fox vd. 2000; Özhan ve Güler 2016; Rowe ve Orsini 2003; Shan ve Chen 2003). GKÖ içerisinde, çok düşük hidrolik iletkenliğinden ve yüksek şişme potansiyelinden dolayı Na bentonit daha çok tercih edilmektedir. Yüksek hidrolik yüklere maruz kalındığında GKÖ'deki bentonitin mekanik özellikleri de ön plana çıkabilmektedir. Bazı uygulamalarda ise daha yüksek kayma mukavemetine sahip olduğundan Ca bentoniti de kullanılmaktadır (Gleason vd. 1997; Özhan 2011).

Biyopolimerler, özellikle son yıllarda mühendislik özelliklerini geliştirmek amaçlı, inşaat malzemelerine veya zeminlere katkı bileşeni olarak eklenmektedir ve bu amaca yönelik kullanılan sentetik polimerler ile çimento ve kireç gibi diğer kimyasal katkı malzemelerinin yerini almaktadır. Bu değişimin en büyük sebebi, biyopolimerlerin toksik madde içermemeleri ve bu sayede CO₂ salımını azaltarak çevreyi kirletmemeleridir (Aminpour ve O'Kelly 2015). Biyopolimerler, geoteknik mühendisliği uygulamalarında ise erozyonu engellemeye, zeminlerin taşıma kapasitesini arttırmaya, yeraltı suyunu arıtmaya ve atık toplama sahalarında kullanılan kaplama malzemesinin bariyer özelliklerini geliştirmeye yönelik kullanılmaktadır (Mitchell ve Santamarina 2005).

Biyopolimerlerin geoteknik uygulamalarında en çok tercih edilenlerinden ikisi, kitosan ve selülozdur (Chang ve Cho 2012; Cho ve Chang 2018). Kitosan, denizde yaşayan kabuklu canlıların iskeletlerinde bulunan ucuz sayılabilecek bir biyopolimerdir (Kumar 2000). Zeminlere eklenen kitosanın erozyon riskini düşürdüğü gözlemlenmiştir (Alsanad 2011; Orts vd. 1999). Ayrıca kumlu zeminlerin hidrolik iletkenliğini azalttığı da saptanmıştır (Khachatoorian vd. 2003; Wan vd. 2004). Hataf vd. (2018) yaptıkları deneysel çalışmada düşük plastisiteli kile kitosan katıp sonrasında kum ve ince daneli çakıl ile karıştırmışlardır. Kesme kutusu deney sonuçlarına göre kile kuru ağırlıkça %16 kitosan eklendiğinde kohezyon (c) 10.3'den 30.3 kPa'a, içsel sürtünme açısı (Ø) ise 21.8'den 22.3°'ye yükselmiştir. Başka bir çalışmada bentonit-kaolin-kum karışımına kitosan eklemenin karışımın maksimum kuru birim hacim ağırlığını (V_{dmax}) artırdığı ve hidrolik iletkenliğini (k) azalttığı saptanmıştır (Taytak vd. 2012). Ayrıca zeminlerin hidrolik performansını irdelemek için kitosan katkılı zeminler üzerinde yapılan çeşitli deneylerde zeminlere eklenen kitosan miktarı, kuru ağırlık bakımından %0.06 ile %2 arasında seçilmiştir (Garcia vd. 2020; Reddy vd. 2018; Taytak vd. 2012).

Selüloz ise bitkilerin hücre çeperlerinin esas yapı taşlarından olup kimyasal değişim ile karboksimetil selüloza dönüşebilmektedir. Anyonik yapıda olan karboksimetil selüloz, yüksek viskoziteye sahip bir biyopolimerdir (Di Emidio vd. 2015). Karboksimetil selüloz, Na bentonitine eklenmiş ve karışımın içinden deniz suyu geçirilmiştir. Bentonite kuru ağırlıkça %2 selüloz eklendiğinde hidrolik iletkenlik, 2.93×10^{-7} m/s'den 3.5×10^{-10} m/s'ye düşmüş, %5 selüloz eklendiğinde ise daha da azalarak 9.11×10^{-11} m/s olarak ölçülmüştür (De Camillis vd. 2016). Di Emidio vd. (2015) tarafından yapılan çalışmada ise killi zemine Na karboksimetil selüloz katılmış ve polimer konsantrasyonu arttıkça kilin hem şişme indeksi hem de likit limiti yükselmiştir. Bu çalışmalarda zaman faktörü de değerlendirilerek uzun süreler sonucunda selüloz biyopolimerinin su akışı altında yıkanması veya biyobozunurluğu irdelenmiştir. Di Emidio vd. (2015) 800 günü, De Camillis vd. (2016) ise 100 günü aşkın süreler boyunca hidrolik iletkenliği ölçmüşler ve herhangi bir artış gözlemlenmemişlerdir. Ayrıca selüloz katmak, kilin deniz suyu ve CaCl₂ çözeltilisine karşı hidrolik iletkenliğini azaltmıştır. Başka bir çalışmada karboksimetil selüloz eklemenin su ile temasta olan bentonitin şişme indeksi ile likit limitini artırdığı saptanmıştır (Fan vd. 2020). Aynı bentonitin atık suyu ile temasta olduğunda hidrolik iletkenliği, %6 oranına kadar selüloz eklenmesiyle azalmış, daha fazla selüloz eklenmesiyle sabit kalmış ve %10 oranından daha fazla selüloz katılmasıyla artmıştır. Bu çalışmalarda zemine eklenen karboksimetil selüloz oranı, kuru ağırlık bakımından %2 ile %16 arasında seçilmiştir (De Camillis vd. 2016; Di Emidio vd. 2015; Fan vd. 2020). Biyopolimerlerin yanısıra birçok çalışmada bentonit kiline sentetik polimerler katılmış ve hidrolik iletkenliğin azaldığı gözlemlenmiştir (Güler vd. 2018; Özhan 2018a; 2018b; Scalia vd. 2014; Shen vd. 2016; Tian vd. 2019). Kitosan, karides kabuğunun toz haline getirilmesi sonucu elde edilen kitinin etanol ile kurutulup dehidrasyonunu tamamlaması ve sonrasında deasetilasyon işlemine tabi tutulması ile elde edilmektedir (Reddy vd. 2018). Katyonik bir biyopolimer olan kitosanın negatif iyonları, suda çözüldüğünde serbest kalırken sahip olduğu pozitif iyonları, çevresinde bulunan negatif iyonlu parçacıkları kendine çeker (Lam ve Jefferis 2017). Na karboksimetil selüloz ise bitki hücre çeperlerinin toz haline getirilmesiyle elde edilmiş anyonik yapıda bir biyopolimerdir (Di Emidio vd. 2015). Na karboksimetil selüloz, suda çözüldüğünde sadece negatif iyonlara sahip olup pozitif iyonları serbest kalır. Böylelikle negatif iyonlar, çevreden pozitif iyonlu parçacıkları kendine çeker (Lam ve Jefferis 2017).

Bu çalışmanın amacı, hem Na bentonit hem de Ca bentonit içerikli GKÖ'ye sırasıyla kitosan ve Na karboksimetil selüloz biyopolimerleri katarak GKÖ'nün 37.5 mm dane boyutuna sahip yuvarlak çakıllar üzerine serilmişken yüksek su seviyeleri altında içsel erozyon riskini değerlendirmek ve de eklenen biyopolimerlerin hem içsel erozyon hem de hidrolik iletkenlik üzerinde etkilerini irdelemektir. GKÖ bentonitine sırasıyla kuru ağırlık bakımından % 0.25, 0.5, 1, 2, 5 ve 10 oranlarında biyopolimer eklenmiştir. Bu sayede tatlı su rezervuarlarında bariyer malzemesi olarak kullanılan GKÖ'lerin yeterli hidrolik performansı sağlaması için gereken optimum kitosan ve Na karboksimetil selüloz miktarları da saptanmıştır.

2. Materyal

Çalışmada kullanılan GKÖ'nün geotekstil bileşenleri ile içerisinde kullanılan Na bentonit, CETCO firmasından temin edilmiş olup bu bileşenler, laboratuvar ortamında bir araya getirilerek deneylerde kullanılan GKÖ oluşturulmuştur. Ca bentonit ise Karakaya Bentonit firmasından temin edilmiştir. GKÖ'nün geotekstil bileşenleri, örgülü ve örgüsüz iki geotekstilden oluşmaktadır. Örgülü geotekstil, polipropilenden üretilmiş olup 108 g/m² birim alana düşen kütleye, 0.425 mm gözenek açıklığına, 0.4 mm kalınlığa ve 12.2 kN/m çekme dayanımına sahip olup iğneleme yöntemi ile üretilen polipropilen örgüsüz geotekstilin birim alana düşen kütlesi, gözenek açıklığı, kalınlığı ve çekme dayanımı sırasıyla 203 g/m², 0.212 mm, 2 mm ve 15.4 kN/m'dir.

GKÖ'nün içerisinde iki farklı bentonit kullanılmıştır. Granül halde kullanılan Na bentonit ile toz halindeki Ca bentonitin bazı mühendislik özellikleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1: GKÖ içerisinde kullanılan Na bentoniti ile Ca bentonitin mühendislik özellikleri

	Ca bentonit	Na bentonit
Ağırlıkça montmorillonit içeriği	85%	92%
Şişme indisi	20 ml/2g	28 ml/2g
Likit limit	141%	344%
Plastik limit	41%	36%
Özgül ağırlık	2.66	2.68

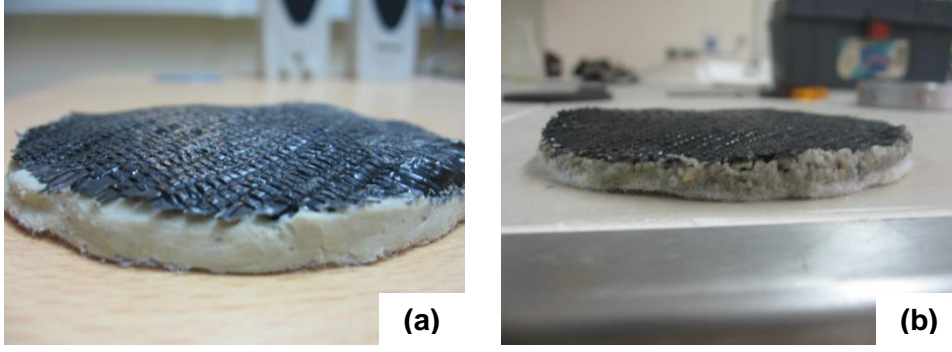
Çalışmada GKÖ'nün bentonit bileşenine eklenen kitosan, Fengchen Group Co. firmasından temin edilmiş olup toz halinde ve suda çözünebilen yapıdadır. Kitosanın kimyasal formülü ve molekül ağırlığı, sırasıyla (C₆H₁₁NO₄)_n ve ortalama 120000 g/mol'dür. GKÖ'nün bentonit bileşenine katılan Na karboksimetil selüloz ise Alfasol firmasından temin edilmiş olup toz halinde, suda çözünen, [C₆H₇O₂(OH)₂CH₂COONa]_n kimyasal formülüne ve ortalama 90000 g/mol molekül ağırlığına sahip bir biyopolimerdir.

3. Yöntem

Kitosan katkılı bentonit hazırlamak için öncelikle kitosan-bentonit karışımında kuru ağırlıkça seçilen miktar (% 0.25, 0.5, 1, 2, 5 ve 10) kadar kitosan, asidik bir çözelti olan hidroklorik (HCl) asit içerisinde 24 saat boyunca oda sıcaklığında çözülmeye bırakılmış ve sonrasında mikser ile karıştırılarak çözünmeyen parçacıklar da çözeltiden ayrıştırılmıştır. Karışımda kullanılacak kuru bentonitin ilk önce saf suyun içerisinde şişmesi sağlanmış, sonrasında kitosan çözeltisine eklenerek karışım, mikser ile tekrardan karıştırılmıştır. Kitosan-bentonit karışımındaki katı partiküller, saf su ile filtre kağıdından geçirilmiş, sonrasında da yıkanarak HCl asitin ayrışması sağlanmıştır. Son olarak da karışım, etüvde 24 saat boyunca 105°C'de kurutulup 200 no'lu (0.074 mm açıklıklı) elekten geçirilerek GKÖ'de kullanılacak hale getirilmiştir (Fan vd. 2020).

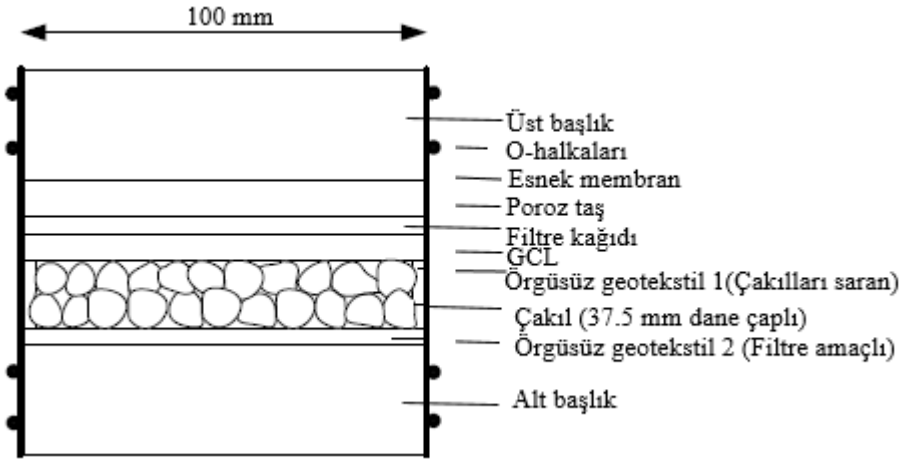
Benzer şekilde Na karboksimetil selüloz katkılı bentonit hazırlamak için selüloz-bentonit karışımında kuru ağırlıkça seçilen miktar (% 0.25, 0.5, 1, 2, 5 ve 10) kadar selüloz, ısıtıcılı haznelerin içinde saf suya katılıp 60°C'de sabit tutularak yaklaşık 30 dakika boyunca mikser ile karıştırılmıştır. Sonrasında, karışımın selüloz oranını sağlayacak miktarda kullanılacak bentonit de saf sudaki selüloza eklenmiş ve benzer şekilde karışım, 60°C saf suda mikser ile yaklaşık 30 dakika karıştırılmıştır. Son olarak karışım, etüvde 105°C'de 24 saat bekletilerek kuru selüloz-bentonit karışımının elde edilmesi sağlanmıştır. Kuru karışım partikülleri, 200 no'lu (0.074 mm açıklıklı) elekten geçirilerek GKÖ'de kullanılacak hale getirilmiştir (Di Emidio vd. 2015).

GKÖ'ler, iğnelenmeden laboratuvar ortamında hazırlanmışlardır. Geotekstiller, 100 mm çapa sahip olacak şekilde kesilmiş, sonrasında biyopolimer-bentonit karışımları örgüsüz geotekstilin üzerine konulmuştur. Karışımların, musluk suyu ile homojen bir biçimde ıslatılarak geotekstillere tutunmaları sağlanmıştır. Örgülü geotekstilin ıslak karışımların üzerine yerleştirilmesiyle GKÖ numunesi hazırlama işlemi tamamlanmıştır (Özhan 2011). Şekil 1a'da hazırlanmış Ca bentonitli GKÖ, Şekil 1b'de ise Na bentonitli GKÖ gösterilmiştir. Hidrolik iletkenlik deneylerine başlamadan önce GKÖ'ler, ön ıslatmaya tabi tutulmuşlardır. Suda bekletildikten sonra GKÖ'lerin su içeriği %120 olarak ölçülmüştür. İçerisinden geçirilecek sıvının yüksek molariteye sahip asidik çözeltiler olmadığı sürece düşük hidrolik iletkenlik sağlayabilmek için ön ıslatma sonrasında GKÖ su içeriğinin en az %100 olması beklenmektedir (Katsumi vd. 2004; 2008). Bu değer dikkate alındığında GKÖ'deki %120 su içeriğinin deneye başlamadan yeterli olduğu görülmektedir.



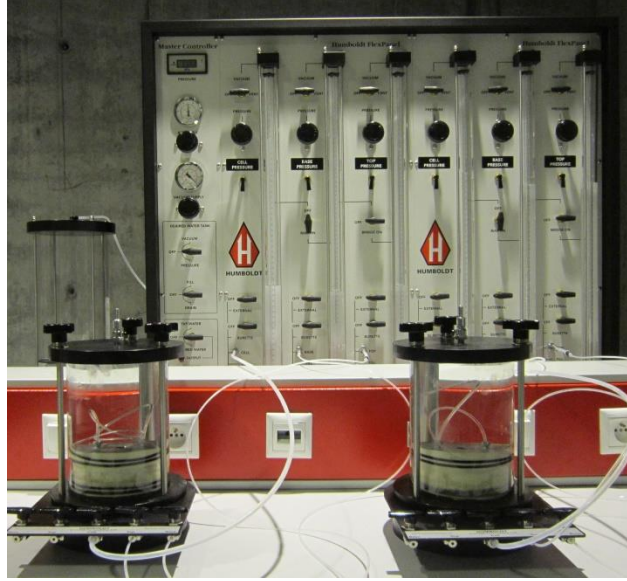
Şekil 1: (a): Ca bentonitli GKÖ; (b) Na bentonitli GKÖ

Üç eksenli esnek duvarlı permeabilite hücresine yerleştirilen GKÖ, 37.5 mm dane çapına sahip olan yuvarlak çakılların üzerine serilmiştir. GKÖ'nün örgülü geotekstil bileşeni, alttaki çakıllar ile temas halinde olup permeabilite hücresi içerisinde yer alan GKÖ ile çakılların konumları, Şekil 2'de gösterilmiştir. Yukarıdan aşağıya üst başlık, poroz taş, filtre kağıdı, GKÖ numunesi, çakıl alt zemin, filtre amaçlı kullanılan örgüsüz geotekstil 2 ve alt başlık yer almaktadır. Bütün bu bileşenlerin çevresi esnek lateks membran ile sarılmıştır. İçsel erozyon olurken bentonit parçacıkları, GKÖ'den ayrışıp filtre kağıdının üzerinde birikebilir ve tıkanma oluşturabilir. Çakılların altında filtre kağıdı yerine örgüsüz geotekstil (gözenek açıklığı 0.08 mm) kullanılmasının sebebi, GKÖ içerisindeki su akışında oluşabilecek tıkanmaların önüne geçilmesidir (Özhan 2011). Ayrıca GKÖ'ye etkiyen hidrolik yük arttıkça çakılların esnek membranı delebilmesi veya çakıllar ile membran arasında açıklık oluşması sonucunda düzeneğin yanlarından su sızıntısı olması mümkündür. Bu yüzden çakılların çevresi, başka bir örgüsüz geotekstil (örgüsüz geotekstil 1) ile sarılmıştır. Örgüsüz geotekstil 1'in çekme dayanımı 32 kN/m, birim alana düşen kütlesi 500 g/m² ve kalınlığı 3.6 mm'dir. (Özhan 2011). Basınç panellerine bağlanmış permeabilite hücreleri ile bu hücrelerin içerisine yerleştirilmiş ve lateks membran ile sarılmış deney düzeneği Şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 2: Üç eksenli permeabilite hücresi içerisindeki GKÖ numunesi

Permeabilite hücresi, musluk suyu ile doldurulduktan sonra önce GKÖ'nün suya doyurulması ve konsolidasyonu sağlanmış sonrasında da sabit seviyeli üç eksenli hidrolik iletkenlik deneyi kapsamında yukarıdan aşağıya su akışını sağlamak için hücre basıncı 550 kPa'da, çıkış basıncı 515 kPa'da sabit tutularak giriş basıncı 515'den 530 kPa'a yükseltilmiştir (ASTM D5887 2009). Su akışı sabitlendikten sonra GKÖ üzerine etkiyen hidrolik yük 5 m'ye yükseltilmiştir. 5 m'lik hidrolik yük, çıkış basıncını 481 kPa'a düşürerek sağlanmıştır. Bu değer, 12 gün boyunca sabit şekilde GKÖ üzerinde etkimıştır. Bu sürenin 12 gün seçilmesinin sebebi, belirlenen koşullarda içsel erozyonun önceki çalışmalara dayanarak yaklaşık 12 gün içerisinde başlamış olmasıdır (Özhan 2011; Özhan ve Güler 2013; 2016). Sonrasında içsel erozyonu gözlemleyebilmek için hidrolik yük, 5'er m'lik artışlarla benzer şekilde GKÖ üzerinde uygulanmıştır (Özhan 2011). 10 m'lik hidrolik yük, çıkış basıncının 431.9 kPa'a düşürülmesiyle elde edilmiş olup bu değer etkisinde test edilen bütün GKÖ'ler içsel erozyona uğramıştır.



Şekil 3: Basınç panellerine bağlanmış permeabilite hücreleri

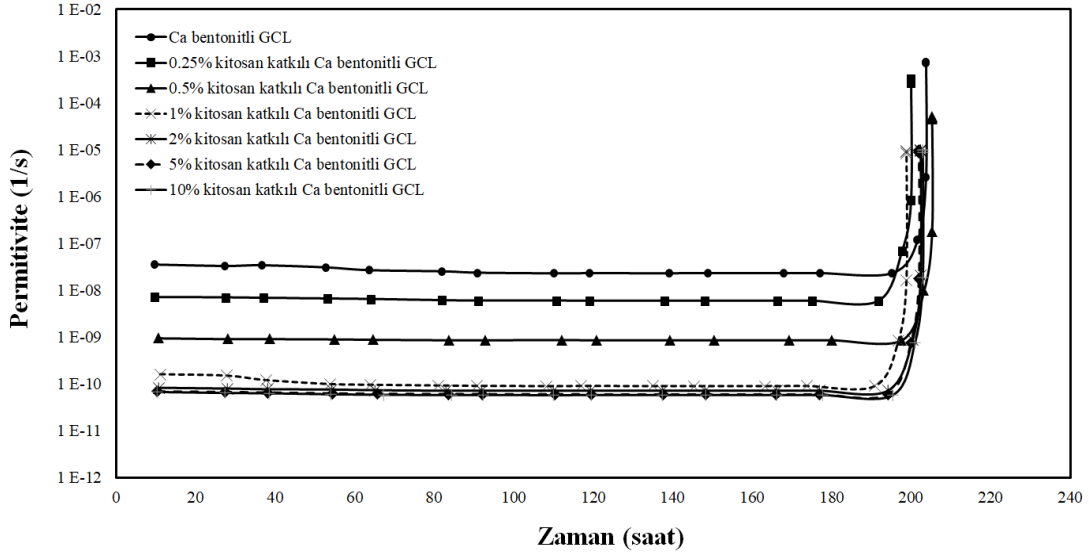
GKÖ içerisinde geçen su akışının sabitlenmesinden deney sonuna kadar GKÖ'lerin permitivite değerleri (ψ) Denklem 1 kullanılarak hesaplanmıştır (ASTM D5887 2009). GKÖ'lerde içsel erozyon gözlemlenip permitivite 4-5 merteye yükseldikten sonra deneyler sonlandırılmıştır. Denklem 1'de ϕ (1/s), GKÖ'nün permitivitesi, ΔQ (cm^3), ölçülen zaman aralığında GKÖ'ye giren ve çıkan su miktarının hacimsel ortalaması, Δh (cm), GKÖ üzerine etki eden hidrolik yük (GKÖ üzerindeki su seviyesi), Δt (s), GKÖ içerisinde geçen su miktarının ölçüldüğü zaman aralığı, A (cm^2) ise GKÖ içerisinde su akışının sağlandığı yüzey alanıdır (ASTM D5887 2009).

$$\phi = \frac{\Delta Q}{\Delta h \cdot \Delta t \cdot A} \quad (1)$$

Örneğin polimer katkısız Ca bentonitli GKÖ üzerinde yapılan üç eksenli hidrolik iletkenlik deneyi verilerine göre permitivite (ψ), 64700 s'lik zaman aralığında (Δt) GKÖ içerisinde geçen su miktarının (ΔQ) 118.94 cm^3 ölçülmesi sonucunda Denklem 1 kullanılarak hesaplanmıştır. Bu denklemde GKÖ üzerine etkiyen hidrolik yük (Δh), 1000 cm ve GKÖ yüzey alanı, 10 cm çapa sahip dairesel kesitin alanı olan 78.5 cm^2 olarak alınmıştır. Denklem 1 ile bu değerler kullanılarak polimer katkısız Ca bentonitli GKÖ'nün permitivitesi (ψ), 2.34×10^{-8} 1/s hesaplanmıştır.

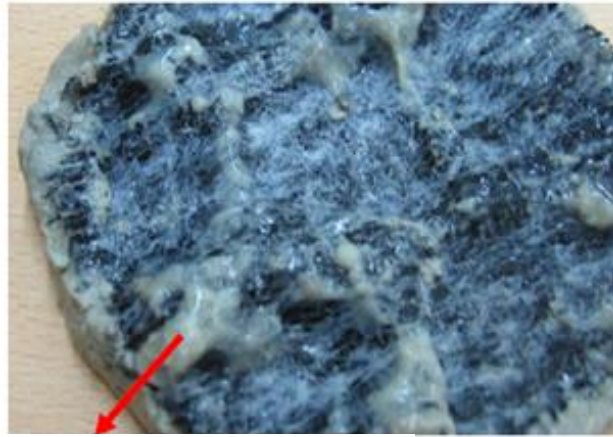
4. Bulgular ve Tartışma

Üç eksenli hidrolik iletkenlik deneylerine maruz bırakılan biyopolimer katkısız ve katkılı bütün GKÖ'ler, üzerlerine etkiyen su seviyesi 10 m'ye ulaştığında içsel erozyona uğramışlardır. Biyopolimer türü farketmeksizin test edilen GKÖ'ler, etkiyen hidrolik yük altında 12 günden önce ani permitivite artışı göstermişler ve sonuçta 4-5 merteye yükselen permitivite değerleriyle içsel erozyon etkisinde bariyer malzemesi olarak kullanılabilirliklerini kaybetmişlerdir. Örneğin Şekil 4'de gösterilen kitosan katkılı Ca bentonitli GKÖ'lerin tamamı 10 m'lik hidrolik yük altında yaklaşık 8 gün sonra permitivite artışı göstermeye başlamışlardır. GKÖ'ler, önce 4-6 saat içerisinde yaklaşık 1 mertebelik permitivite artışından sonra 3-4 saat içerisinde toplamda 4-5 mertebelik artış ile bariyer özelliklerini neredeyse tamamen kaybetmişlerdir. Kitosan katkısız GKÖ'nün permitivitesi, içsel erozyona uğramadan hemen önce 2.34×10^{-8} 1/s iken deney sonunda 7.50×10^{-4} 1/s'ye yükselmiştir. Benzer şekilde %1 ve 2 kitosan katkılı GKÖ'lerin permitivite, sırasıyla 9.11×10^{-11} 'den 9.34×10^{-6} 1/s'ye ve 7.23×10^{-11} 'den 9.99×10^{-6} 1/s'ye yükselmiştir. Diğer kitosan katkılı GKÖ'lerde de çok benzer sonuçlar gözlemlenmiştir.



Şekil 4. Kitosan katkılı Ca bentonitli GKÖ'lerin 10 m hidrolik yük altında permittivite-zaman değişimleri

Kitosan katkılı Na bentonitli GKÖ'ler ile Na karboksümetil selüloz katkılı hem Ca hem de Na bentonitli GKÖ'lerde de 10 m'lik su seviyesi altında içsel erozyon gözlemlenmiştir. Bu sonuçlara göre kitosan ve Na karboksümetil selüloz biyopolimerlerinin, GKÖ'nün içsel erozyonu üzerinde önemli bir etkisi olmamıştır. Fakat deney koşulları, uygulamada oluşabilecek en kötü şartlar göz önüne alınarak belirlenmiştir. GKÖ'lerin altında bulunan zemin, oldukça büyük dane boyutuna sahip (37.5 mm dane çaplı) kaba daneli yuvarlak çakıllardan oluşmaktadır. Bu özelliklere sahip zeminler üzerinde GKÖ kullanıldığında, yüksek hidrolik yükler altında içsel erozyon oluşma olasılığı oldukça fazladır (Özhan ve Güler 2013; 2016; Rowe ve Orsini 2003). 10 m'lik su seviyesi altında yüksek efektif basınca maruz kalan GKÖ'ler, altta bulunan kaba daneli çakılların arasındaki boşluklara doğru bastırılmış olup alttaki geotekstil yüzeyinde oluşan deformasyonlar sonucunda GKÖ içerisindeki bentonit, çakıl ile temasta bulunan örgülü geotekstilin boşluklu bölgelerinden dışarı kaçmaya başlamıştır. Zaman ilerledikçe bu kaçış, çok fazla miktarda olmuş ve ani permittivite artışıyla içsel erozyon gerçekleşmiştir. Sonuçta da GKÖ, kullanılamaz hale gelmiştir. Şekil 5'de içsel erozyona uğramış Na bentonitli GKÖ gösterilmektedir.



İçsel erozyon sonucunda GKÖ'den bentonit çıkışı

Şekil 5. İçsel erozyona uğramış Na bentonitli GKÖ

GKÖ'lerde gözlemlenen içsel erozyonun en önemli nedenleri, GKÖ üzerine etkiyen su seviyesinin (hidrolik yük) yüksek olması, GKÖ'nün serildiği zeminin kaba daneli olup daneler arası boşlukların fazla olması ve alttaki zemine temas eden GKÖ'nün geotekstil bileşeninin çekme dayanımının düşük olmasıdır (Fox vd. 2000; Özhan ve Güler 2013; 2016; Rowe ve Orsini 2003). Yapılan çalışmada da bu koşullar değerlendirilerek yüksek hidrolik yük (10 m) altında dane boyutu büyük (37.5 mm) çakıl üzerine serilen GKÖ, oluşabilecek en kötü şartları temsil ederek içsel erozyona zorlanmıştır.

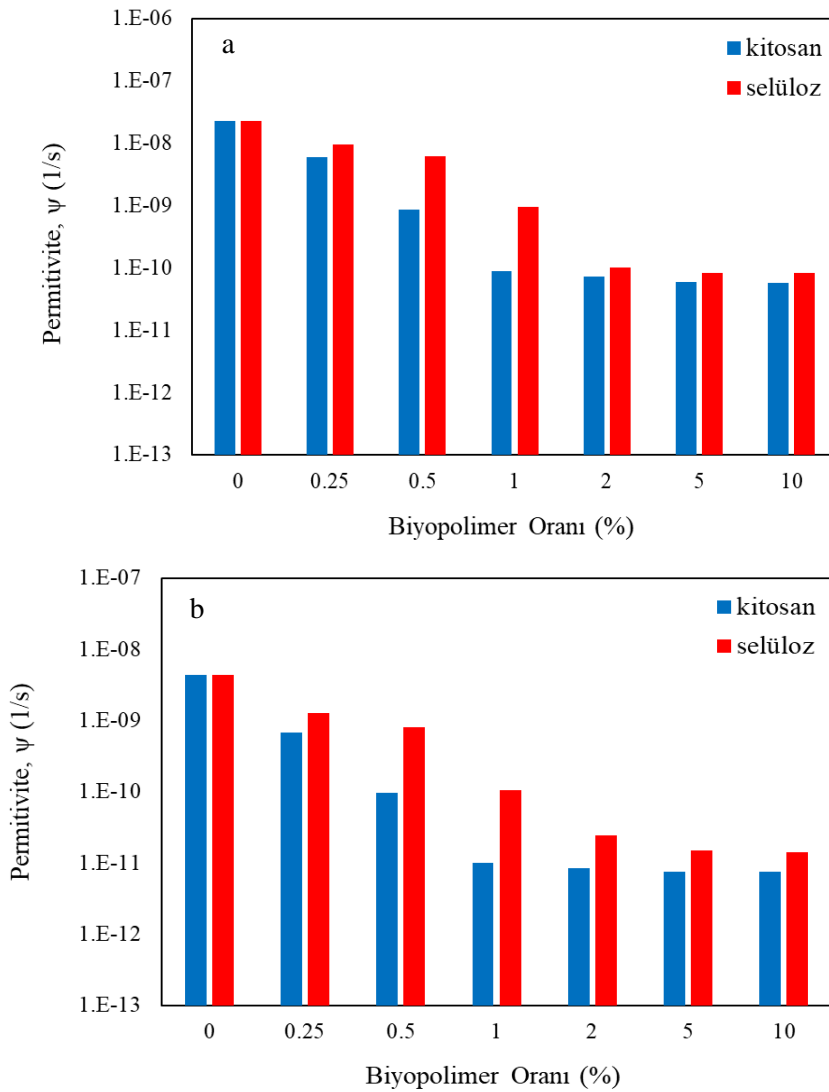
Sonuçlara göre ayrıca GKÖ içerisindeki bentonit türünün (Na veya Ca), içsel erozyona önemli bir etkisi olmadığı saptanmıştır. Ek olarak GKÖ içerisindeki bentonite mühendislik özelliklerini artırıcı katkı malzemesi (kitosan veya Na karboksümetil selüloz) eklemenin hidrolik iletkenliği azaltsa da içsel erozyonu önlemeye yönelik katkı vermediği sonucuna ulaşılmıştır. Deney sonuçlarına göre içsel erozyonun gerçekleşmesi, GKÖ içerisinde su ile etkileşime girip bariyer özelliği kazanan bentonit ve ona eklenen biyopolimer ile sağlanan kimyasal etkileşimle ilintili olmayıp özellikle GKÖ'nün geotekstil bileşenlerinin mekanik özellikleri ve GKÖ'nün temasta bulunduğu zeminin dane boyutuna bağlıdır. Üç eksenli hidrolik iletkenlik deneyleri sonucunda 10 m'lik su seviyesi altında içsel erozyon gerçekleşmeden hemen önce ölçülen GKÖ'lerin permitivite değerleri (ψ), Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Ca ve Na katkılı GKÖ'lerin 10 m hidrolik yük altında ölçülen permitivite değerleri

GKÖ numunesi		10 m hidrolik yük altında gerçekleşen içsel erozyondan önce GKÖ'lerde ölçülen permitivite (1/s)
Ca bentonitli GKÖ	Biyopolimer katkısız	2.34×10^{-8}
	0.25% kitosan katkılı	6.03×10^{-9}
	0.5% kitosan katkılı	8.64×10^{-10}
	1% kitosan katkılı	9.11×10^{-11}
	2% kitosan katkılı	7.23×10^{-11}
	5% kitosan katkılı	6.04×10^{-11}
	10% kitosan katkılı	5.83×10^{-11}
	0.25% selüloz katkılı	9.72×10^{-9}
	0.5% selüloz katkılı	6.19×10^{-9}
	1% selüloz katkılı	9.73×10^{-10}
	2% selüloz katkılı	1.04×10^{-10}
	5% selüloz katkılı	8.45×10^{-11}
	10% selüloz katkılı	8.35×10^{-11}
	Na bentonitli GKÖ	Biyopolimer katkısız
0.25% kitosan katkılı		6.86×10^{-10}
0.5% kitosan katkılı		9.89×10^{-11}
1% kitosan katkılı		1.02×10^{-11}
2% kitosan katkılı		8.61×10^{-12}
5% kitosan katkılı		7.72×10^{-12}
10% kitosan katkılı		7.65×10^{-12}
0.25% selüloz katkılı		1.31×10^{-9}
0.5% selüloz katkılı		8.06×10^{-10}
1% selüloz katkılı		1.06×10^{-10}
2% selüloz katkılı		2.49×10^{-11}
5% selüloz katkılı		1.54×10^{-11}
10% selüloz katkılı		1.44×10^{-11}

Şekil 6'da hem Ca bentonitli hem de Na bentonitli GKÖ'lerin içsel erozyondan hemen önce ölçülen permitivite dağılımları gösterilmektedir. GKÖ'ye katılan kitosan ile Na karboksümetil selüloz miktarının hidrolik iletkenlik üzerindeki etkisi irdelenmiştir. Her iki bentonit kullanımı için biyopolimer miktarları belli bir değere kadar artırıldıkça permitivitede önemli oranda azalma gözlemlenmiştir. GKÖ içerisindeki bentonite kuru ağırlık bakımından %1 kitosan ile %2 Na karboksümetil selüloz ekledikten sonra daha fazla biyopolimer eklemenin neredeyse hiçbir katkısı olmamıştır.

Şekil 6'da da görüldüğü üzere hem Ca bentonitli hem de Na bentonitli GKÖ'nün bentonit bileşenine kuru ağırlıkça %1 oranında kitosan ve %2 oranında Na karboksimetil selüloz katmak, permittiviteyi yeterli ölçüde, yaklaşık 2.5 merteye düşürmüştür. Örneğin Ca bentonitli GKÖ'nün 10 m'lik su seviyesi altında permittivitesi 2.34×10^{-8} 1/s ölçülmüşken %0.25 kitosan eklendiğinde 6.03×10^{-9} , 1 ve 10% kitosan eklendiğinde ise 9.11×10^{-11} ve 5.83×10^{-11} 1/s'ye düşmüştür. Aynı GKÖ'ye 0.25, 1, 2 ve 10% Na karboksimetil selüloz eklendiğinde ise permittivite değerleri sırasıyla 9.72×10^{-9} , 9.73×10^{-10} , 1.04×10^{-10} ve 8.35×10^{-11} 1/s olmuştur (Şekil 6a). Benzer bir dağılım, Şekil 6b'de görüldüğü gibi Na bentonitli GKÖ'ler için de geçerlidir. Permittivitenin, GKÖ'ye belli bir miktar biyopolimer eklenmesine kadar önemli oranda azalması, su ile etkileşime giren kitosan ve selülozun hidrojel özellik kazanması sonucu GKÖ'deki bentonitin içerisindeki boşlukları örtmesine bağlıdır. Boşluklar yeteri derecede kapandığından dolayı bu oranlardan (kuru ağırlıkça %1 kitosan ve %2 Na karboksimetil selüloz) daha fazla biyopolimer eklemenin, hidrolik iletkenlik üzerinde neredeyse hiç etkisi olmamıştır. Polimerler, bentonit ile aralarında oluşan kimyasal etkileşim sonucunda bentonitin yüzeyine, üzerlerindeki iyonları bırakarak viskoz bir membran oluşmasına neden olurlar. Bu membranın daha fazla polimer eklenmesi sonucu genişlemesi, aradaki boşlukların daha fazla kapanmasına sebep olmuştur (Lam ve Jefferis 2014; Tian vd. 2019). Bentonite eklenen kitosan ve selüloz miktarı arttıkça polimer bağlarına absorbe olan su molekülleri de artmaktadır. Sonuç olarak kitosan veya selüloz ile su arasındaki güçlü etkileşim, GKÖ içerisinde geçiren sıvının kayma direncini artırmakta ve bu artış da polimer eklenmesine bağlı olarak sıvının viskozitesinde de yükselmeye sebep olmaktadır (Geng vd. 2016).



Şekil 6. 10 m hidrolik yük altında ve içsel erozyondan hemen önce (a): Ca bentonitli GKÖ'nün; (b) Na bentonitli GKÖ'nün permittivite değişiminde kitosan ve Na karboksimetil selüloz etkisi

Şekil 6'da görüldüğü üzere GKÖ'ye kitosan eklenmesi, Na karboksimetil selüloz eklenmesine kıyasla çok az bir miktar daha fazla permittiviteyi azaltmıştır. Ayrıca 10 m su seviyesi altında içsel erozyondan hemen önce ölçülen permittivite değerlerine göre Ca bentonitli GKÖ'lerin permittivite değerleri, Na bentonitlilerininkine kıyasla daha yüksek ölçülmüştür.

Tablo 2’de görüldüğü üzere kitosan katkılı GKÖ’lerde bu fark, 1 mertebeye yakın (0.8-0.9 mertebe) iken Na karboksümetil selüloz katkılı GKÖ’lerde ise 0.5-0.9 mertebe arasında kalmıştır. Biyopolimer katkılı Ca bentonitli GKÖ’lerin Na bentonitlilerden daha yüksek permitiviteye sahip olması, önceki çalışmalar göz önüne alındığında polimer katkısız Ca bentonitin kimyasal yapısına bağlı olarak Na bentonite kıyasla hem hidrolik iletkenliğinin daha yüksek hem de şişme indeksinin daha düşük olmasından dolayıdır (Gleason vd. 1997; Özhan ve Güler 2016).

5. Sonuç ve Öneriler

- GKÖ’lere kitosan veya Na karboksümetil selüloz biyopolimerleri eklemenin içsel erozyonu engelleme adına önemli bir katkısı gözlemlenmemiştir. 37.5 mm dane çapına sahip yuvarlak çakıllar üzerine serilmiş hem Ca hem de Na bentonitli GKÖ’ler, 10 m’lik hidrolik yük altında içsel erozyona uğramışlardır. GKÖ’lerin permitiviteleri (ψ), içsel erozyon esnasında 4-5 mertebe artış göstermişlerdir.
- GKÖ’lere %1 oranında kitosan ve %2 oranında Na karboksümetil selüloz eklemek, içsel erozyondan hemen önce ölçülen permitiviteleri (ψ) yaklaşık 2.5 mertebe azaltmıştır. Daha fazla biyopolimer eklenmesi, permitivite değerlerini neredeyse hiç değiştirmemiştir. %1 kitosan katkılı Ca bentonitli GKÖ’nün permitivitesi 9.11×10^{-11} 1/s iken %2 Na karboksümetil selüloz katkılı Ca bentonitli GKÖ’nünki 1.04×10^{-10} 1/s olarak ölçülmüştür.
- Kitosan katkılı GKÖ’lerde ölçülen permitivite, Na karboksümetil selüloz katkılı GKÖ’lere kıyasla çok az bir miktar daha düşük çıkmıştır.
- Ca bentonitli GKÖ’lerin permitivitesi, Na bentonitli GKÖ’lerden hem biyopolimerli hem de biyopolimersiz koşullarda yaklaşık 1 mertebeye kadar daha yüksek ölçülmüştür.
- Deneysel sonuçları değerlendirildiğinde bariyer malzemesi olarak kullanılabilen GKÖ’nün yanısıra farklı çevre geotekniği uygulamalarında da zemine katılan çimento, kireç, uçucu kül veya sentetik polimer gibi zemin iyileştirici malzemelerin yerine karbon ayak izini düşük tutarak çevreye katkı sunan kitosan ile Na karboksümetil selüloz biyopolimerlerinin zemin katkı malzemesi olarak kullanımının teşvik edilmesi sağlanabilecektir.

Bu sonuçlara göre kitosan ve Na karboksümetil selüloz biyopolimerlerinin içsel erozyonu önlemeye fazla bir katkısı olmasa da yapılan deneylerde GKÖ altında kullanılan zeminin olabileceği en kötü şartlardan birini yansıttığı bir gerçektir. Sahada karşılaşılabilecek koşullar, büyük oranda daha güvenli olacağından hem kitosanın hem de Na karboksümetil selüloz GKÖ’nün hidrolik iletkenliğini azaltması önemli bir avantaj olarak değerlendirilmelidir. Bu iki biyopolimer de hem çevre dostu olması hem de tatlı su rezervuarlarında kullanılan GKÖ’lerin bariyer performansını yükseltmesi bakımından GKÖ’lerin bentonit bileşeninde kullanılacak doğal katkı malzemeleridir.

Önceki bir çalışmada selüloz katkılı bentonit üzerinde 800 gün aşkın sürelerde hidrolik iletkenlik testleri yapılmış ve hidrolik iletkenliğin artış göstermediği saptanmış olsa da (Di Emidio vd. 2015), kitosanın uzun süreli hidrolik iletkenlik deneyleri yapılmamıştır. Biyopolimerlerin uzun süreli kullanımlarında biyobozunurluğun değerlendirilmesi ve GKÖ’nün hidrolik iletkenlik değişiminin gözlemlenmesi için bir sonraki aşamada kitosan ve Na karboksümetil selüloz katkılı GKÖ üzerinde çok daha uzun sürecek (yaklaşık 900-1000 gün) hidrolik iletkenlik deneyleri yapılmalı ve elde edilecek deney sonuçları, bu çalışmanın sonuçlarıyla karşılaştırılmalıdır.

Kaynaklar

- Alsanad A., (2011), *Novel biopolymer treatment for wind induced soil erosion*, Doktora Tezi, Arizona State University, USA.
- Aminpour M., O’Kelly B.C., (2015), *Applications of biopolymers in dam construction and operation activities*, Proceedings of the Second International Dam World Conference (DW2015), LNEC, (Pina C., Portela E., Caldeira L., Batista A., Dias I., Santos R., Ed.), 21-24 April, Lisbon, Portugal, ss. 937-946.
- ASTM D5887, (2009), *Standard test method for measurement of index flux through saturated geosynthetic clay liner specimens using a flexible-wall permeameter*, ASTM International, West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/D5887_D5887M-22.
- Bouazza A., (2002). *Geosynthetic clay liners*, Geotextiles and Geomembranes, 20 (2002), 3-17.
- Chang, I., Cho, G.C. 2012. *Strengthening of Korean Residual Soil with β -1, 3/1, 6-Glucan Biopolymer*, Construction and Building Materials, 30, 30–35.
- Cho, G.C., ve Chang, I. (2018). *Cementless Soil Stabilizer – Biopolymer*, The 2018 World Conference on Advances in Civil, Environmental & Materials Research (ACEM18), 27 - 31 August, Songdo Convensia, Incheon, Korea.
- De Camillis M., Di Emidio G., Bezuijen A., Verastegui-Flores R.D., (2016). *Hydraulic conductivity and swelling ability of a polymer modified bentonite subjected to wet-dry cycles in seawater*, Geotextiles and Geomembranes, 44(5), 739-747.
- Di Emidio G., Mazzieri F., Verastegui-Flores R.D., Van Impe W., Bezuijen A., (2015), *Polymer-treated bentonite clay for chemical-resistant geosynthetic clay liners*, Geosynthetics International, 22(1), 125-137.
- Fan R.D., Reddy K.R., Yang Y.L., Du Y.J., (2020), *Index properties, hydraulic conductivity and contaminant-compatibility of CMC-treated sodium activated calcium bentonite*, International Journal of Environmental Research and Public Health, 17(1863), 1-18.
- Fox P.J., De Battista D.J., Mast D.G., (2000), *Hydraulic performance of geosynthetic clay liners under gravel cover soils*, Geotextiles and Geomembranes, 18(2-4), 179–201.
- García M.A., Rodríguez M., Castro C., de la Paz N., (2020), *Water vapor permeability of chitosan/zeolite composite films as affected by biopolymer and zeolite microparticle concentrations*, Journal of Packaging Technology and Research, 4(2), 157-169.
- Geng W., Likos W.J., Benson C.H., (2016), *Viscosity of polymer-modified bentonite as a hydraulic performance index*, Geo-Chicago 2016, GSP 271, ss.498–507.

- Gleason M.H., Daniel D.H., Eykholt G.R., (1997), *Calcium and sodium bentonite for hydraulic containment applications*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 123(5), 438–445.
- Güler E., Özhan H.O., Karaoğlu S., (2018), *Hydraulic performance of anionic polymer-treated bentonite-granular soil mixtures*, Applied Clay Science, 157, 139–147.
- Hataf N., Ghadir P., Ranjbar N., (2018), *Investigation of soil stabilization using chitosan biopolymer*, Journal of Cleaner Production, 170, 1493-1500.
- Hosney M.S.H., (2014), *Performance of geosynthetic clay liners in cover, subsurface barrier and basal liner applications*, Doktora Tezi, Queen's University, Ontario, Canada.
- Katsumi T., Ishimori H., Ogawa A., Maruyama S., Fukagawa R., (2008), *Effects of water content distribution on hydraulic conductivity of prehydrated GCLs against calcium chloride solutions*, Soils and Foundations, 48(3), 407-417.
- Katsumi T., Ogawa A., Fukagawa R., (2004), *Effects of prehydration on hydraulic performance of geosynthetic clay liners permeated with inorganic chemical solutions*, Proceedings of Asian 4th Regional Conference on Geosynthetics (GeoAsia 2004), 21-23 June, Seoul, South Korea, ss.937-944.
- Khachatoorian R., Petrisor I.G., Kwan C.C., Yen T.F., (2003), *Biopolymer plugging effect: laboratory-pressurized pumping flow studies*, Journal of Petroleum Science and Engineering, 38, 13-21.
- Kumar M.N.R., (2000), *A review of chitin and chitosan applications*, Reactive and Functional Polymers, 46(1), 1-27.
- Lam C., Jefferis S.A., (2014), *The use of polymer solutions for deep excavations: Lessons from far eastern experience*, HKIE Transactions, 21(4), 262–271.
- Lam C., Jefferis S.A., (2017), *Polymer support fluids in civil engineering*, ICE Publishing, London, 312ss.
- Mitchell J.K., Santamarina J.C., (2005), *Biological considerations in geotechnical engineering*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 131(10), 1222–1233.
- Orts W.J., Sojka R.E., Glenn G.M., Gross R.A., (1999), *Preventing soil erosion with polymer additives*, Polymer News, 24(12), 406-413.
- Özhan H.O., (2011), *Internal erosion of geosynthetic clay liners under high hydraulic heads*, PhD Thesis, Bogazici University, Istanbul, Turkey.
- Özhan H.O., Güler E., (2013), *Use of perforated base pedestal to simulate the gravel subbase in evaluating the internal erosion of geosynthetic clay liners*, Geotechnical Testing Journal, 36(3), 418–428.
- Özhan H.O., Güler E., (2016), *Factors affecting failure by internal erosion of geosynthetic clay liners used in fresh water reservoirs*, Environmental & Engineering Geoscience, 22(2), 157-169.
- Özhan H.O., (2018a), *Effects of temperature increase in 0.5 M MGKÖ2 solution on hydraulic capability of anionic polymer-treated geosynthetic clay liners used as barriers*, Journal of Environmental Engineering, 144(10), doi:10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001451.
- Özhan H.O., (2018b), *Katyonik polimer katkılı geosentetik kil örtülerin farklı tuz çözeltileri ile etkileşimi*, Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 4(2), 171-181.
- Reddy D.V.S.S., Kowshik K., Kishor M.J., Chittaranajan M., Sravani E., (2018), *Investigation of chitosan bio-polymer effect on the geotechnical properties of an expansive soil*, Proceedings of International Conference on Recent Trends in Engineering Materials, Management and Sciences, ICRTEMMS-2018, 25-27 October, ss.1-7.
- Rowe R.K., Orsini C., (2003), *Effect of GKÖ and subgrade type on internal erosion in GKÖs under high gradients*, Geotextiles and Geomembranes, 21(2003), 1–24.
- 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*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 140(3) 04013025. doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001040.
- Shan H.Y., Chen R.H., (2003), *Effect of gravel subgrade on hydraulic performance of geosynthetic clay liner*, Geotextiles and Geomembranes, 21(6), 339–354.
- Shen S.Q., Du Y.J., Wang F., Ren W.W., (2016), *Hydraulic conductivity of polymer modified bentonite filter cakes in calcium chloride solutions*, Geo-Chicago 2016, GSP 271, ss.428–437.
- Taytak B., Pulat H.F., Yükselen-Aksoy Y., (2012), *Improvement of engineering properties of soils by biopolymer additives*, 3rd International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 28-30 June, Near East University, Nicosia, North Cyprus, ss. 851-856.
- Tian K., Likos W.J., Benson C.H., (2019), *Polymer elution and hydraulic conductivity of bentonite-polymer composite geosynthetic clay liners*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 145(10), 04019071. doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002097.
- Wan M.-W., Petrisor I.G., Lai H.-T., Kim D., Yen T.F., (2004), *Copper adsorption through chitosan immobilized on sand to demonstrate the feasibility for in-situ soil decontamination*, Carbohydrate Polymers, 55(3), 249-254.
- Zohary T., Ostrovsky I., (2010), *Ecological impacts of excessive water level fluctuations in stratified freshwater lakes*, Inland Waters, 1, 47–59.