

Katyonik Polimer Katkılı Geosentetik Kil Örtülerin Farklı Tuz Çözeltileri ile Etkileşimi

Hakkı O. Özhan^{1,*}

¹Altınbaş Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34217, İstanbul.

Özet

Geosentetik kil örtü (GKÖ), düşük hidrolik iletkenliği sayesinde atık depolama alanlarında bariyer özelliği ile kullanılan bir kaplama malzemesidir. Bu çalışmada, GKÖ'nün bentonit bileşenine sırasıyla kütlece %0.5, %1 ve %2 oranlarında katyonik polimer eklenmiş ve üç eksenli hidrolik iletkenlik ile serbest şişme deneyleri yapılarak GKÖ'nün sırasıyla 0.1 M KCl, 0.5 M KCl ve 0.1 M MgCl₂ tuz çözeltilerinde hidrolik performansı irdelenmiştir. Sonuç olarak GKÖ'ye 0.1 M KCl çözeltisinde %0.5 katyonik polimer eklenmesi, hidrolik iletkenliği yaklaşık 0.13 katına, 0.5 M KCl ile 0.1 M MgCl₂ çözeltilerinde ise %1 katyonik polimer eklenmesi, hidrolik iletkenliği sırasıyla yaklaşık 0.18 ve 0.08 katına düşürerek gerekli hidrolik performansı sağlamıştır. GKÖ'ye daha fazla polimer eklemek, hidrolik iletkenliği ya değiştirmemiş ya da artırmıştır. GKÖ'nün şişme indeksi de %2 miktarına kadar katyonik polimer eklenmesi sonucunda artmıştır. Katyonik polimerin hidrolik iletkenlik üzerindeki etkileri polimer-bentonit-tuz çözeltisi arasındaki elektrostatik kuvvetler ile, şişme indeksi üzerindeki etkileri ise difüz çift tabaka ile ilişkilendirilmiştir. Tuz çözeltilerinin konsantrasyonunu ve katyon değerliğini artırmak ise hidrolik iletkenliği artırıp şişme indeksini azaltmıştır. Deney sonuçlarına göre kullanılan katyonik polimer, GKÖ'nün hidrolik özelliklerini iyileştirerek tuz çözeltilerinde yeterli hidrolik performansta kullanımını sağlamıştır.

Anahtar Sözcükler

Atık Depolama Alanı, Geosentetik Kil Örtü, Hidrolik İletkenlik, Katyonik Polimer, Şişme İndeksi, Tuz Çözeltisi

Interaction of Cationic Polymer-Treated Geosynthetic Clay Liners with Various Saline Solutions

Abstract

Geosynthetic clay liner (GCL) is a lining material that is used in waste containment facilities with its low hydraulic conductivity and barrier capability. In this study, %0.5, %1 and %2 cationic polymer by mass was added respectively to the bentonite component of the GCLs and triaxial hydraulic conductivity and free swell tests were performed on the GCLs that were permeated with 0.1 M KCl, 0.5 M KCl and 0.1 M MgCl₂ saline solutions respectively in order to evaluate the hydraulic performance of the GCL. As a result, %0.5 cationic polymer in 0.1 M KCl solution and %1 cationic polymer in 0.5 M KCl and 0.1 M MgCl₂ solutions improved the hydraulic performance of the GCL by causing almost 0.13, 0.18 and 0.08 times decrease in hydraulic conductivity respectively. However, additional polymer treatment resulted in either no change or increase in hydraulic conductivity. Furthermore, swell index of the GCL increased by adding up to an amount of %2 cationic polymer to the GCL. The effect of adding cationic polymer to the GCL on hydraulic conductivity and swell index was related to the electrostatic forces among polymer-bentonite-saline solution and diffuse double layer respectively. Increasing the concentration and valence of the cation in the saline solutions resulted in both increase in hydraulic conductivity and decrease in swell index. According to the test results, the cationic polymer improved the hydraulic properties of the GCL and resulted in a satisfactory hydraulic performance in saline solutions.

Keywords

Waste Containment Facility, Geosynthetic Clay Liner, Hydraulic Conductivity, Cationic Polymer, Swell Index, Saline Solution

1. Giriş

Çeşitli endüstriyel faaliyetler sonucunda açığa çıkan atıklar, atık depolama alanlarında toplanmaktadır. Biriktirilen katı atıkların içinden süzülen sızıntı suyunun atık depolama alanındaki zeminden sızarak yer altı suyunu karışması, su ve toprak kirliliğine neden olmakta ve bu etkileşim, çok önemli bir çevresel sorunu teşkil etmektedir. Bu nedenle çevre kirliliğini kontrol edebilmek için atık depolama alanlarının zeminlerini geçirimsizliği çok düşük malzemeler ile kaplamak gerekmektedir (Akbulut 2003). Geçmişte kaplama malzemesi olarak kil şilteler kullanılmış olsa da günümüzde hem kalınlığı hem de geçirimsizliği daha düşük olan geosentetik kil örtüler tercih edilmektedir (Yılmaz vd. 2008). Geosentetik kil örtü (GKÖ), iki geotekstil katmanı arasına ince bir tabaka halinde bentonit kilinin yerleştirilmesiyle imal edilen bir bariyer malzemesidir (Koerner 2005).

GKÖ'nün kaplama malzemesi olarak tercih edilmesinin en önemli sebepleri, kolay serilebilmesi, su geçirimsizliğinin ($< 10^{-10}$ m/s) ve kalınlığının (7-10 mm) çok düşük olması, düşük maliyeti, donma ve çözölmeye karşı dayanımıdır (Benson ve Meer 2009; Koerner ve Daniel 1995; Lee ve Shackelford 2005).

GKÖ'ler birçok uygulamada başka sentetik malzemeler ile birlikte kullanılmaktadır. GKÖ'lere geomembran ilâştirilerek geçirimsiz yakın kaplama malzemeleri elde edilmektedir (Vukelic vd. 2008). Bu durumda bile geomembranın temasta bulunduğu sıvı bir malzeme ile delinebilmesi veya kaplama malzemesine etkiyen aşırı hidrolik yüklerin geomembranda deformasyon oluşturabilmesi, sızıntı sularının GKÖ'ye ulaşmasına neden olmaktadır. Sonuç olarak GKÖ'de bulunan bentonit, kaplama malzemesinin hidrolik performansını belirleyecek en önemli bileşendir (Liu vd. 2013).

Kimyasal atık depolama sahaları ve maden atık barajları gibi sızıntı sularının (asidik veya yüksek oranda tuz içeren) biriktiği alanlara serilen GKÖ'nün hidrolik performansı, GKÖ içerisindeki bentonitin boşluklarının açılması sonucunda önemli oranda azalmaktadır (Jozefaciuk ve Matyka-Sarzynska 2006; Mazzieri vd. 2013; Mendes vd. 2010). Shackelford vd. (2010), içerisinde yüksek miktarda bakır ve çinko bulunan iki farklı kimyasal çözelti ile GKÖ üzerinde hidrolik iletkenlik deneyleri yapmışlardır. Sonuçlara göre permeabilite katsayısı, saf su ile yapılan deneylere kıyasla yaklaşık 500-1000 kat yüksek ölçülmüştür. Katsumi vd. (2008), 1 M NaCl çözeltisi kullanarak sodyum bentonit üzerinde hidrolik iletkenlik deneyleri yapmışlar ve yine saf su kullanılarak yapılan deney sonuçlarına göre permeabilite katsayısını yaklaşık 100 kat yüksek ölçmüşlerdir. İki değerlikli katyon içeren CaCl_2 çözeltisi ile yapılan hidrolik iletkenlik deney sonuçları ile tek değerlikli katyon içeren NaCl veya KCl çözeltileri ile yapılan deney sonuçları karşılaştırıldığında GKÖ'nün hem permeabilite katsayısı daha yüksek hem de şişme indeksi daha düşük ölçülmüştür (Bohnhoff ve Shackelford 2014; Jo vd. 2005; Scalia ve Benson 2011). GKÖ'nün hidrolik performansındaki bu farklılığın en önemli nedeni, iki değerlikli Ca^{2+} katyonları ile GKÖ'deki bentonitte bulunan iyonlar arasındaki değişimin Na^+ veya K^+ katyonları ile bentonit arasında olan iyon değişimine kıyasla bentonitte daha fazla boşluklu yapı oluşturmasıdır. Saf su ile temasta tutulan GKÖ'lerde ise zamana bağlı olarak permeabilite katsayısında artış ölçülmemiştir. Bunun sebebi ise saf su iyonları ile bentonit arasında iyon değişiminin olmamasıdır (Bouazza ve Gates 2014; Jo vd. 2005). Saf su ile yapılan deneylere göre GKÖ'lerin permeabilite katsayısı 10^{-11} - 10^{-12} m/s aralığında, oldukça düşük değerlerde seyretmektedir (Ören ve Demirkıran 2015; Özhan ve Güler 2013). Sonuç olarak bazı deneysel çalışmalarda, yüksek molariteye ve iki değerlikli katyona sahip tuz çözeltileri ile test edilen GKÖ'lerin permeabilite katsayısı 10^{-7} m/s'ye kadar yükselmiştir (Jo vd. 2005; Scalia ve Benson 2011).

GKÖ'nün hidrolik performansını artırabilmek için GKÖ'de bulunan bentonit katmanına polimer eklemek bir çözüm olabilir. Bentonit ile polimer etkileşimini elektrostatik kuvvetler belirlemektedir (Theng 2012). Bu elektrostatik kuvvetlerin yoğunluğu, zeta potansiyeli ile ifade edilmektedir. Yüksek zeta potansiyeli, partiküller arasında daha yoğun çekim gücüne karşılık gelmektedir ve daha kararlı yapılar oluşturur (Villar ve Lloret 2004). + yüklü katyonik polimerler, bentonit yüzeyinde bulunan - yüklü minerallere Coulomb çekim gücü ile bağlanırlar. Katyonik polimer eklendiğinde + ile - yüklerin çekimi ile bentonit partikülleri agregasyon oluşturarak toplanırlar (Ben-Hur vd. 1992; Haase ve Schanz 2016).

Kütlece %5 katyonik polimer katkılı GKÖ üzerinde saf su kullanılarak hidrolik iletkenlik deneyleri yapılmış ve deney başlangıcından 1.7 yıl sonra bile GKÖ'nün permeabilite katsayısı 3.2×10^{-12} m/s gibi çok düşük bir değerde kalmıştır (Tian vd. 2016). Katyonik polimer ile sodyum bentonit karışımları üzerinde saf su kullanılarak yapılan sıvı kaybı deneylerine göre katyonik polimer, bentonitin permeabilite katsayısına neredeyse hiç etki etmemiştir. Bentonite kütlece %1 oranında polimer eklendiğinde permeabilite katsayısı 0.1 katına düşmüşken %2 oranında polimer eklendiğinde polimersiz bentonitin permeabilite katsayısıyla hemen hemen aynı değer elde edilmiştir (Liu vd. 2012). Başka bir çalışmada ise Bohnhoff ve Shackelford (2014), kütlece %5 bentonit içeren bentonit-kum karışımındaki bentonite kütlece %2 oranında polimer ekleyerek ve karışımı 0.05 M CaCl_2 çözeltisi ile temasta tutarak hidrolik iletkenlik deneyleri yapmışlardır. Polimer katkısız ve katkılı bentonit-kum karışımlarının permeabilite katsayıları sırasıyla 2.5×10^{-9} m/s ve 3.2×10^{-11} m/s olarak ölçülmüştür. Sonuçta polimer eklemek, karışımın permeabilite katsayısını yaklaşık 100 kat azaltmıştır.

Güngör ve Karaolan (2001), bentonite polimer eklemenin boşluklara etkisini araştırmışlardır. Eklenen polimer, bentonitin boşluklarını doldurarak sıvı geçişini bir miktar bloke etmiştir. Başka bir çalışmada sodyum bentonit ile kalsiyum bentonit karışımı, CaCl_2 , MgCl_2 ve NaCl çözeltileri ile etkileşime bırakılmış ve bu bentonit karışımına katyonik polimer eklenmiştir. Çözelti konsantrasyonu arttıkça zeta potansiyeli mutlak değerce azalırken eklenen katyonik polimer oranının artması, zeta potansiyelini mutlak değerce çok az miktarda azaltmıştır (Önen ve Göçer 2016). Sonuç olarak katyonik polimer katkılı killeri ve GKÖ'ler ile yapılan çalışmalara göre katyonik polimer eklenmesi genelde hidrolik iletkenliği azaltsa da bazı durumlarda artırmıştır. Ortamdaki çözelti konsantrasyonu ve polimerde bulunan katyon miktarı da bu sonuçları etkilemektedir. Bulunan sonuçlar zeta potansiyeli ile ilişkilendirilmiş ve zeta potansiyelinin mutlak değerce yükselmesi, daha kararlı etkileşimi ortaya koyarak düşük hidrolik iletkenliğe karşılık gelmiştir.

Bu çalışmanın amacı, katyonik polimer eklemenin GKÖ'nün hidrolik performansını 0.1 M KCl, 0.5 M KCl ve 0.1 M MgCl_2 çözeltileri kullanıldığında nasıl etkilediğinin irdelenmesidir. Kullanılan tuz çözeltileri, farklı konsantrasyonlara ve farklı katyon değerliklerine sahip olup atık depolama alanlarında birikebilen sızıntı sularını temsil etmektedir. GKÖ'nün bentonit bileşenine sırasıyla kütlece %0.5, %1 ve %2 oranlarında katyonik polimer eklenmiştir. GKÖ'nün hidrolik performansı, yapılan üç eksenli hidrolik iletkenlik ve serbest şişme deneyleriyle değerlendirilmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

Üç eksenli hidrolik iletkenlik deneylerinde kullanılan GKÖ, 100 mm çapında örgülü ve örgüsüz iki geotekstil katmanı arasına granüler sodyum bentonitin herhangi bir güçlendirme yapılmadan serbest şekilde yerleştirilmesiyle imal edilmiştir. Bentonitin özgül ağırlığı, likit limiti, plastik limiti ve birim alana düşen kütlesi sırasıyla 2.69 (ASTM D 854 2014), %640, %28 (ASTM D 4318 2010) ve 4800 gr/m²'dir (ASTM D 5993 2014). Örgülü geotekstil, polipropilenden üretilmiş olup 0.4 mm zahiri açıklık çapına (ASTM D 4751 2016) ve 100 gr/m² (ASTM D 5261 2010) birim alana düşen kütleye sahiptir. Örgüsüz geotekstil ise yine polipropilenden üretilmiş olup liflerinin birbirlerine iştirilmesi iğneleme yöntemi ile sağlanmıştır. Örgüsüz geotekstilin zahiri açıklık çapı ve birim alana düşen kütlesi ise sırasıyla 0.2 mm (ASTM D 4751 2016) ve 250 gr/m²'dir (ASTM D 5261 2010). GKÖ'ye eklenen katyonik polimer, kütle bakımından suda çözünür anyon oranına kıyasla yaklaşık 11 kat daha fazla suda çözünür katyon içeren toz halinde bir polimer olup akrilamidin (C₃H₅NO) + yüklü kopolimerlerinden oluşmaktadır (SNF 2016). Polimerin içeriğinde bulunan belli başlı çözünür katyon ve anyonları saptayabilmek için Bağlaşık Plazma-Atomik Emisyon Spektrometre Tümevarım Metodu (ICP-AES) ile kimyasal analiz yapılmıştır (Van de Wiel 2003). 1 gram polimer, 1 litre saf suda çözünerek polimerin içeriğindeki belli başlı iyonların kütle miktarları saptanmıştır. Sonuçta katyonik polimerin içeriğinde 0.032 mg/L Na⁺, 0.0095 mg/L Ca²⁺, 0.0062 mg/L K⁺ ve 0.0044 SO₄²⁻ ölçülmüştür. GKÖ'ler, tek değerlikli tuz çözeltisini temsilen 0.1 M ve 0.5 M KCl, iki değerlikli tuz çözeltisini temsilen de 0.1 M MgCl₂ çözeltiğinde test edilmişlerdir. KCl çözeltisinde konsantrasyon etkisini gözlemlemek için iki farklı molarite kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan yüksek molariteye sahip tuz çözeltileri, atık depolama alanlarında biriktirilen atıklardan süzülen sızıntı suyunu temsil etmektedir.

2.1. Üç Eksenli Hidrolik İletkenlik Deneyleri

GKÖ numunelerini elde etmek için örgülü ve örgüsüz geotekstiller, 100 mm çaplı daireler şeklinde geotekstil rulolarından makasla kesilerek hazırlanmışlardır (ASTM D 6766 2012). Granüler sodyum bentonit ise 4800 gr/m² birim alana düşen kütleyi sağlayacak şekilde, örgüsüz geotekstilin üzerine dağıtılmıştır. Bentonitin geotekstillerle birleşmesi için, bentonite homojen bir şekilde saf su katılmıştır. Son olarak da ıslak bentonitin üzerine örgülü geotekstil, hiçbir güçlendirme işlemi yapılmadan iştirilmiştir (Özhan ve Güler 2013). Polimer katkılı GKÖ numunelerinde kuru bentonitin içerisine sırasıyla kütlece %0.5, %1 ve %2 oranlarında katyonik polimer eklenmiştir. Bentonit-polimer karışımı, homojen bir şekilde spatula ile karıştırılmış ve bu karışım, polietilen bir kaba dökülmüştür. Kap, hava almayacak şekilde yaklaşık 5 dakika el ile sallanmış, sonrasında da karışımın nemli ortamda reaksiyona girip homojenizasyonunun sağlanması için 24 saat bekletilmiştir (Razakamanantsoa vd. 2012; 2014). Bu işlem tamamlandıktan sonra, polimer katkısız GKÖ'lerin hazırlanmasında olduğu gibi geotekstiller kesilmiş ve aynı şekilde bentonit-polimer karışımı ıslatılarak geotekstillere iştirilmiştir.

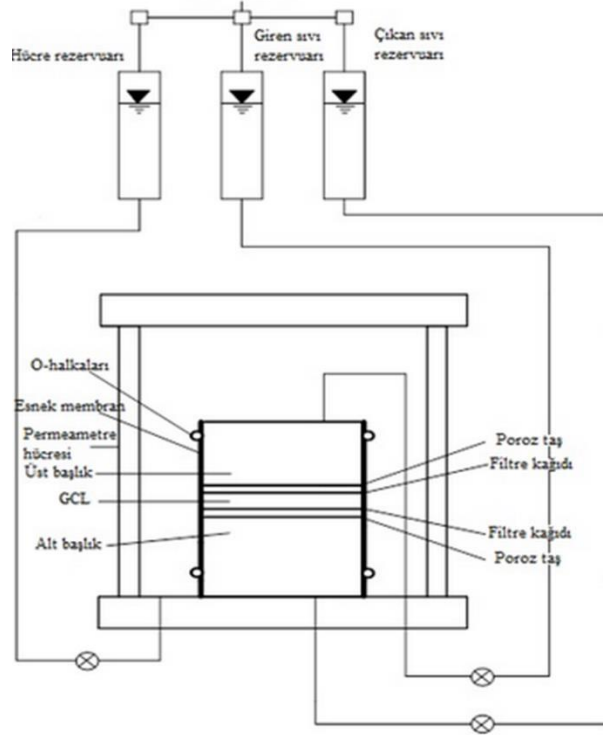
Hazırlanan GKÖ'ler, esnek duvarlı permeametrelerle yerleştirilerek sabit seviyeli, üç eksenli hidrolik iletkenlik deneylerine tabi tutulmuştur (ASTM D 6766 2012). Sıvı akışının homojen olabilmesi ve deney düzeneğinde tıkanma olmaması için GKÖ, filtre kağıtları ile poroz taşlar arasına Şekil 1'deki gibi yerleştirilmiştir. Deney düzeneği yukarıdan aşağıya üst başlık, poroz taş, filtre kağıdı, GKÖ, filtre kağıdı, poroz taş, alt başlıktan oluşmaktadır (Şekil 1). GKÖ'nün yan yüzeylerinden yüksek basıncın neden olabileceği olası sıvı çıkışını engellemek için GKÖ, esnek lateks membran ile sarılmıştır (Şekil 1). Permeametre, üzerindeki kapak kapatıldıktan sonra deneyde kullanılan sıvı ile doldurulmuştur (ASTM D 6766 2012). Saturasyon ve konsolidasyonun sağlanması için permeametredeki hücre basıncı 550 kPa, ters basınç ise 515 kPa'da sabitlenmiştir. Yukarı yönde sıvı akışını verebilmek için GKÖ'nün tabanındaki basınç 518 kPa'ya yükseltilmiş, tepesindeki basınç ise 515 kPa'da sabit tutulmuştur (ASTM D 6766 2012). Böylelikle GKÖ üzerindeki basınç farkı 3 kPa'ya karşılık gelmektedir. Bu basınç değeri, GKÖ üzerinde biriken yaklaşık 0.3 m'lik sıvı seviyesini temsil etmektedir. 0.3 m'lik sıvı seviyesi ise atık depolama alanlarında izin verilen maksimum seviyedir (Weber ve Zornberg 2005). Şekil 2'de permeametreye yerleştirilmiş, membrana sarılmış GKÖ numunesi ve basınç ünitesi ile permeametre arasındaki bağlantılar görülmektedir.

GKÖ'den geçirilen sıvı akışı sabitlendiğinde GKÖ'nün permitivitesi (Ψ) ölçülmüştür. Deneylerde permeabilite katsayısı (k) yerine permitivite (Ψ) parametresinin ölçülmesinin sebebi, GKÖ'nün çok ince bir malzeme olmasından dolayı deney boyunca GKÖ'nün kalınlığını ölçmenin mümkün olmaması ve GKÖ'nün aynı anda çok farklı kalınlık değerlerine sahip olabilmesidir. Permitivite ölçümünde GKÖ kalınlığı kullanılmamaktadır (Koerner 2005). Permitivite (Ψ) aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır (Shan ve Chen 2003):

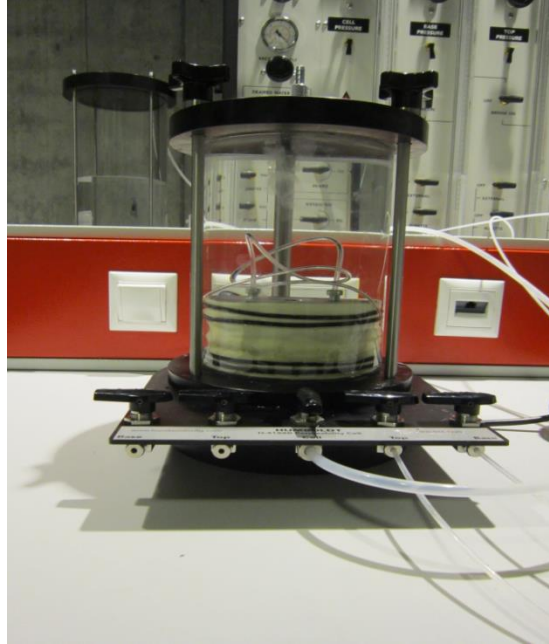
$$\Psi = \frac{\Delta Q}{A \cdot \Delta h \cdot \Delta t} \quad (1)$$

Denklem 1'de Ψ (1/s) permitiviteye, ΔQ (cm³) GKÖ'ye giren ve GKÖ'den çıkan sıvı miktarının aritmetik ortalamasına, A (cm²) GKÖ'nün yüzey alanına, Δh (cm) GKÖ üzerindeki sıvı seviyesine ve Δt (s) ise ΔQ 'nın ölçüldüğü zaman aralığına karşılık gelmektedir.

Permitivite, her deney süresince farklı zamanlarda ölçülmüş ve permitivitenin zamana karşı değişimi elde edilmiştir. KCl ve $MgCl_2$ çözeltilerindeki K^+ ve Mg^{2+} katyonlarının GKÖ'deki bentonit ile etkileşimi sonucunda iyon değişiminin uzun bir sürede tamamlanması nedeniyle sıvı akışının sabitlenmesi hemen olmamaktadır. Bu süre 0.1 M KCl, 0.5 M KCl ve 0.1 M $MgCl_2$ çözeltileri için sırasıyla 77-80 gün, 35-36 gün ve 34-36 gün olarak belirlenmiştir. Sabit akış sağlandıktan sonra en az 3-4 gün daha deneyler devam etmiş ve permitivite değerleri ölçülmüştür. Saf su ile yapılan deneylerde sıvı akışı sabitlenmesi hemen sağlanmış, yine de deneyler 15-16 gün devam etmiştir.



Şekil 1: Üç eksenli hidrolik iletkenlik deney düzeneği



Şekil 2: Permeametre içerisinde GKÖ numunesi

GKÖ'nün permeabilite katsayısı (k), sadece deneylerin bitiminde hesaplanmıştır. Bunun sebebi, deneyler tamamlandıktan sonra permeametreten çıkartılan GKÖ numunesinin kalınlık değerinin ölçülebilmesidir (ASTM D 5199 2012). GKÖ'nün deney sonundaki permeabilite katsayısı (k) aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır (Koerner 2005):

$$k = \Psi.L \quad (2)$$

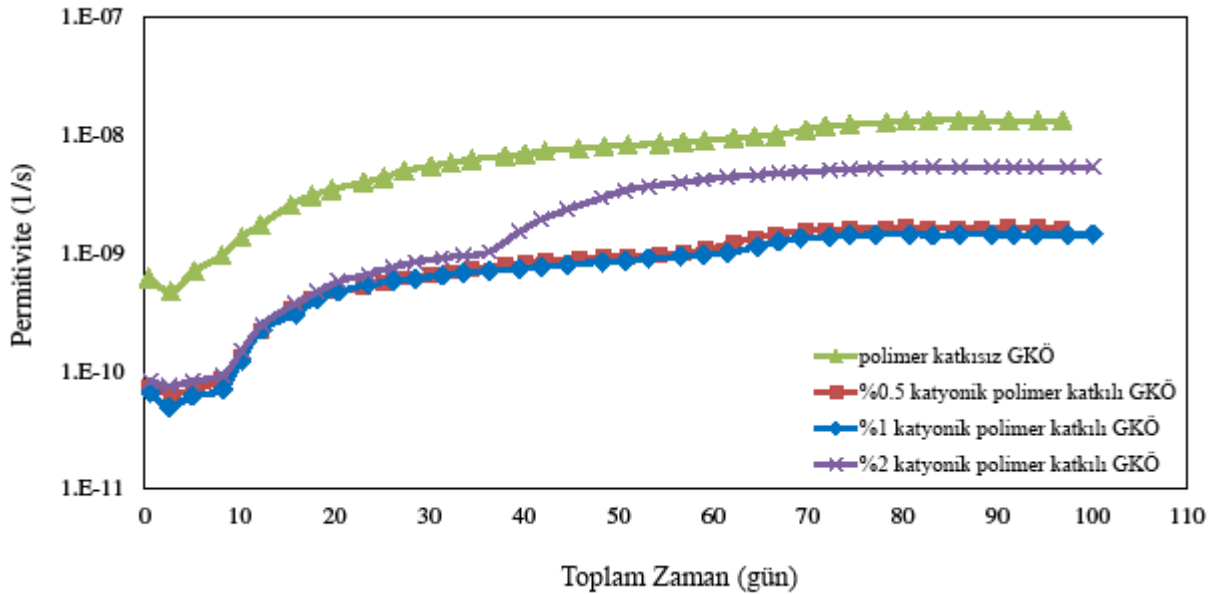
Denklem 2'de L (m) deney sonunda GKÖ numunesinin kalınlık değerine karşılık gelmektedir.

2.2. Serbest Şişme Deneyleri

Serbest şişme deneylerinde %100'ü 0.150 mm ve %65'i 0.074 mm açıklıktaki eleklerden elenmiş, 105°C'de etüvde kurutulmuş 2'er gram sodyum bentonit kullanılmıştır (ASTM D5890 2011). GKÖ ile test edilen tuz çözeltileri (0.1 M KCl, 0.5 M KCl ve 0.5 M MgCl₂ çözeltileri) cam büretlere dökülmüş ve hazırlanan bentonit, çözeltilere spatula ile parça parça eklenmiştir. Polimer katkılı bentonit elde etmek için belirlenen polimer oranları (kütlece %0.5, %1 ve %2) üç eksenli hidrolik iletkenlik deneylerinde olduğu gibi bentonitlere homojen bir şekilde eklenmiştir (Razakamanantsoa vd. 2012). Polimer katkısız bentonitin şişme indeksi, bentonitin tamamının bürete dökülmesinden 24 saat sonra; polimer katkılı bentonitlerin şişme indeksi ise 72 saat sonra ölçülmüştür. Bunun sebebi, polimerle etkileşimdeki bentonitin şişmesinin bir süre daha devam etme olasılığıdır (ASTM D5890 2011).

3. Bulgular ve Tartışma

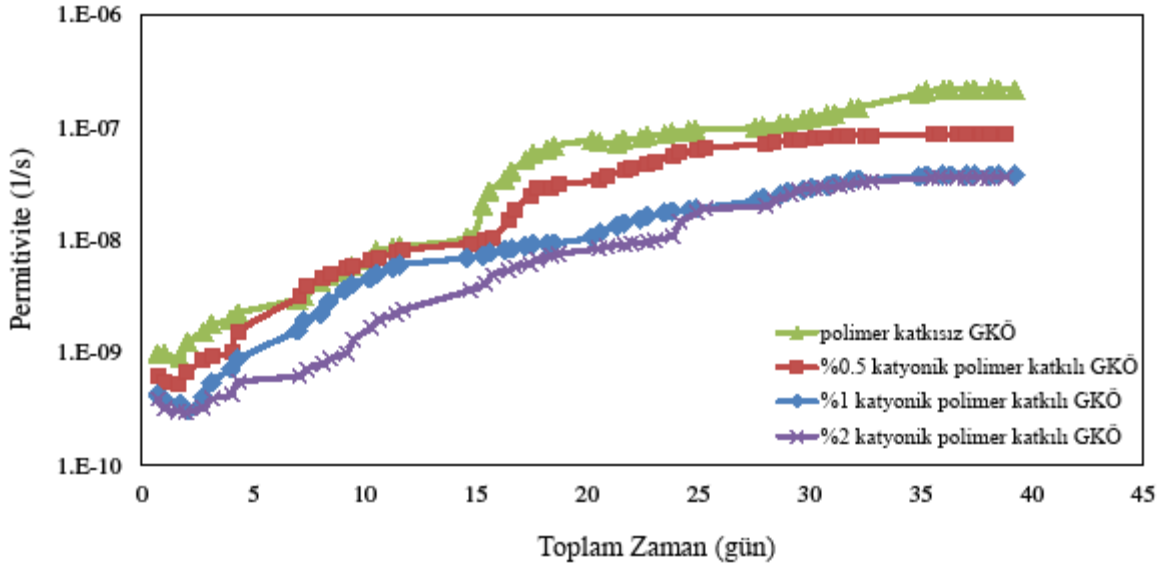
0.1 M KCl çözeltisi ile yapılan deneylerde GKÖ'lerin permitivite değerlerinin zamana karşı değişimi Şekil 3'de gösterilmiştir. GKÖ'ye %0.5 katyonik polimer eklemek permitiviteyi 1.3×10^{-8} 'den 1.6×10^{-9} 1/s'ye düşürmüştür. %1 polimer katkılı GKÖ ile %0.5 polimer katkılı GKÖ'nün permitivitesi neredeyse aynı ölçülmüştür. %2 polimer katkılı GKÖ'nün permitivitesi ise %0.5 polimer katkılı GKÖ'nünkinin yaklaşık 3.5 katına yükselmiştir.



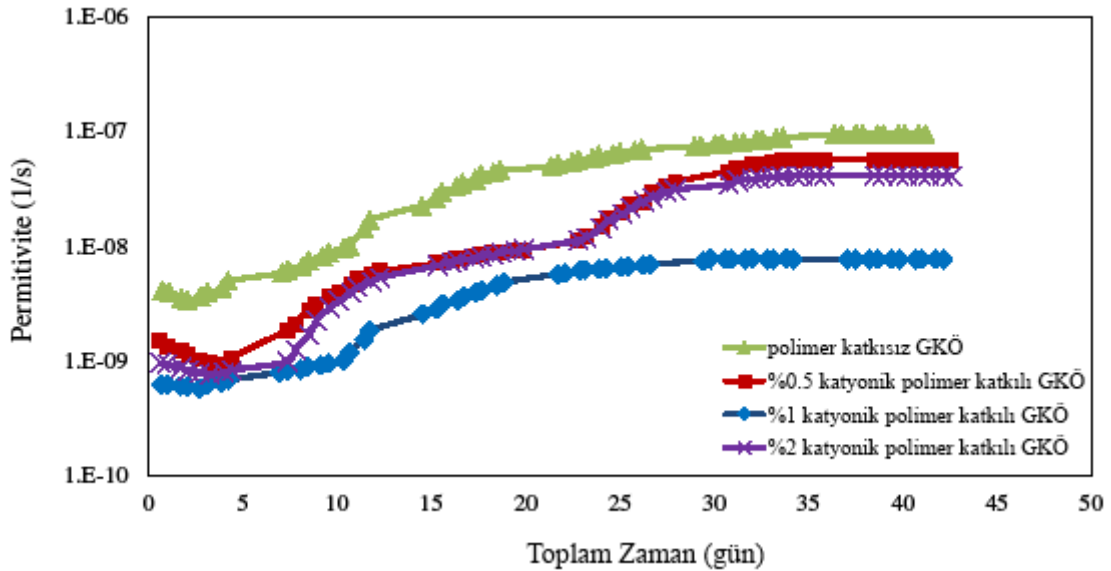
Şekil 3: 0.1 M KCl çözeltisi ile test edilen GKÖ'lerin permitivite-zaman değişimleri

Şekil 4'de 0.5 M KCl kullanılarak üç eksenli hidrolik iletkenlik deneylerine tabi tutulan GKÖ'lerin permitivite-zaman değişimleri verilmiştir. Polimer katkısız GKÖ'nün permitivitesi 2.2×10^{-7} 1/s iken %0.5 katyonik polimer katkılı GKÖ'nün permitivitesi 8.6×10^{-8} 1/s olarak ölçülmüştür. %1 polimer eklemek, permitiviteyi %0.5 katyonik polimer katkılı GKÖ'nün permitivitesine kıyasla azaltmıştır. %2 polimer katkılı GKÖ'nün permitivitesi ise %1 polimer katkılı GKÖ'nün permitivitesiyle hemen hemen aynı ölçülmüştür.

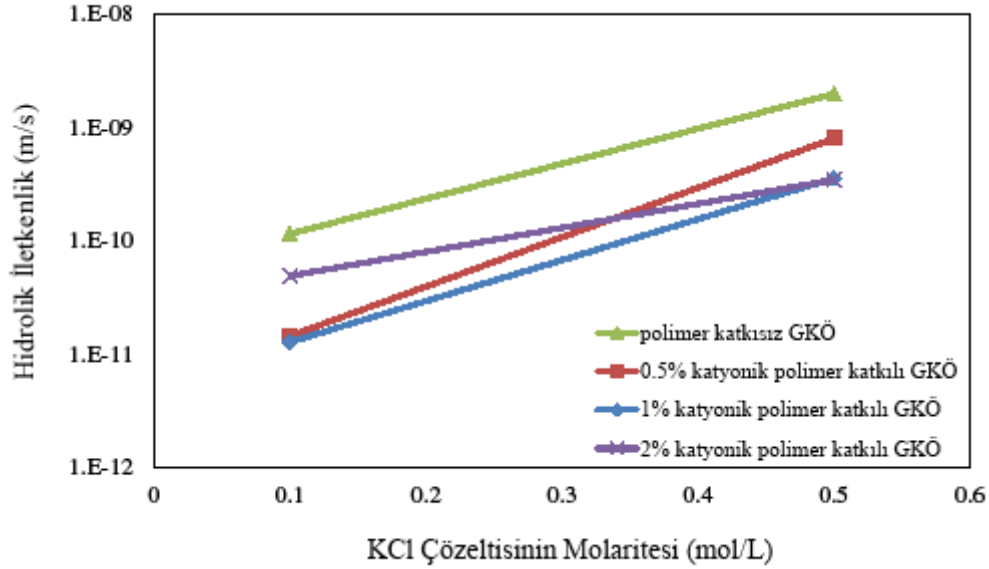
0.1 M MgCl₂ çözeltisi ile test edilen GKÖ'lerin permitivite-zaman değişimleri ise Şekil 5'de gösterilmiştir. %0.5 katyonik polimer eklendiğinde GKÖ'nün permitivitesi, 9.5×10^{-8} 'den 5.6×10^{-8} 1/s'ye düşmüş, %1 polimer eklendiğinde daha da azalmıştır. %2 polimer katkılı GKÖ'nün permitivitesi ise %1 polimer katkılı GKÖ'nün permitivitesinin yaklaşık 5.4 katına yükselmiştir.



Şekil 4: 0.5 M KCl çözeltisi ile test edilen GKÖ'lerin permitivite-zaman değişimleri

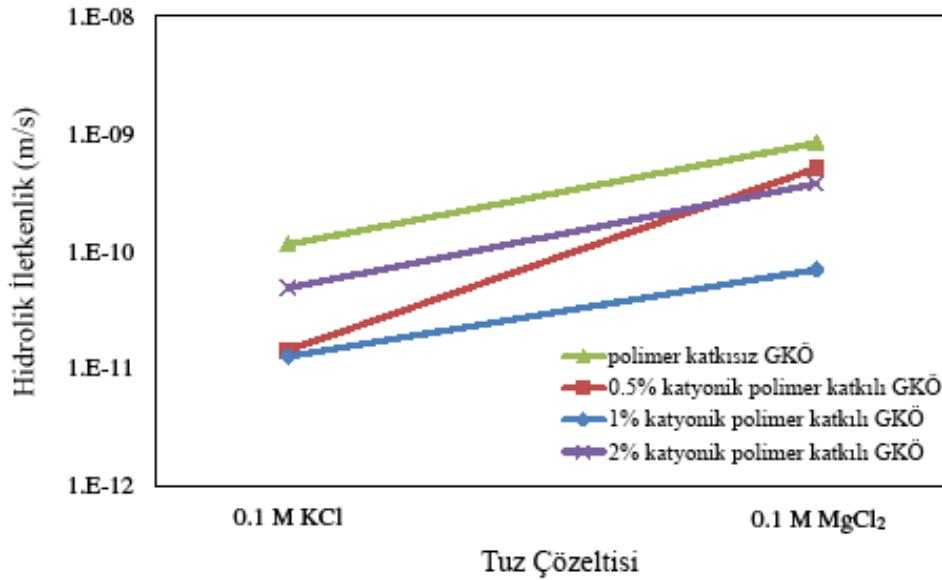
Şekil 5: 0.1 M MgCl₂ çözeltisi ile test edilen GKÖ'lerin permitivite-zaman değişimleri

GKÖ'lerin hidrolik iletkenlikleri deney sonlarında ölçülmüş olup KCl çözeltisinin molarite değişimi ile GKÖ'lerin hidrolik iletkenlik değişimleri Şekil 6'da gösterilmiştir. KCl çözeltisinin molaritesi 0.1 M'den 0.5 M'ye yükseltildiğinde hidrolik iletkenlik de artmıştır. Bu artış, %0.5 katyonik polimer katkılı GKÖ'de yaklaşık 55 kat ile en yüksek oranda ölçülürken %2 katyonik polimer katkılı GKÖ'de yaklaşık 7 kat ile en düşük oranda ölçülmüştür. Şekil 6'da görüldüğü üzere 0.1 M KCl çözeltisi ile temasta olan GKÖ'ye %0.5 katyonik polimer eklemek, hidrolik iletkenlik bakımından optimum sonucu vermiştir. %0.5 katyonik polimer katkılı GKÖ'nün hidrolik iletkenliği 1.4×10^{-11} m/s iken %1 katyonik polimer katkılı GKÖ'nün hidrolik iletkenliği neredeyse aynı değerlerde seyrederek 1.3×10^{-11} m/s olarak ölçülmüştür. Polymer miktarı %2'ye artırıldığında ise hidrolik iletkenlik 4.9×10^{-11} m/s'ye yükselmiştir. 0.5 M KCl çözeltisi ile test edilen GKÖ'nün hidrolik iletkenliği ise katyonik polimer miktarının %1'e ulaşmasına kadar azalmıştır. Optimum sonuç, 3.5×10^{-10} m/s hidrolik iletkenlik ile %1 katyonik polimer katkılı GKÖ ile elde edilmiş olup %2 katyonik polimer katkılı GKÖ'nün hidrolik iletkenliği 3.4×10^{-10} m/s olarak ölçülmüştür.



Şekil 6: KCl çözeltisinin molaritesi ile GKÖ'lerin deney sonu hidrolik iletkenlik değişimleri

Şekil 7'de ise aynı molariteye sahip KCl ve $MgCl_2$ çözeltileri ile test edilen GKÖ'lerin deney sonu hidrolik iletkenlik değişimleri gösterilmiştir. Sonuçlara göre iki değerlikli Mg^{2+} kasyonu içeren 0.1 M $MgCl_2$ çözeltisi ile test edilen GKÖ'lerin hidrolik iletkenlikleri, tek değerlikli K^+ kasyonu içeren 0.1 M KCl çözeltisi ile test edilenlere kıyasla daha yüksek ölçülmüştür. Bu fark, %0.5 katyonik polimer katkılı GKÖ'lerde en fazladır. Hidrolik iletkenlik, KCl çözeltisinde 1.4×10^{-11} m/s iken $MgCl_2$ çözeltisinde 5.1×10^{-10} m/s olarak yaklaşık 36 katına yükselmiştir. 0.1 M $MgCl_2$ çözeltisinde en düşük hidrolik iletkenlik, %1 katyonik polimer katkılı GKÖ'de 7×10^{-11} m/s olarak ölçülmüştür. Polimer miktarı %2'ye artırıldığında hidrolik iletkenlik, 3.8×10^{-10} m/s'ye yükselmiştir.



Şekil 7: Aynı molariteye sahip KCl ve $MgCl_2$ çözeltileri ile test edilen GKÖ'lerin deney sonu hidrolik iletkenlik değişimleri

Bu sonuçlara göre 0.1 M KCl çözeltisi ile test edilen GKÖ'lere %0.5 katyonik polimer, 0.5 M KCl ve 0.1 M $MgCl_2$ çözeltileri ile test edilen GKÖ'lere ise %1 katyonik polimer eklemek, hidrolik performans bakımından yeterli verimi sağlamaktadır. Bu koşullarda GKÖ'nün hidrolik iletkenliği 0.1 M KCl, 0.5 M KCl ve 0.1 M $MgCl_2$ çözeltileri kullanıldığında sırasıyla yaklaşık 0.13, 0.18 ve 0.08 katına düşmüştür. GKÖ'ye eklenen katyonik polimerin bentonitteki boşlukları doldurması sonucunda GKÖ'nün permutivitesi ve hidrolik iletkenliği azalmıştır. Bentonite belli bir orana kadar eklenen katyonik polimer, bu boşlukların neredeyse tamamını kapatarak hidrolik performansı önemli derecede artırmıştır (Scalia vd. 2014; Tian vd. 2016).

Daha fazla polimer eklenmesi ise artık doldurulacak boşluk kalmadığından hidrolik iletkenliği daha fazla azaltamamıştır. Hatta 0.1 M KCl ile 0.1 M $MgCl_2$ çözeltileri kullanıldığında GKÖ'ye polimer eklenmesi, bir noktadan sonra tersine etki yaparak hidrolik iletkenliği artırmıştır. Bu artışın sebebi ise belli bir miktarda katyonik polimer ile etkileşime giren bentonit partiküllerinin, + ve - iyonların çekimleri sonucunda agregasyon oluşturarak topaklanmasına ve sonucunda bentonitin boşluk oranının artmasına bağlanabilir. Bentonitin boşluk oranı artınca da GKÖ ile temas eden tuz çözeltileri, oluşan gözenekli kılcal kanallardan süzülerek hidrolik iletkenliği artırmışlardır (Ben-Hur vd. 1992; Haase ve Schanz 2016). Ayrıca katyonik polimer ile bentonitin karışımı sonucunda + ve - iyonlar arasındaki çekim gücü artmış bu çekim gücü de zeta potansiyeli ile ifade edilmiştir. Zeta potansiyelindeki mutlak değerce artış, GKÖ ile temasta olan tuz çözeltilerindeki bentonit partiküllerinin kararlı yapısını simgeleyerek permitivitede, dolayısıyla da hidrolik iletkenlikte düşüşe karşılık gelebilmektedir (Wang vd. 2016).

Yapılan bütün deneylerde GKÖ'lerin permitivitesi deney başlangıcından itibaren önemli miktarda artmakta, sonrasında dengeye ulaşmaktadır. Bu artışın sebebi, çözeltilerdeki katyonlar ile bentonit arasındaki iyon alışverişidir. Bu işlem tamamlandığında kimyasal denge oluşmakta ve permitivite değerleri hemen hemen sabitlenmektedir. Bu artış, 0.1 M çözeltileri ile yapılan deneylerde 10-50 kat iken 0.5 M çözeltisi ile yapılan bazı deneylerde 100 katı aşmıştır. Sonuçta çözelti konsantrasyonunun (molarite) artması, hidrolik iletkenliği artırarak hidrolik performansı düşürmüştür. 0.1 M KCl çözeltisi kullanıldığında hidrolik iletkenlik en düşük 1.3×10^{-11} m/s ölçülmüşken 0.5 M KCl çözeltisinde sadece 3.4×10^{-10} m/s'ye kadar azalmıştır. İki değerlikli katyon kullanılan çözeltide hidrolik iletkenlik, tek değerlikli katyon kullanılan çözeltiye kıyasla daha yüksek ölçülmüştür. Bunun sebebi de çözeltideki katyon değeri ile çözelti-bentonit etkileşiminin doğru orantılı olmasıdır. Değerlik yükseldikçe, etkileşim de fazla olmakta ve hidrolik iletkenliği artırmaktadır. 0.1 M $MgCl_2$ çözeltisi ile test edilen GKÖ'lerin hidrolik iletkenliğinin 0.1 M KCl ile test edilenlerden yüksek olmasının sebebi bu katyon etkileşiminin katyon değeri arttıkça daha yoğun olmasıdır. Tablo 1'de, yapılan bütün üç eksenli hidrolik iletkenlik deneyleri sonucunda elde edilen hidrolik iletkenlik değerleri ile her deneyin süresi verilmiştir. Tablo 1'de ayrıca aynı GKÖ'lerin saf suda yapılan üç eksenli hidrolik iletkenlik deney sonlarında ölçülen hidrolik iletkenlik değerleri de verilmiştir. Polimer katkısız GKÖ'nün hidrolik iletkenliği saf suda 7.9×10^{-11} m/s gibi oldukça düşük bir değerde iken 0.1 M KCl çözeltisinde 1.4, 0.5 M KCl çözeltisinde 25 ve 0.1 M $MgCl_2$ çözeltisinde 11 katına yükselmiştir. Saf suda GKÖ'ye katyonik polimer eklenmesi hidrolik iletkenliği azaltmış, en düşük hidrolik iletkenlik ise %2 katyonik polimer katkılı GKÖ'de 7.7×10^{-12} m/s olarak ölçülmüştür.

Tablo 1: Üç eksenli hidrolik iletkenlik deney sonuçları

	Saf Su		0.1 M KCl		0.5 M KCl		0.1 M $MgCl_2$	
	Hidrolik İletkenlik (m/s)	Zaman (gün)	Hidrolik İletkenlik (m/s)	Zaman (gün)	Hidrolik İletkenlik (m/s)	Zaman (gün)	Hidrolik İletkenlik (m/s)	Zaman (gün)
Polimer katkısız GKÖ	7.9×10^{-11}	15.6	1.1×10^{-10}	96.9	2.0×10^{-9}	39.2	8.4×10^{-10}	41.2
%0.5 katyonik polimer katkılı GKÖ	6.2×10^{-11}	15.6	1.4×10^{-11}	96.9	7.9×10^{-10}	38.8	5.1×10^{-10}	42.6
%1 katyonik polimer katkılı GKÖ	2.3×10^{-11}	15.2	1.3×10^{-11}	100.1	3.5×10^{-10}	39.2	7.0×10^{-11}	42.1
%2 katyonik polimer katkılı GKÖ	7.7×10^{-12}	15.2	4.9×10^{-11}	100.1	3.4×10^{-10}	38.8	3.8×10^{-10}	42.6

Serbest şişme deney sonuçlarına göre GKÖ'ye katyonik polimer eklemek, GKÖ'nün şişme indeksini artırmıştır. 0.1 M KCl çözeltisi kullanıldığında polimer katkısız GKÖ'nün şişme indeksi 11 ml/2g iken %2 katyonik polimer eklendiğinde bu değer 16.5 ml/2g'a yükselmiştir. 0.5 M KCl ve 0.1 M $MgCl_2$ çözeltileri ile test edilen GKÖ'lerde ise %2 katyonik polimer eklenmesi şişme indeksini sırasıyla 6'dan 12.5 ml/2g'a ve 7'den 9.5 ml/2g'a artırmıştır. Tablo 2'de serbest şişme deney sonuçları verilmiştir. Farklı tuz çözeltileri ile test edilen GKÖ'ler ile karşılaştırma yapılabilmesi için aynı GKÖ'lerin saf suda ölçülmüş şişme indeksi değerleri de Tablo 2'de gösterilmiştir. Şişme indeksi, saf su ile temas halinde 24-28 ml/2g gibi oldukça yüksek değerlerde iken tuz çözeltileri ile etkileşime bırakıldığında önemli oranda azalarak hidrolik performansı olumsuz yönde etkilemiştir. Deney sonuçlarına göre eklenen polimer miktarı arttıkça GKÖ'nün şişme indeksi, dolayısıyla şişme kapasitesi de kullanılan tuz çözeltisinden bağımsız olarak azar azar artmıştır. Şişme performansı bakımından en iyi sonuçlar, GKÖ'ye %2 katyonik polimer eklendiğinde alınmıştır. Katyonik polimer eklenmesi sonucu GKÖ'lerin şişme indeksinin artması, tuz çözeltileri ile teması sonucu şişen polimerin hidrojel yapıya ulaşması ve sonrasında bentonit ile birleşince karışımın şişme kapasitesinin artmasına bağlanabilir (Haase ve Schanz 2016). Hidrolik iletkenlik deneylerinde olduğu gibi tuz çözeltisinin konsantrasyonunun artırılması ve çözeltide tek değerlikli katyon yerine iki değerlikli katyon kullanılması, hidrolik performansı olumsuz yönde etkilemiştir.

KCl çözeltisinin molaritesi 0.1'den 0.5'e yükseltildiğinde şişme indeksi 11-16.5'dan 6-12.5 ml/2g'a düşmüştür. 0.1 M $MgCl_2$ çözeltisi kullanıldığında da şişme indeksi değerleri 7-9.5 ml/2g aralığında kalarak 0.1 M KCl çözeltisi ile test edilen GKÖ'lerin şişme indeksi değerlerinden daha düşük ölçülmüştür.

Tablo 2: Serbest şişme deney sonuçları

	Saf Su	0.1 M KCl	0.5 M KCl	0.1 M MgCl ₂
	Şişme indeksi (ml/2g)			
Polimer katkısız GKÖ	24	11	6	7
%0.5 katyonik polimer katkılı GKÖ	25.5	13	8.5	8
%1 katyonik polimer katkılı GKÖ	27	14.5	10.5	8.5
%2 katyonik polimer katkılı GKÖ	28	16.5	12.5	9.5

Tuz çözeltilerinde bulunan + iyonlar ile bentonit partiküllerinin yüzeyinde bulunan - iyonlar arasında elektrostatik kuvvetlerden dolayı çekim oluşmaktadır. Bu çekim sonucu oluşan ara bölgeye difüz çift tabaka denilmektedir (McBride 1997). Aşağıdaki denklem ile GKÖ'lerin temasta bulunduğu tuz çözeltilerinin konsantrasyonu ve değeri ile difüz çift tabaka arasında bağıntı kurularak GKÖ'nün şişme kapasitesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır (Studds vd. 1996):

$$\theta = \sqrt{\frac{\epsilon_0 \cdot \kappa \cdot R \cdot T}{2F^2 \cdot c \cdot v^2}} \quad (3)$$

Denklem 3'de θ Debye uzunluğuna (m) karşılık gelmektedir. ϵ_0 vakum permitivitesi olup 8.86×10^{-12} F/m, κ saf suyun dielektrik sabiti olup 20°C'de 80.2, R evrensel gaz sabiti olup 8.134 J/mol/K, T test edilen sıvının sıcaklık değeri olup 293.15 K (20°C), F Faraday sabiti olup 9.65×10^4 C/mol alınmıştır. c çözeltili konsantrasyonu olup 0.1 M KCl ile 0.1 M MgCl₂ çözeltileri için 100 mol/m³ ve 0.5 M KCl çözeltisi için 500 mol/m³, v çözeltideki katyonların değeri olup KCl çözeltilerindeki K⁺ katyonundan dolayı 1 ve MgCl₂ çözeltisindeki Mg²⁺ katyonundan dolayı 2 olarak kullanılmıştır (Studds vd. 1996).

Difüz çift tabakanın kalınlığı Debye uzunluğuna karşılık gelmekte olup bütün deneyler 20°C'deki tuz çözeltilerinde yapıldığından Denklem 3'deki parametreler, 20°C sıcaklık için değerlendirilmiştir. Sonuç olarak 0.1 M KCl, 0.5 M KCl ve 0.1 M MgCl₂ çözeltilerinin Debye uzunlukları sırasıyla 0.954, 0.427 ve 0.476 nm olarak hesaplanmıştır. Yani tuz çözeltisi ile bentonit arasındaki etkileşimi gösteren difüz çift tabaka kalınlığı, çözeltinin konsantrasyon miktarı ve katyon değeri arttıkça azalmaktadır. Bu değerler ile şişme indeksi arasında korelasyon kurulabilir. 0.1 M KCl, 0.5 M KCl ve 0.1 M MgCl₂ çözeltileri ile test edilen polimer katkısız GKÖ'lerin şişme indeksi sırasıyla 11, 6 ve 7 ml/2g olarak ölçülmüştür. Debye uzunluğu değişiminde olduğu gibi şişme indeksi de çözeltinin konsantrasyon miktarı ve katyon değeri arttıkça azalmıştır. Sonuç olarak tuz çözeltisi ile GKÖ'deki bentonit arasındaki difüz çift tabaka kalınlığı azaldıkça GKÖ'nün şişme kapasitesi de düşmüştür.

4. Sonuç ve Öneriler

Yapılan üç eksenli hidrolik iletkenlik deneyleri sonucunda GKÖ'ye akrilamidin (C₃H₅NO) + yüklü kopolimerlerinden oluşan bir katyonik polimer eklemek, GKÖ'nün permitivitesi ve hidrolik iletkenliğini azaltarak hidrolik performansını yükseltmiştir. Hidrolik iletkenlik, 0.1 M KCl çözeltisindeki %0.5 katyonik polimer katkılı GKÖ'de yaklaşık 0.13 katına düşerek 1.4×10^{-11} m/s, 0.5 M KCl çözeltisindeki %1 katyonik polimer katkılı GKÖ'de yaklaşık 0.18 katına düşerek 3.5×10^{-10} m/s ve 0.1 M MgCl₂ çözeltisindeki %1 katyonik polimer katkılı GKÖ'de yaklaşık 0.08 katına düşerek 7×10^{-11} m/s ölçülmüştür.

Katyonik polimer eklemenin GKÖ'nün hidrolik iletkenliğini düşürmesi, polimerin bentonitin boşluklarını doldurmasına ve tuz çözeltisi ile bentonit arasındaki etkileşim sonucu zeta potansiyelindeki mutlak değerce artışa bağlanabilir.

Belli bir orandan sonra katyonik polimer miktarındaki artış, bazı durumlarda hidrolik iletkenlikte artışa neden olmuştur. Bunun sebebi ise katyonik polimerdeki + iyonların bentonit yüzeyindeki - iyonlarla etkileşimi sonucunda bentonitte agregasyon oluşması ve boşluk oranının artmasına bağlanmıştır.

Tuz çözeltilerinde konsantrasyon ve katyon değeri arttıkça, hidrolik iletkenliği de artırmıştır. GKÖ'ye küttelece %2 katyonik polimer eklemek, şişme indeksini 0.1 M KCl çözeltisi kullanıldığında 11'den 16.5 ml/2g'a, 0.5 M KCl çözeltisi kullanıldığında 6'dan 12.5 ml/2g'a ve 0.1 M MgCl₂ çözeltisi kullanıldığında 7'den 9.5 ml/2g'a yükseltmiştir.

Tuz çözeltilerinde konsantrasyon ve katyon değeri arttıkça, şişme indeksini azaltmıştır. Bunun sebebi, çözeltilerde difüz çift tabaka kalınlığına karşılık gelen Debye uzunluğundaki azalışa bağlanmıştır.

Tuz çözeltileri yerine saf su kullanıldığında GKÖ'nün hidrolik iletkenliği çok daha düşük, şişme indeksi ise çok daha yüksek ölçülmüştür. Saf suda test edilen GKÖ'lere de katyonik polimer eklenmesi, hidrolik performansı artırmıştır.

Sonuç olarak saf su yerine farklı tuz çözeltileri ile temas halindeki GKÖ'nün hidrolik özellikleri bozalsa da GKÖ'ye katyonik polimer eklemek, GKÖ'nün hem hidrolik iletkenliğini azaltarak hem de şişme indeksini artırarak hidrolik performansını olumlu yönde etkilemiştir. 0.1 M KCl çözeltisinde %0.5, 0.5 M KCl çözeltisinde %1 ve 0.1 M MgCl₂ çözeltisinde %1 katyonik polimerin GKÖ'nün bentonit katmanına eklenmesi GKÖ'nün bariyer özelliğini yeterli seviyeye yükseltmiştir. Böylelikle özellikleri verilen katyonik polimer katkılı GKÖ, tuz çözeltilerin mevcut olduğu atık depolama alanlarında kaplama malzemesi olarak kullanılabilir ve oluşabilecek çevre kirliliğinin önüne geçilebilir.

Bu çalışmanın sonuçları değerlendirilerek, tuz çözeltiler dışında atık depolama alanlarından alınabilecek gerçek sızıntı suları veya asidik çözeltiler ile aynı deneyler tekrarlanıp karşılaştırma yapılabilir.

Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından “3501-Ulusal Genç Araştırmacı Kariyer Geliştirme Programı” kapsamında desteklenmiş olup 114M282 No'lu projeden elde edilen sonuçların bir bölümünü kapsamaktadır.

Kaynaklar

- Akbulut S., (2003), *Katı atık depolama alanlarının geoteknik tasarımı*, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9(2), 223-230.
- ASTM D 854, (2014), *Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D 4318, (2010), *Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity Index of Soils*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D 4751, (2016), *Standard test method for determining apparent opening size of a geotextile*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D 5199, (2012), *Standard test method for measuring the nominal thickness of geosynthetics*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D 5261, (2010), *Standard test method for measuring mass per unit area of geotextiles*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D 5890, (2011). *Standard test method for swell index of clay mineral component of geosynthetic clay liners*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D 5993, (2004), *Standard test method for measuring mass per unit of geosynthetic clay liners*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D 6766, (2012), *Standard test method for evaluation of hydraulic properties of geosynthetic clay liners permeated with potentially incompatible aqueous solutions*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Ben-Hur M., Malik M., Letey J., Mingelgrin U., (1992), *Adsorption of polymers on clays as affected by clay charge and structure, polymer properties, and water quality*, Soil Sciences, 153, 349–356.
- 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.
- Bohnhoff G.L., Shackelford C.D., (2014), *Hydraulic conductivity of polymerized bentonite amended backfills*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001034.
- Bouazza A., Gates W.P., (2014), *Overview of performance compatibility issues of GCLs with respect to leachates of extreme chemistry*, Geosynthetics International, 21(2), 151-167.
- Güngör N., Karaolan S., (2001), *Interactions of polyacrylamide polymer with bentonite in aqueous systems*, Materials Letters, 48(3-4), 168-175.
- Haase H., Schanz T., (2016), *Compressibility and saturated hydraulic permeability of clay-polymer composites-experimental and theoretical analysis*, Applied Clay Science, doi:10.1016/j.clay.2016.01.020.
- Jo H.Y., Benson C.H., Shackelford C.D., Lee J.M., Edil, T.B., (2005), *Long-term hydraulic conductivity of a geosynthetic clay liner permeated with inorganic salt solutions*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 131(4), 405–417.
- Jozefaciuk G., Matyka-Sarzynska D., (2006), *Effect of acid treatment and alkali treatment on nanopore properties of selected minerals*, Clay Minerals, 54(2), 220-229.
- Katsumi T., Ishimori H., Onikata M.K., Fukagawa R., (2008), *Long-term barrier performance of modified bentonite materials against sodium and calcium permeant solutions*, Geotextiles and Geomembranes, 26, 14–30.
- Koerner R.M., (2005), *Designing with Geosynthetics* (5th ed.), Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, United States of America, 816 ss.
- Koerner R.M., Daniel D.E., (1995), *A suggested methodology for assessing the technical equivalency of GCLs to CCLs*, Koerner R.M., Gartung E., Zanzinger H., (Eds.), Geosynthetic Clay Liners. Balkema, Rotterdam, ss. 73-98.
- Lee J.M., Shackelford C.D., (2005), *Concentration dependency of the prehydration effect for a geosynthetic clay liner*. Soils and Foundations, 45(4), 27-41.
- Liu Y., Gates W.P., Bouazza A., (2012), *Effectiveness of polymers on improving the fluid loss of bentonite used in geosynthetic clay liners*, Proc., Australian Regolith and Clay Conference, Mildura, 1, ss. 75-78.
- Liu Y., Gates W.P., Bouazza A., (2013), *Acid induced degradation of the bentonite component used in geosynthetic clay liners*, Geotextiles and Geomembranes, 36(2-4), 71-80.

- Mazzieri F., Di Emidio G., Fratalocchi E., Di Sante M., Pasqualini E., (2013), *Permeation of two GCLs with an acidic metal-rich synthetic leachate*, Geotextiles and Geomembranes, 40, 1-11.
- McBride M.B., (1997), *A critique of diffuse double layer models applied to colloid and surface chemistry*, Clays and Clay Minerals, 45(4), 598-608.
- Mendes M.J.A., Touze-Foltz N., Palmeira E.M., Pierson P., (2010), *Influence of structural and material properties of GCLs on interface flow in composite liners due to geomembrane effects*, Geosynthetics International, 17(1), 34-47.
- Önen V., Göçer M., (2016), *Simektit süspansiyonlarının bazı elektrolit ve polimer solüsyonları içerisinde sedimentasyon ve elektrokinetik özellikleri*, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16, 399-408.
- Ören A.H., Demirkıran H., (2015), *Geosentetik kil örtülerin hidrolik iletkenliklerinin laboratuvarında belirlenmesi üzerine bir çalışma*, İMO Teknik Dergi, 440, 7191-7213.
- 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.
- Razakamanantsoa A.R., Barast G., Djeran-maigre I., (2012), *Hydraulic performance of activated calcium bentonite treated by polyionic charged polymer*, Applied Clay Science, 59-60, 103-114.
- Razakamanantsoa A.R., Djeran-maigre I., Barast G., (2014), *Characterisation of bentonite polymer for bottom liner use*, Environmental Geotechnics, 3(1), 28-35.
- Scalia J., Benson C.H., (2011), *Hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners exhumed from landfill final covers with composite barriers*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000407.
- 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, doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001040, 04013025.
- Shackelford C.D., Sevick G.W., Eykholt G.R., (2010), *Hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners to tailings impoundment solutions*, Geotextiles and Geomembranes, 28(2), 149-162.
- SNF Türkiye, (2016), *Technical data sheet for anionic polymers*, Kucukcekmece-Istanbul, Turkey.
- Studds P.G., Stewart D.I., Cousens T.W., (1996), *The effect of ion valence on the swelling behavior of sodium bentonite*, Proceedings of the Fourth International Conference on Re-use of Contaminated Land and Landfills, Edinburgh, ss. 139-142.
- Theng B.K.G., (2012), *Formation and properties of clay-polymer complexes* (2nd ed.), Developments in Clay Science, 4, Elsevier, Amsterdam, 511 ss.
- Tian K., Benson C.H., Likos W.J., (2016), *Hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners to low-level radioactive waste leachate*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001495, 04016037.
- Van de Wiel H.J., (2003), *Determination of elements by ICP-AES and ICP-MS*, National Institute of Public Health and the Environment (RIVM) Bilthoven, The Netherlands, Horizontal-19, September 2003, 37 ss.
- Villar M.-V., Lloret A., (2004), *Influence of temperature on the hydro-mechanical behaviour of a compacted bentonite*, Applied Clay Science, 26(1), 337-350.
- Vukelic A., Szavits-Nossan A., Kvasnicka P., (2008), *The influence of bentonite extrusion on shear strength of GCL/geomembrane interface*, Geotextiles and Geomembranes, 26(1), 82-90.
- Wang S., Zhu W., Qian X., Xu H., Fan X., (2016), *Temperature effects on non-Darcy flow of compacted clay*, Applied Clay Science, 135, 521-525.
- Weber C.T., Zornberg J.G., (2005), *Leakage through liners under high hydraulic heads*, Proceedings GRI-18 at Geofrontiers, ASCE, Austin, TX., ss. 1-7.
- Yılmaz G., Arasan S., Yetimoğlu T., (2008), *Katı depolama alanlarındaki taban kil şiltelerinin geçirimsizliklerine NaCl tuzunun etkisi*, İMO Teknik Dergi, 286, 4347-4356.