

ANYONİK POLİMERİN KAOLİN KİLİNİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİHakkı O. Özhan^[*]**Özet**

Kaolin, feldspat minerali içeren kayaların ufalanması sonucu oluşan ve arazide sıkça karşılaşılan bir kil türüdür. Killer, hidrolik performansları değerlendirildiğinde atık depolama alanlarında yalıtım malzemesi olarak kullanılmaktadırlar. Şişme kapasitesi çok yüksek olmadığından kaolinin hidrolik özellikleri, katkı malzemeleri ile geliştirilebilmektedir. Bu çalışmada kaoline kütlece 1%, 2% ve 4% oranlarında anyonik polimer eklenmiş karışım üzerinde Atterberg limitleri, serbest şişme ile düşey yönlü konsolidasyon deneyleri yapılarak kaolinin bazı mühendislik özellikleri irdelenmiştir. Deney sonuçlarına göre kaolinin likit limiti ve plastisite indeksi, eklenen polimer miktarı arttıkça yükselmiştir. Yani kaolinin plastisite özellikleri anyonik polimer ile artırılmış olup hidrolik yapısının da iyileştirilmiş olması beklenmiştir. Sonrasında yapılan serbest şişme deney sonuçlarına göre 1 ml/2g gibi çok düşük şişme indeksine sahip olan kaolinin şişme indeksi 1% anyonik polimer eklenmesi ile 7 ml/2g'a yükselmiştir. Fakat 2% ve 4% anyonik polimer eklenmesinin kaolinin şişme kapasitesine önemli bir katkısı olmamıştır. Eklenen iki polimer miktarında da şişme indeksi, sadece 1 ml/2g artarak 8 ml/2g olmuştur. Konsolidasyon deney sonuçlarına göre ise 2% oranında anyonik polimer eklenmesi kaolinin geçirimsizlik katsayısını yaklaşık 2 merteye düşürmüş olup hidrolik performansını önemli oranda artırmıştır. 4% oranında anyonik polimer eklenmesi ise geçirimsizlik katsayısını sadece önemsenmeyecek miktarda azaltmıştır.

Anahtar Kelimeler: Anyonik polimer, Hidrolik geçirimsizlik katsayısı, Kaolin, Plastisite indeksi, Şişme indeksi

Effects of Anionic Polymer on Engineering Properties of Kaolini

Abstract: Kaolinite is a type of clay that occurs after the crumbling of rocks containing feldspar minerals and is frequently encountered in the field. Clays are used as barrier materials in waste containment areas. Since the swelling capacity is not very high, the hydraulic properties of kaolinite can be improved by additives. In this study, some engineering properties of kaolinite were investigated by performing Atterberg limit, free swell and one-dimensional consolidation tests on the mixture of 1%, 2% and 4% anionic polymer-added kaolinite by mass respectively. According to the Atterberg limit test results, liquid limit and plasticity index of kaolinite increased as the amount of added polymer increased. In other words, the plasticity properties of kaolinite were increased by anionic polymer and the hydraulic structure was expected to be improved. The swelling index of kaolinite, which had a very low value of 1 ml/2g, was increased to 7 ml/2g by the addition of 1% anionic polymer. However, the addition of 2% and 4% anionic polymer did not contribute significantly to the swelling capacity of kaolinite. The swelling index was only 8 ml/2g for both of 2% and 4% anionic polymer added kaolinite, increasing by only 1 ml/2g. According to the consolidation test results, the addition of 2% of anionic polymer decreased the permeability coefficient of kaolinite by about two orders of magnitude and increased the hydraulic performance significantly. However, the addition of 4% of anionic polymer reduced the permeability coefficient to an insignificant amount.

Keywords: Anionic polymer, Kaolinite, Plasticity index, Permeability coefficient, Swell index

[*] İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi,
Altınbaş Üniversitesi
hakkiozhan@altinbas.edu.tr

1. GİRİŞ

Kaolin, yüksek miktarda feldspat minerali içeren ve silis ile alüminyum tabakalarından oluşmuş bir kil türüdür (Taşpolat vd., 2006). $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ şeklindeki kimyasal yapısıyla kaolin, genellikle Al_2O_3 ile SiO_2 mineralleri içeren kayaçların kil boyutunda ufalanması sonucu beyaz ve pembe renklerde doğada yer almaktadır. Türkiye’de doğal halde bulunan killerin önemli miktarını kaolin oluşturmaktadır. Aşındırıcı özelliği, ısı ve elektriği çok az iletmesi, benzer malzemelerden daha ucuz olması ve çok iyi kaplama malzemesi özelliğinden dolayı kaolin, önemli bir endüstriyel hammaddedir. Özgül yüzey alanı (5-30 m²/gr) ve katyon değiştirme kapasitesi (5-15 meq/100 gr) oldukça düşük değerlerdedir. Kaolin plakalarının tabakaları arasındaki mesafenin çok az olması, kaolinin su ile temasında fazla şişmemesini sağlar (Tuller ve Dani, 2004; Koyuncu ve Güney, 2003). Bu yönüyle porselenin ana bileşeni olarak seramik endüstrisinde tercih edilen bir kil türüdür. Bunun yanı sıra diş macunu ve sabun yapımında, kozmetikte de sıkça kullanılan kaolin, inşaat mühendisliği uygulamaları bakımından su ve atık su toplama havzalarında temas ettiği sıvıyı emici özelliği ile tercih edilmektedir (Tuller ve Dani, 2004). Kaolinin farklı zemin malzemeleri ile karıştırılması sayesinde de zeminlerin mekânîk özelliklerini artırdığı bilinmektedir (Huertas vd., 1999; Chen vd., 2000). Kimyasal yapısından dolayı kaolin parçacıkları kolay kolay birbirinden ayıramaz ve parçalanamaz. Böylelikle sağlam bir bariyer malzemesi olarak kullanılabilir (Trevino ve Coles, 2003). Yüksek moleküler stabilitesi sayesinde kaolin, fazla genişmez ve şişmez. Ayrıca kimyasal içeren atıklarla temasta katyon değişimi çok düşük mertebelerde kalmaktadır (Mitchell, 1993) ve kaolin, kimyasallarla en az düzeyde reaksiyona giren kil grubudur (Suraj vd., 1998). Bazı kaolinlerin plastiklik özelliklerinin çok düşük olmasına ve plastisite indekslerinin 10’dan küçük olmasına rağmen kaolin türlerinin büyük bir çoğunluğu plastiklik özelliği gösterir. Daha iri daneli parçacıklardan oluşan ve yüksek oranda kristalleşmiş bir kil grubu olan hidrotermal kaolinler, genellikle düşük plastisitede olup alüvyonlu kaolinler ise yüksek plastisitededir ve seramik üretiminde tercih edilmektedir (Bain, 1971).

Katı ve sıvı atık depolama alanlarında meydana gelen problemlerin başında tabana ulaşım yeraltına karışması muhtemel olan yüksek kirlilik derecesine sahip atık suları gelmektedir. Bu sorunu önlemek için depolama tabanını sıkıştırılmış kil katmanlar ile doldurmak gerekmektedir. Sıkıştırılmış kil katmanları, bariyer özelliği sayesinde katı atık depolama alanları, atık suyu lagünleri, su tutma rezervuarları gibi farklı uygulamalarda kullanılmaktadır (Day vd., 1985). Bu kil katmanlarının atık sulara karşı düşük permeabilitede ve dış etkenlere karşı yüksek dayanımda olması beklenmektedir (Taşpolat vd., 2006). Çok düşük permeabilite ve yüksek şişme kapasitesi ile bentonit kili, kaplama malzemesi olarak en çok tercih edilen kil türüdür. Bentonitin doğal ortamda bulunmadığı veya temininin zor olduğu durumlarda kaolin kili de bariyer özellikleri ile atık depolama alanlarında kullanılabilir. Ayrıca bentonit, kimyasallarla etkileşime girdiğinde yüksek katyon değiştirme potansiyeli nedeniyle hidrolik performansını kaybedebilir. Kaolinde böyle bir sorunla karşılaşmamıştır. Kil katmanlarının kimyasal maddeler ile temas ettiğinde, kimyasal ve kil arasındaki katyon değişimi yüzünden permeabilitesinin artması olası bir durumdur (Güler vd., 1995). Sıkıştırılmış kil katmanlarının geçirimsizlik katsayısı 1×10^{-7} cm/s’den fazla olmamalıdır (Daniel ve Benson, 1990). Türkiye’de ise Katı Atık Yönetmeliği’ne göre atık depolama alanlarında kullanılan kil katmanlarının geçirimsizlik katsayısı 1×10^{-6} cm/s’den az ve kalınlığı 60 cm’den fazla olmalıdır (Güler ve Avcı, 1993). Atık suları ile yer altı sularının kirlenmesi veya yalıtımının yeterli oranda yapılamaması, çevre ve yaşam sağlığı

bakımından önemli bir tehlike oluşturmaktadır. Atıklar, yüksek oranda ağır metal, yağ, tuz ve organik bileşen içerebilir. Bu atıkların zeminle teması sonucunda zemin özellikleri değişebilir (Koyuncu ve Güney, 2003).

900.000 m²'lik bir alanda oluşturulan İzmir'deki Harmandalı çöp atık depolama sahasının tabanında çatlaklar ve kırıklar belirlenmiştir. Katı atıkların, yeraltı suyuna etkilerini araştırmak için derinlikleri 30 metreye ulaşan gözlem kuyuları açılmıştır. Bu kuyulardan alınan örnekler sayesinde yeraltı suyunun önemli oranda kirlendiği belirlenmiştir (Koyuncu ve Güney, 2003).

New Jersey'deki bulunan bir endüstriyel tesisin atıkları beş farklı depolama alanında toplanmaktadır. Bentonit kilinden oluşan bu katmanların kalınlıkları 0.60-6.10 m aralığındadır. Tabandaki kilde geniş çatlak veya boşluklar oluşmuş ve bu sayede permeabilite yükselmiştir. Bunun nedeni işe atıkların içerdiği organik kimyasalların zamanla bentonitin permeabilitesini artırmasıdır (Koyuncu ve Güney, 2003).

Polimerler, ufak moleküllerin birbirlerine tekrarlar halinde kenetlenmesi sonucunda oluşan ve gelişmiş malzeme özellikleri gösteren büyük moleküllerdir (Jensen ve William, 2008). Polistren gibi sentetik plastikler ya da DNA ile protein gibi biyolojik yapıtaşları olan biopolimerler, sentetik ve doğal polimerlere en önemli örneklerdir (McCrum vd., 1997). Anyonik polimerlerde molar kütle yönünden suda çözünebilir negatif yüklü iyonlar pozitif yüklülerden daha fazladır; katyonik polimerlerde ise tam tersi olarak pozitif yüklü iyonlar daha fazladır (Ozhan, 2016).

Liu vd. (2012a) tarafından katyonik polimer katkı sodyum bentonit üzerinde yapılan sıvı kaybı deneyleri sonucunda katyonik polimer katkısı, bentonitin hidrolik performansını kötüleştirmiştir. Bu deneylerde deiyonize su ile temasta tutulan bentonite 0.5%, 1% ve 2% oranlarında polimer eklenmiştir. Ayrıca aynı bentonite aynı oranlarda anyonik polimer katılarak da sıvı kaybı deneyleri yapılmıştır. Katyonik polimerden farklı olarak anyonik polimer, bentonitin hidrolik geçirimsizliğini 1% oranında polimer eklenmesi durumuna kadar azaltmış ve 2% ile 1% anyonik polimer katkı bentonitten yaklaşık olarak aynı hidrolik performans elde edilmiştir. Yani bentonite 1%'e kadar anyonik polimer eklemek, hidrolik geçirimsizlik bakımından en iyi sonucu almak için yeterli bulunmuştur. Liu vd. (2012b) başka bir çalışmada ise hem katyonik hem de anyonik polimer katkı toz halindeki sodyum bentonit üzerinde yine deiyonize su ile temasta iken serbest şişme deneyleri yapmışlardır. Sonuçlara göre bentonite 2% oranına kadar anyonik polimer eklemek şişme indeksini azaltarak hidrolik performansı kötüleştirmiştir. Katyonik polimer eklenmesi ise ilk başta 0.5% oranına kadar şişme indeksini azaltmış sonrasında ise 2% oranında polimer eklenmesine kadar artırmıştır. Yani katyonik polimer eklemek, bentonitin şişme kapasitesini ilk önce azaltıp sonrasında artırarak bariyer özelliklerini iyileştirmiştir.

Bu çalışmanın amacı, inşaat mühendisliği uygulamalarında bentonit kadar sıkça kullanılmayan kaolin kilinin düşük şişme kapasitesi gibi istenmeyen bir özelliğine rağmen uzun vadede atık suyunda bulunan kimyasallarla gireceği reaksiyon sonucu hidrolik performansında çok fazla kayıp olmayacağı gerçeği ışığında bazı mühendislik özelliklerinin irdelenmesidir. Kaolinin hidrolik performansını iyileştirmek için içine sırasıyla kütlece 1%, 2% ve 4% oranlarında bir anyonik polimer katılmış sonrasında da likit limit, plastik limit, serbest şişme ve düşey yönlü konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Bu sayede eklenen anyonik polimerin kaolinin hidrolik performansını ne ölçüde artırabileceği ortaya konulmuştur.

2. MALZEMELER VE YÖNTEM

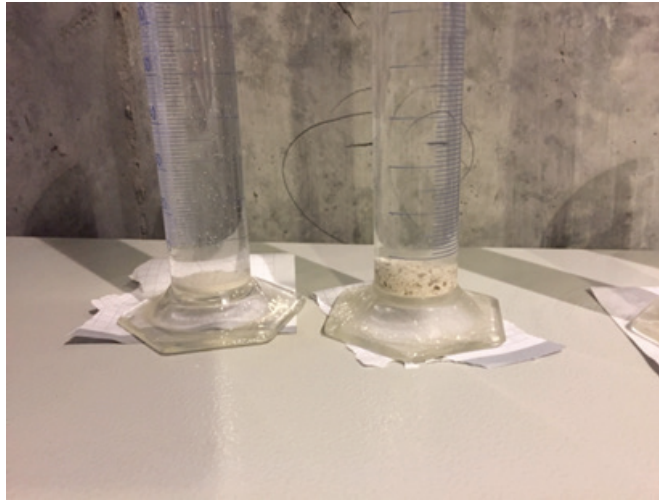
Bu çalışmada kullanılan kil, beyaz renkte, toz halinde, 2.59 özgül ağırlığa sahip kaolin türü kil olup içerisindeki kil taneleri oranı 68% ve silt taneleri oranı ise 32% şeklindedir. Bu kaoline katılan anyonik polimer ise suda çözünebilir, toz halinde, 0.80 özgül ağırlığa ve $[-CH_2-CH(CO_2Na)-]_n$ kimyasal formülüne sahip sodyum poliakrilat bileşeninden oluşan bir polimerdir. Poliakrilik asidin sodyum içerikli tuz yapısındaki hali, bu anyonik polimerin karşılığı olmakta ve sudaki ağırlığının yaklaşık 200-300 katını absorbe edebilmektedir (King, 2015). Resim 1’de bu çalışmada kullanılan kaolin sol tarafta, anyonik polimer ise sağ tarafta gösterilmektedir.



Resim 1. Kaolin ve Anyonik Polimer

Kaolin, etüvde $105^{\circ}C$ 'de yaklaşık 24 saat bekletildikten sonra tamamen su muhtevassından arınmış halde ilgili deneylerde kullanılmıştır. İlk önce Atterberg Limit Deneyleri kapsamında likit limit ve plastik limit deneyleri ASTM D4318 (2010) standardına uygun olarak, sırasıyla polimer katkısız kaolin, 1%, 2% ve 4% anyonik polimer katkılı kaolin üzerinde yapılmıştır. Likit limit deneyleri kapsamında 0.425 mm açıklıklı elekten geçirilen kaolin ve anyonik polimer katkılı kaolin malzemesi yaklaşık 100 gram alınarak bu malzemeye, macun kıvamına gelene kadar deiyonize su eklenmiştir. Su eklenen malzeme, kap içerisinde spatula ile karıştırılmıştır. Sonrasında macun kıvamındaki malzeme, Casagrande aletinin pirinçten yapılmış tabanına konulmuş ve spatula ile aletin içinin yarısından biraz fazlası doldurularak düzleştirilmiştir. Oluk açma bıçağı ile malzeme, arada boşluk bırakılarak iki eşit parçaya ayrılmıştır. Saniyede iki vuruş yapacak hızda yatay kol döndürülerek malzemenin ayrılmış iki parçasının oluk tabanında yaklaşık 13 mm birleşmesini sağlayacak düşüş sayısı saptanmıştır. Su muhtevası belirlenmesi için kapanan bölgeden numune alınmıştır. Casagrande aletinde kalan malzeme, karıştırma kabına alınıp su muhtevasını değiştirecek şekilde malzemeye ya su ya da kuru malzeme eklenmiştir. Önceki denemede vuruş sayısını artırmaya yönelik, karışıma kuru malzeme; vuruş sayısını azaltmaya yönelik ise su eklenmektedir. Aynı şekilde 10-45 vuruş sayısına denk gelerek üç farklı su muhtevassından numune alınmış ve likit limit tayini yapılmıştır. Elde edilen vuruş sayısı ve karşılık gelen su muhtevası değerlerinden akış eğrisi oluşturulmuş ve akış eğrisinde

darbe sayısı logaritmik olarak apsisde, su muhtevası aritmetik olarak ordinatta gösterilmiştir. Akış eğrisinde 25 darbeye karşılık gelen su muhtevası değeri, o zeminin likit limitini vermiştir (ASTM D4318, 2010). Sonrasında likit limit deneyi için hazırlanan numuneden bir miktar alınıp düz bir plaka üzerinde el ile yoğrulma işlemi yapılmıştır. Bu sayede zeminin su muhtevası daha da azaltılıp plastik limit kıvamına gelmesi sağlanmaktadır. Amaç, bu işlemin sonunda 3 mm çapında zeminden çubuklar elde edebilmektir. Sonuçta zemini sürtünme ile yoğurma işlemine Polimer katkılı kaolin elde edebilmek için etüvde tamamen kuru hale getirilmiş kaoline, sırasıyla kaolin ile polimer karışımının toplam kütlelerinin 1%, 2% ve 4% oranında anyonik polimer eklenmiştir. Bu oranlara sahip karışımlar, ağzları tıpa ile kapatılan polietilen şişelere konulmuş ve yaklaşık 5 dakika süreyle el ile sallanmıştır. Sonrasında ise yaklaşık 24 saat bekletilerek karışımın homojen hale gelmesi sağlanmıştır (Razakamanantsoa vd., 2012). Serbest şişme deneylerinde 0.150 mm açıklığı olan elekten tamamı ve 0.074 mm açıklığı olan elekten 65%'i geçen, etüvde tamamen kuru hale getirilmiş 2 gr'lık kaolin ve kaolin ile ilgili oranlarda kaolin-anyonik polimer karışımları, Resim 2'de görüldüğü üzere derecelenmiş silindirik tüplere dökülmüştür (ASTM D5890, 2011). Tüpler, numune dökülmeden önce 90 ml'lik seviyeye kadar deiyonize su ile doldurulmuştur. Numune kaşığı ile her seferde yaklaşık 0.1 gr numuneyi tüpe dökmek suretiyle ve yaklaşık 10 dakika bekleyerek dökülen karışımın çökmesi sağlanmıştır. Son olarak, bütün numune tüpe döküldükten sonra su seviyesi, biraz daha su eklenerek 100 ml'ye çıkartılmıştır. Polimer katkısız kaolinin şişme indeksi okuması, son numune eklenmesinden 24 saat sonra; polimer katkılı kaolinin şişme indeksi okuması ise 72 saat sonra alınmıştır. Polimer katkılı kaolinde okumanın daha geç alınmasının nedeni, polimerin etkisiyle şişmenin bir süre daha devam etme olasılığıdır (ASTM D5890, 2011).



Resim 2. Kaolin ile 1% Anyonik Polimer Katkılı Kaolinin Şişme İndeksi Ölçümü

Kaolinin ve kaolin-anyonik polimer karışımlarının hidrolik geçirimsizlik katsayısı (m/s) ise ASTM D2435 (2011) standardına uygun şekilde yapılan düşey yönlü konsolidasyon deneyi ile elde edilmiştir. Bu deneyde, çapı 9.7 cm ve yüksekliği 3 cm olan ve paslanmaz çelikten üretilmiş silindirik halkalara ilgili numuneler, istenilen karışım oluşturulduktan sonra yerleştirilmiş, sonrasında da odometre hücresi içerisine konulmuştur.

Ödometre hücresine yerleştirilirken numunenin altına ve üstüne poroz taş yerleştirilerek zemin içerisindeki suyun düşey doğrultuda dışarı çıkması sağlanmış ve uygulanan düşey yükler altında oluşan düşey şekil değiştirmeler, okuma saati ile zamana bağlı olarak ölçülmüştür. Bu deneydeki asıl amaç hidrolik geçirimsizlik katsayısını bulup zeminin hidrolik performansı hakkında bilgi edinmek olduğundan şekil değiştirme parametreleri verilmemiştir. Numune, deney boyunca ödometre hücresinin deiyonize su ile doldurulması sayesinde tamamen suya doygun halde tutulmuştur. Arazideki zemin katmanlarının düşey yüklemeler altında sıkışması, genellikle düşey doğrultuda tek boyutlu bir sıkışma olduğundan laboratuvarında yapılan bu deneyde, zeminin yanal yönde şekil değiştirmesine izin verilmemiş olup belirli düşey yükler altında, zemindeki kısalma miktarı ölçülmüştür (ASTM D2435, 2011). Hidrolik geçirimsizlik katsayısı, arazide oluşabilmesi muhtemel iki farklı yük kademesi altında hesaplanmış olup öncelikle 123 kPa basınç altında zamana bağlı şekil değiştirme ölçümleri alınmış sonrasında ise yüklemeye artırılarak 491 kPa altında tekrardan şekil değiştirme ölçümleri alınmış ve böylelikle her numune için iki adet hidrolik geçirimsizlik katsayısı hesaplanmıştır.

Düşey yönlü konsolidasyon deneyleri sonucunda hidrolik geçirimsizlik katsayısı (k) aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır (ASTM D2435, 2011):

$$k = m_v \times c_v \times \gamma_w \quad (1)$$

Bu denklemde m_v (1/kPa), hacimsel sıkışabilirlik katsayısına, C_v (m^2/s), konsolidasyon katsayısına, γ_w (kN/m^3) ise suyun özgül birim hacim ağırlığına karşılık gelmektedir ve 9.81 kN/m^3 olarak alınmaktadır.

m_v parametresi ise şu şekilde hesaplanmıştır (ASTM D2435, 2011):

$$m_v = \frac{1}{1 + e_0} \times \frac{\Delta e}{\Delta \sigma} \quad (2)$$

Bu denklemde ise e_0 , deneye başlamadan önce numunenin boşluk oranını, Δe , ölçüm alındığındaki yüklemeye ve bir önceki yüklemeye arasındaki boşluk oranı farkını, $\Delta \sigma$ (kPa) ise ölçüm alındığındaki yüklemeye ve bir önceki yüklemeye arasındaki normal gerilme farkını vermektedir.

C_v (m^2/s) parametresi aşağıdaki denklem ile elde edilmiştir (ASTM D2435, 2011):

$$C_v = \frac{T_v \times H_d^2}{t} \quad (3)$$

Bu denklemde T_v , 50% konsolidasyon için zaman faktörünü vermekte ve ilgili tablodan alınarak 0.197 olarak kullanılmakta (ASTM D2435, 2011), H_d (m), drenaj uzunluğuna karşılık gelmekte ve her iki yüzey de geçirimli olduğundan numune boyunun yarısı olarak alınmakta, t (s) ise 50% konsolidasyonun gerçekleştiği süreyi vermektedir.

3. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu bölüm de Deney sonuçları yorumlanmıştır.

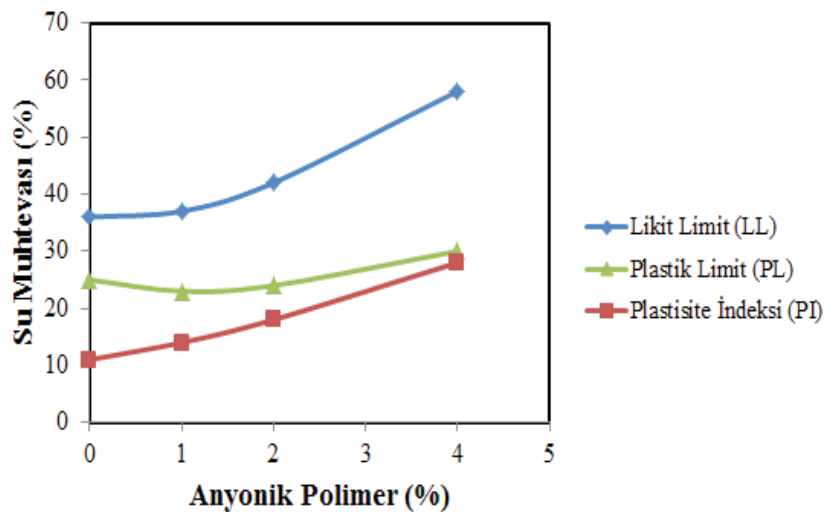
3.1 Atterberg Limitleri Deney Sonuçları

Tablo 1'de verildiği üzere Atterberg limitleri kapsamında yapılan likit limit ve plastik limit deney sonuçlarına göre kaoline anyonik polimer eklemek, likit limiti artırmaktadır.

Tablo 1. Kaolin ile Kaolin-Anyonik Polimer Karışımlarının Atterberg Limit Deney Sonuçları

	KAOLİN	KAOLİN+1% ANYONİK POLİMER	KAOLİN+2% ANYONİK POLİMER	KAOLİN+4% ANYONİK POLİMER
LİKİT LİMİT	36	37	42	58
PLASTİK LİMİT	25	23	24	30
PLASTİSİTE İNDEKSİ	11	14	18	28

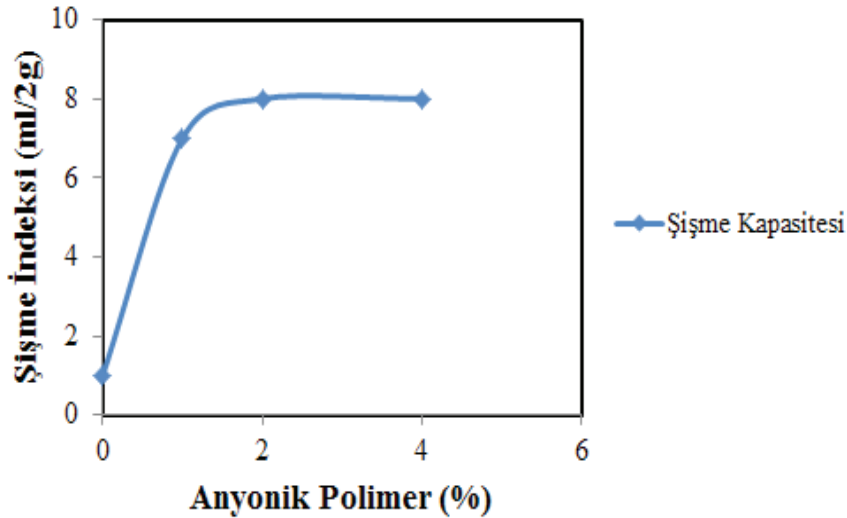
Bu artış, 1% polimer eklendiğinde sadece 1 iken 2% polimer eklendiğinde 5, 4% polimer eklendiğinde ise 16 olmuştur. Yani eklenen anyonik polimer miktarı arttıkça karışımın likit limit değeri de doğrusal olmayarak artmıştır. Bu artış, plastisite indeksi için de aynı şekilde olmuştur. Plastik limit değeri ise, 1% polimer eklendiğinde 2 azalmış, 2% polimer eklendiğinde ise 1 artmıştır. Yani kaoline 2%'ye kadar anyonik polimer eklemek neredeyse plastik limiti değiştirmemiştir. Fakat 4% anyonik polimer eklendiğinde plastik limit önemli oranda artmıştır. Resim 3'de ise kaolin ile kaolin-anyonik polimer karışımlarının Atterberg limitlerindeki su muhtevaları dağılımları görülmektedir. Bu sonuçlara göre kaolinin likit limit ile plastisite indeksi, kaoline anyonik polimer eklendikçe artmaktadır. Başka bir deyişle kaolinin plastiklik performansı yükselmiştir. Plastik özelliklerin artması, hidrolik özelliklerle doğru orantılıdır. Kaoline anyonik polimer katıldığında karışımın daha fazla plastik davranması, hidrolik performansının da iyileştiğini göstermektedir.



Resim 3. Kaolin ile Anyonik Polimer Katkılı Kaolinin Atterberg Limitleri Dağılımı

3.2 Serbest Şişme Deneş Sonuçları

Serbest şişme deneyi sonuçlarına göre polimer katkısız kaolinin şişme indeksinin 1 ml/2g olarak ölçülmüştür. Bu değer, kaolin kili için beklenildiği gibi çok düşük bir değerdir. Kaoline sırasıyla 1%, 2% ve 4% anyonik polimer eklendiğinde ise şişme indeksi 7 ml/2g, 8 ml/2g ve 8 ml/2g olmuştur. Yani kaoline 1% anyonik polimer eklemek, neredeyse 4% eklemek ile aynı sonucu vermiştir. Kaoline anyonik polimer eklenmesi, kaolinin şişme kapasitesini önemli oranda artırmıştır. Yapılan deneyler için şişme indeksi dağılımı Şekil 4’de verilmiştir. Şekil 4’de görüldüğü üzere, kaoline 1%’e kadar anyonik polimer eklenmesi, kaolinin maksimuma yaklaşık oranda şişme kapasitesini geliştirmiştir. Sonuç olarak çok düşük şişme kapasitesi olan kaolinin şişme indeksi, anyonik polimer eklendiğinde yaklaşık 7-8 kat artmıştır. Bu artış, kaolinin içerisine anyonik polimer katılarak bariyer malzemesi olarak kullanılabilceğini göstermektedir. Temas ettiği sıvı ile etkileşimi sonucu şişebilen zeminlerin izolasyon amaçlı kullanılabilirliği daha fazladır. Bu kapasite, kaolin için sadece 1% anyonik polimer ile kullanıldığında geçerli olmuştur. 2% veya 4% polimer eklenmesi, kaolinin bariyer özelliğini önemsenmeyecek miktarda artırmıştır. Bentonit ile karşılaştırıldığında kaolinin şişme kapasitesi çok düşüktür. Ozhan (2011) tarafından yapılan çalışmada kalsiyum bentonitin polimer katkısız halde şişme indeksinin 20 ml/2g olarak ölçüldüğünü değerlendirdiğimizde, bu çalışmada elde ettiğimiz şişme indeksi değerlerinin düşük seviyelerde kaldığını gözlemlese de kaolinin atık sıvılar ile etkileşiminde hidrolik geçirimsizliğinin ve şişme kapasitesinin bentonite kıyasla çok az etkilenmesi, uzun vadede anyonik polimer katkılı kaolinin hidrolik performansının yeterli seviyelerde olabileceğini göstermektedir.



Şekil 4. Kaolin ile Anyonik Polimer Katkılı Kaolinin Şişme İndeksi Dağılımı

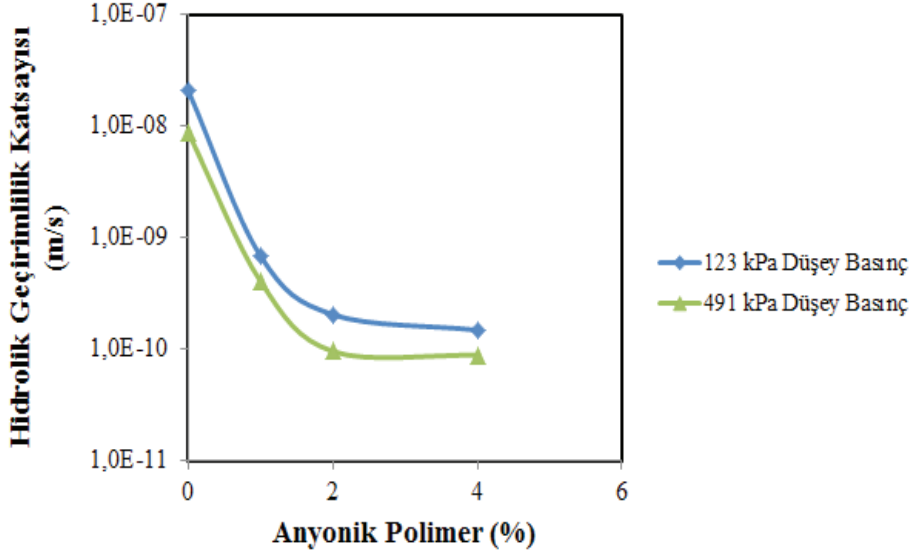
3.2 Düşey Yönlü Konsolidasyon Deneş Sonuçları

Düşey yönlü konsolidasyon deneyleri sonucunda elde edilen yardımcı parametreler ve hidrolik geçirimsizlik katsayıları, anyonik polimer eklemenin kaolinin permeabilitesini önemli ölçüde azalttığını Tablo 2’de

göstermektedir. 123 kPa düşey basınç altında kaolinin hidrolik geçirimsizlik katsayısı 2.07×10^{-8} m/s gibi atık toplama alanlarında kullanım için yüksek bir değerken sırasıyla 1%, 2% ve 4% anyonik polimer katkılı kaolinde bu parametre 6.82×10^{-10} m/s, 2.04×10^{-10} m/s, 1.48×10^{-10} m/s olarak ölçülmüştür. Sonuç olarak 4% polimer eklendiğinde, polimer katkısız kaoline kıyasla hidrolik geçirimsizlik katsayısında iki mertebeden biraz daha fazla bir azalma olmuştur. Benzer şekilde 491 kPa düşey basınç altında kaolinin hidrolik geçirimsizlik katsayısı 8.7×10^{-9} m/s iken 1% anyonik polimer eklendiğinde 4.04×10^{-10} m/s, 2% eklendiğinde 9.55×10^{-11} m/s ve 4% eklendiğinde 8.81×10^{-11} m/s olmuştur. 4% anyonik polimer eklemek, kaolinin hidrolik geçirimsizliğini iki mertebe oranında azaltmıştır. Sonuçları incelediğimizde kaoline 1% kadar anyonik polimer eklenmesi, permeabiliteyi yaklaşık bir buçuk mertebe düşürerek aslında yeterli miktarda hidrolik performans sağlamaktadır. Bu oranı 2%'ye sonrasında da 4%'ye artırdığımızda yaklaşık yarım mertebelik bir azalma daha ölçülmüştür. Tahminen eklenen anyonik polimer miktarını 4%'ün üzerine çıkartırsak permeabilite çok az bir miktar daha azalacak fakat bu azalmanın hidrolik performansa etkisi, pek de hissedilecek bir oranda olmayacaktır. Sonuçlar incelendiğinde, 2% ile 4% anyonik polimer eklemek arasında Resim 5'de de görüldüğü üzere hidrolik geçirimsizlik katsayısında yaklaşık 0.1 mertebelik bir değişim gözlemlenmiş ve sonuç olarak kaoline 2% oranında anyonik polimer eklemek, hidrolik özellikler bakımından optimum çözümü sunmuştur. Anyonik polimer eklemenin kaolinin hidrolik geçirimsizliğini azaltması, polimer parçacıklarının su ile temas ederek kaolinin mevcut boşluklarını doldurarak kil yapısının boşluk oranını önemli oranda azaltmasına bağlanabilir. Tablo II'de de listelendiği gibi, kaolinin başlangıç boşluk oranı (e_0), kaoline eklenen anyonik polimer miktarı arttıkça azalmaktadır. Benzer şekilde, iki yükleme arasında oluşan boşluk oranı farkı (Δe) da azalmaktadır. Konsolidasyon katsayısı ise (C_v), kil malzemeye etkileyen düşey basınç arttıkça artmaktadır. Fazla yükleme, kaolin ile kaolin-polimer karışımını daha fazla sıkıştırmakta ve konsolidasyon miktarını temsil eden katsayıyı artırmaktadır.

Tablo II. Kaolin ile Kaolin-Anyonik Polimer Karışımlarının Hidrolik Geçirimsizlik Değerleri ve Yardımcı Parametreler

	KAOLİN		1% ANYONİK POLİ-MER KATKILI KAOLİN		2% ANYONİK POLİ-MER KATKILI KAOLİN		4% ANYONİK POLİ-MER KATKILI KAOLİN	
	123 kPa	491 kPa	123 kPa	491 kPa	123 kPa	491 kPa	123 kPa	491 kPa
e_0	2,239	2,239	1,664	1,664	1,046	1,046	0,885	0,885
Δe	0,200	0,150	0,020	0,020	0,010	0,010	0,007	0,008
$\Delta \sigma$ (kPa)	113	368	113	368	113	368	113	368
m_v (1/kPa)	$5,49 \times 10^{-4}$	$1,26 \times 10^{-4}$	$6,68 \times 10^{-5}$	$2,04 \times 10^{-5}$	$4,35 \times 10^{-5}$	$1,33 \times 10^{-5}$	$3,3 \times 10^{-5}$	$1,15 \times 10^{-5}$
H_d (cm)	1,450	1,413	1,495	1,490	1,498	1,495	1,498	1,496
t (min)	645	335	2540	1300	5540	3610	5820	3390
C_v (m ² /s)	$3,85 \times 10^{-6}$	$7,04 \times 10^{-6}$	$1,04 \times 10^{-6}$	$2,02 \times 10^{-6}$	$4,78 \times 10^{-7}$	$7,32 \times 10^{-7}$	$4,56 \times 10^{-7}$	$7,81 \times 10^{-7}$
k (m/s)	$2,07 \times 10^{-8}$	$8,7 \times 10^{-9}$	$6,82 \times 10^{-10}$	$4,04 \times 10^{-10}$	$2,04 \times 10^{-10}$	$9,55 \times 10^{-11}$	$1,48 \times 10^{-10}$	$8,81 \times 10^{-11}$



Resim 5. Kaolin ile Anyonik Polimer Katkılı Kaolinin Hidrolik Geçirimsizlik Katsayısı Dağılımı

Kaoline etkiyen düşey kuvvetleri kıyasladığımızda 491 kPa altında elde edilen permeabilite değerleri 123 kPa altında elde edilenlere kıyasla Şekil 5'de gösterildiği gibi yaklaşık 0.3 mertebesinde daha küçüktür. Kil malzemeye etkiyen düşey basınç arttıkça kaolin ve polimer parçacıkları sıkışmakta ve yapının boşluk oranı çok az da olsa azalmaktadır. Bunun sonucunda ise hidrolik geçirimsizlik değerleri de azalmıştır. Tablo 2'de görüldüğü üzere kaolin ve kaolin-polimer karışımlarının drenaj uzunlukları (H_d), üzerlerine etkiyen düşey basınç arttıkça, daha fazla sıkışmadan dolayı oluşan düşey deformasyonun artması sonucunda azalmaktadır. 123 kPa'lık düşey basınç, atık toplama alanlarında birikebilecek atıkların oluşturabileceği makul bir basınç değerine karşılık gelmektedir. 491 kPa ise atık toplama alanlarının oldukça fazla atıkla dolması sonucu oluşabilecek basıncı temsil etmektedir.

4. SONUÇLAR

Kaolin ile kütlece 1%, 2% ve 4% oranlarında anyonik polimer eklenmiş kaolin-polimer karışımları üzerinde yapılan düşey yönlü konsolidasyon, serbest şişme ve Atterberg limitleri deneyleri tamamlandıktan sonra elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

Kaolinin hidrolik performansı, atık toplama alanlarında kaolinin bariyer malzemesi olarak kullanımı bakımından önem arz etmektedir. Bu çalışmada, hidrolik geçirimsizlik katsayısı ve şişme indeksi gibi hidrolik performansı belirleyen çok önemli iki parametre irdelenmiştir.

Kaoline anyonik polimer eklemek, kaolinin 10^{-8} m/s mertebelerinde ölçülen ve atık toplama alanlarında kullanımı için yüksek sayılabilecek hidrolik geçirimsizlik katsayısını yaklaşık 2 mertebesinde önemli oranda azaltmıştır. Eklenen polimer miktarlarına bakıldığında 2% polimer eklenmesi optimum çözümdür.

sunmaktadır. 2% anyonik polimerden daha fazla miktarda polimer eklemek, kaolinin hidrolik geçirimsizliğini çok az miktarda azaltmaktadır.

Kaolinin 1 ml/2g değerinde oldukça düşük ölçülen şişme indeksi ise anyonik polimer eklenmesi sonucunda 8 ml/2g'a yükselmiştir. Yine 2% oranında polimer eklenmesi optimum çözümü vermiştir. 4% oranında polimer eklendiğinde şişme indeksi 8 ml/2g olarak kalmıştır. Bu değer, her ne kadar bentonit kilinin şişme indeksine nazaran küçük bir değer de olsa anyonik polimer eklenmesi, kaolinin şişme kapasitesini bir miktar artırmıştır.

Atterberg limitlerinden likit limit ve plastisite indeksi de kaolinin hidrolik özelliklerine ışık tutan parametrelerdir. Bu iki parametre, kaolinin su ile karıştırıldığında plastiklik ve şekil verilebilirlik kapasitesini gösteren su muhtevalarıdır. Sonuçlara göre anyonik polimerin, kaolinin hidrolik performansını artırdığını, bu iki Atterberg limit parametresi ile de değerlendirebiliriz. Kaoline anyonik polimer eklendiğinde hem likit limit hem de plastisite indeksi artmaktadır.

Sonuç olarak, kaolinin bariyer malzemesi olarak kullanılabilmesi için çok düşük hidrolik geçirimsizliğe sahip olması beklenir. Kaoline 2% oranında anyonik polimer eklenmesi, hidrolik geçirimsizliği istenilen seviyelere düşürmüştür. Bariyer özelliklerini gösteren diğer bir parametre olan şişme indeksi ise anyonik polimer eklenmesi ile yükselse de istenilen seviyelere gelememiştir. Permeabilitenin şişme kapasitesinden daha fazla önemsendiği uygulamalarda anyonik polimer katkılı kaolinin kullanılabilmesi sonucuna varılmıştır.

Çok düşük hidrolik geçirimsizliğe ve yüksek şişme indeksine sahip olması sebebiyle bentonit kili, atık toplama alanlarında en çok tercih edilen bariyer malzemesidir. Fakat bentonit, yüksek asiditeye veya yüksek tuz konsantrasyonuna sahip agresif atıklarla temas ettiğinde, zamana bağlı olarak hidrolik performansını kaybetmeye başlar. Bir süre sonra da hem hidrolik geçirimsizliği önemli oranda yükselir hem de şişme kapasitesi azalır. Kaolin kilinin agresif atıklarla temasında böyle bir sorunla karşılaşmamıştır. Bu sonuçları değerlendirdiğimizde, arazide kolaylıkla temin edilebilecek ve ucuz bir kil türü olan kaolinin içerisine 2% oranında anyonik polimer katılması, hidrolik performansı düşük sayılamayacak bir bariyer malzemesi olarak kullanılmasını sağlamıştır.

Bu çalışmanın sonuçlarını da değerlendirerek ileride, polimer katkılı kaolinin su yerine agresif sıvı atıklarla teması sonucunda hidrolik performansı irdelenmeli ve hidrolik özelliklerini belirlemeye yönelik laboratuvar deneyleri yapılmalıdır.

BİLGİ NOTU

Bu çalışmanın kapsamındaki laboratuvar deneylerinin yapılmasına yardımcı olan İnşaat Mühendisliği Bölümü öğrencilerimizden Kadir Bayraktar, Kadir Batuhan Şeritoğlu ve Görkem Yücedağ'a teşekkür ederim.

REFERANSLAR

ASTM D2435. 2011. Standard test methods for one-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading: West Conshohocken, PA.

ASTM D4318. 2010. Standard test methods for liquid limit, plastic limit and plasticity index of soils: West Conshohocken, PA.

ASTM D5890. 2011. Standard test method for swell index of clay mineral component of geosynthetic clay liners: West Conshohocken, PA.

Bain, J.A. 1971. A plasticity chart as an aid to the identification and assessment of industrial clays. *Clay Minerals*, 9 (1), 1-17.

Chen, J., A. Anandarajah, ve H. Inyang. 2000. Pore fluid properties and compressibility of kaolinite. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126, 798–807.

Daniel, D.E., ve C.H. Benson. 1990. Water content-density criteria for compacted soil liners. *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, 116 (12), 1811-1830.

Day, S.R. ve D.E. Daniel. 1985. Hydraulic conductivity of two prototype clay liners. *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, 111 (8), 957-970.

Güler, E., C. Avcı, ve F. Tavus. 1995. Sıkıştırılmış kil tabakalarının permeabilitesine kireç ve kür süresinin etkisi. *Türkiye İnşaat Mühendisliği 13. Teknik Kongresi*, Ankara, 655-670.

Güler, E., ve C. Avcı. 1993. Kil tabakalarının tasarımı için Türkiye ve A.B.D.'de kullanılan yönetmeliklerin mukayesesi. *6. Ulusal Kil Sempozyumu*, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, 8-11 Eylül 1993, 181-186.

Huertas, F., S. Fiore, ve J. Linares. 1999. Experimental study of the hydrothermal formation of kaolinite. *Chemical Geology*, 156, 171– 190.

Liu Y., W.P. Gates, ve A. Bouazza. 2012a. Effectiveness of polymers on improving the fluid loss of bentonite used in geosynthetic clay liners. *Proceedings, Australian Regolith and Clay Conference*, Mildura, 1, 75-78.

Liu Y., W.P. Gates, ve A. Bouazza. 2012b. Improvement on the performance of geosynthetic clay liners using polymer modified bentonite. *Geotechnical Engineering Journal of SEAGS & AGSSEA*, 43 (3), 43-45.

Jensen, W.B. 2008. Ask the historian: the origin of the polymer concept. *Journal of Chemical Education*, 88, 624–625.

King, J. 2015. "What is sodium polyacrylate & how is it used?". LIVESTRONG.com. Demand Media, Inc.

Koyuncu, H., ve Y. Güney. 2003. Kaolin+zeolit tabakalarının depolama alanlarında kullanılabilirliği. *11. Ulusal Kil Sempozyumu*, İzmir.

McCrum, N.G., C.P. Buckley, ve C.B. Bucknall. 1997. *Principles of polymer engineering*, Oxford, New York: Oxford University Press.

Mitchell, J.K. 1993. *Fundamentals of Soil Behavior*, 2nd ed. Wiley, New York.

Or, D., J.M. Wraith, ve M. Tuller. 2004. "Vadose zone and hydrology and environmental soil physics". CT, USA, 209 p.

Özhan, H.O. 2016. Katyonik polimer katkılı geosentetik kil örtülerin hidrolik özellikleri. *Zemin Mekânîği ve Geoteknik Mühendisliği 16. Ulusal Kongresi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum*, 13-14 Ekim 2016, 139-148.

Özhan, H.O. 2011. "Internal erosion of geosynthetic clay liners under high hydraulic heads", Doktora Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

Razakamanantsoa, A.R., G. Barast, ve I. Djeran-maigre. 2012. Hydraulic performance of activated calcium bentonite treated by polyionic charged polymer. *Applied Clay Science*, 59-60, 103-114.

Suraj, G., C.S.P. Iyer, S. Rugmini, ve M. Lalithambika. 1998. Adsorption of cadmium and copper by modified kaolinites. *Applied Clay Science*, 13 (4), 293– 306.

Taşpolat, L.T., İ. Zorluer, ve H. Koyuncu. 2006. Atık mermer tozunun geçirimsiz kil tabakalarda donma-çözülme etkisi. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2006 (2), 11-16.

Trevino, J.C.M., ve C.A. Coles. 2003. Kaolinite properties, structure and influence of metal retention on pH. *Applied Clay Science*, 23 (1), 133-139.