

Kil Zeminlerin Mekanik Davranışına Tuz Çözeltileri Etkisi

Uğur Eren YURTCAN

Bingöl Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, İnşaat Teknolojisi Programı, Bingöl/Türkiye.
ORCID: 0000-0001-5040-2786

Sorumlu Yazar: ugurereny@gmail.com

Geliş tarihi:10.02.2023

Kabul tarihi:31.08.2023

Özet

Kil zeminlerin kohezif karakterli olması ve su tutma davranışının non-plastik zeminlere kıyasla farklı mekanizmalarla işliyor olması nedeniyle yük altındaki mekanik davranışı da farklı mekanizmalarla açıklanmaktadır. Non-plastik zeminlerden farklı olarak killerin sıkışma, makaslama kuvvetlerine dayanma, su tutma gibi mekanik davranışında elektriksel ve moleküler kuvvetler etkindir. Kil daneleri arasındaki etkileşime etki eden kuvvetler üzerinde değişime yol açabilecek tüm dış etkiler kilin mekanik davranışına da etki etmektedir. Dolayısıyla killerin mekanik davranışları boşluk suyu kompozisyonundan etkilenmektedir. Kohezif zeminlerin su tutma davranışını etkileyen ortam sıcaklığı, pH, boşluk suyunun yalıtkanlık sabiti (dielectric constant – DC), iyon konsantrasyonu (çözünmüş tuz miktarı) gibi etkenler aynı zamanda mekanik davranışına da etki etmektedir. Yazı kapsamında kil zeminlerin mekanik davranışına etkileyen bu etkenlerden sadece boşluk suyundaki tuz yoğunluğunun etkisi incelenecektir. Bu amaçla öncelikle başucu niteliğindeki kitaplardan yola çıkarak kil-tuz etkileşiminin temel mekanizması ana hatlarıyla açıklanmaya çalışılmıştır. Sonrasında yakın dönemde yapılmış güncel yayınlardaki bulgularlar, kil – kimyasal etkileşiminin temel mekanizmalarıyla irdelenerek etkileşimin genelden özele izahına çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Su Adsorpsiyonu, Kil-Kimyasal Etkileşimi, DDL, Sıkışabilirlik, Kayma Dayanımı

Effect of Salt Solutions on the Mechanical Behavior of Clay Soils

Abstract

The mechanical behavior of clay soils under load is also explained by different mechanisms, since they have a cohesive character and their water retention behavior works by different mechanisms compared to non-plastic soils. Unlike non-plastic soils, electrical and molecular forces are effective in the mechanical behavior of clays such as compression, resistance to shear forces, and water retention. All external effects that may cause a change on the forces acting on the interaction between clay particles also affect the mechanical behavior of the clay. The mechanical behavior of clays is affected by the pore water composition. Factors such as ambient temperature, pH, dielectric constant of pore water (dielectric constant – DC), ion concentration (amount of dissolved salt) that affect the water holding behavior of cohesive soils also affect their mechanical behavior. Within the scope of the article, only the effect of salt concentration in the pore water will be examined among these factors affecting the mechanical behavior of clay soils. For this purpose, the basic mechanism of clay-salt interaction has been tried to be explained with the main lines, starting from the books that have the quality of a bedside book. Afterwards, the findings in recent publications were examined with the basic mechanisms of the clay-chemical interaction, and the interaction was tried to be explained from general to specific.

Keywords: Water Adsorption, Clay-Chemical Interaction, DDL, Compressibility, Shear Strength

1. GİRİŞ

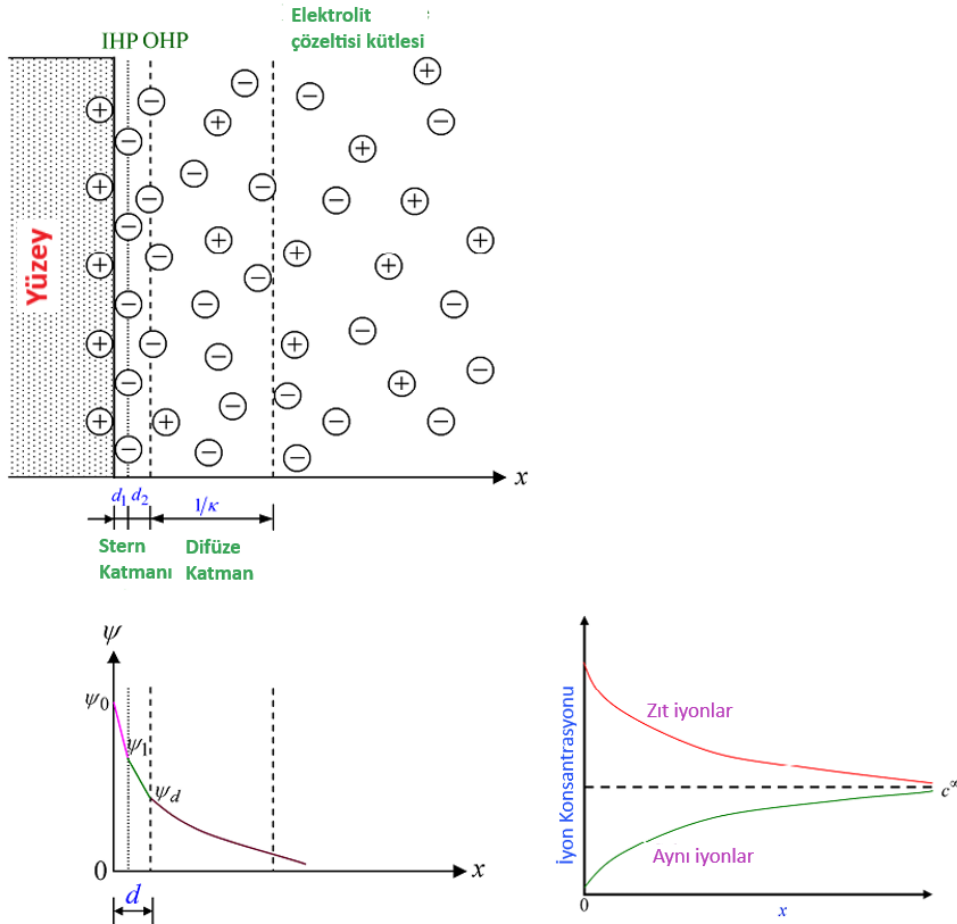
Killerin sıkışabilirlik ve kayma dayanımı gibi mekanik davranışları boşluk suyu kompozisyonundan etkilenmektedir[1–8]. Killerin atterberg limiti değerleri killi zeminlerin sınıflandırılmasında kullanılıyor olsa da şişme davranışı, sıkışabilirlik, kayma dayanımı ve kompaksiyon parametreleri ile kıvam limitleri arasında ilişki

olduğu düşünülmektedir ve kıvam limitleri ile killerin mekanik davranışı arasındaki ilişki birçok yayında incelenmiştir[9–12]. Yapılan çalışmalar bu davranışın altındaki temel mekanizmayı kendi çalışmalarının bakış açısından ancak farklı noktalarından ve ihtiyaçlarıyla sınırlı olarak açıklamışlardır. Bu yazı kapsamında kil mineralinin tuz çözeltileriyle etkileşiminde etkin olan temel mekanizmanın mevcut verilerin derlemesiyle açıklanmasına çalışılacaktır.

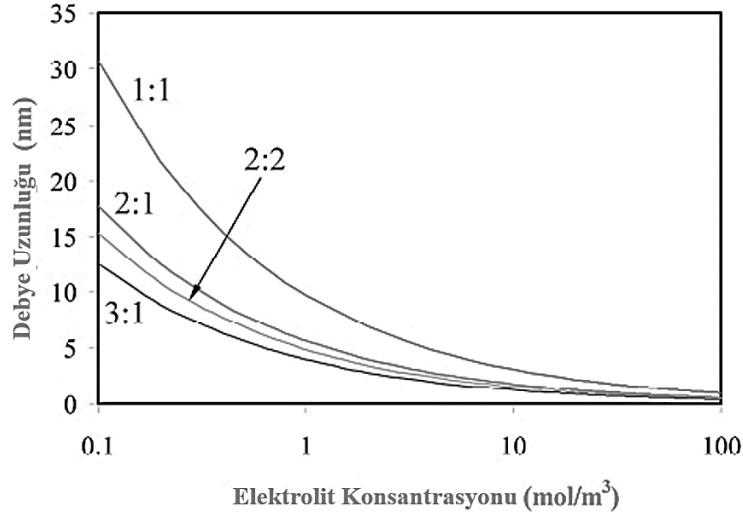
2. SU TUTMA DAVRANIŞI ve YAPI ÜZERİNE TUZ ÇÖZELTİLERİNİN ETKİSİ

2.1. Çift Difüze Katman (Double Diffuse Layer – DDL) Kalınlığına Tuz Çözeltilerinin Etkisi

Negatif yüklü kil minerali yüzeyi, zıt yüklü iyonları Coulomb çekme kuvvetiyle yüzeye çeker. Ancak ozmotik basınç kuvvetleri zıt yüklü iyonları yüzeyden uzağa iter. Zıt etkiyen bu iki kuvvetin oluşturduğu dinamik denge *çift difüzyon katmanını* (double diffuse layer – DDL) oluşturur (Şekil-1) [1,13–15]. Zıt yüklü iyonların yüzeye yaklaştıkça yoğunlukları artmaktadır. Dinamik denge halinde olan bu katman yüzeye yakın bir yerde ikiye ayrılır: Stern ve Gouy-Chapman katmanları. Adsorbe iyonlardan oluşan yoğun ve sıkışık olan içteki tabaka Stern katmanıdır, iç ve dış helmholtz düzlemlerinden oluşur. Bu katmanın kalınlığı ise Debye Uzunluğu ($1/\kappa$) kadardır [1,13,15]. Debye uzunluğu, çözücü içerisindeki elektrolit yoğunluğundan oldukça etkilenmektedir. Elektrolit yoğunluğunun artışıyla yüzeydeki sıvı-katı temas yüzeyindeki yük artışından dolayı çift katmanın etki bölgesi yani kalınlığı azalır (Şekil-2) [13,15]. Yani negatif yüklü kil yüzeye tutunan her iyon tutuk su katmanı kalınlığını değerliğiyle orantılı olarak düşürür.



Şekil 1. Stern ve Gouy – Chapman Katmanları [13]



Şekil 2. Farklı elektrolitlerin yoğunluğuna bağlı olarak debye uzunluğunun değişimi [13]

Çift difüze katman (double diffuse layer – DDL) sınırları dahilindeki su molekülleri hidrojen (stern katmanındaki moleküller) ve van der waals kuvvetleriyle (difüze katmandaki moleküller) tutulmaktadır. Bu katman moleküler çekme kuvvetleri ve ozmotik kuvvetlerle beraber dinamik bir denge halindedir. Polar (kutuplu) yapıdaki su molekülleri negatif yüklü kil yüzeyine tutunmaktadır. Ancak dengedeki bu katmanın doğası gereği kil yüzeyine tutunan katyonlar çift difüze katman kalınlığının katyon değerliğiyle orantılı olarak kısalmasına neden olur [1,16]. Birbirleriyle en az DDL kalınlığı kadar uzak olan kil levhaları da DDL'nin kısalmasıyla birbirlerine yaklaşır.

2.2. Yapı ve Likit Limite Tuz Çözeltilerinin Etkisi

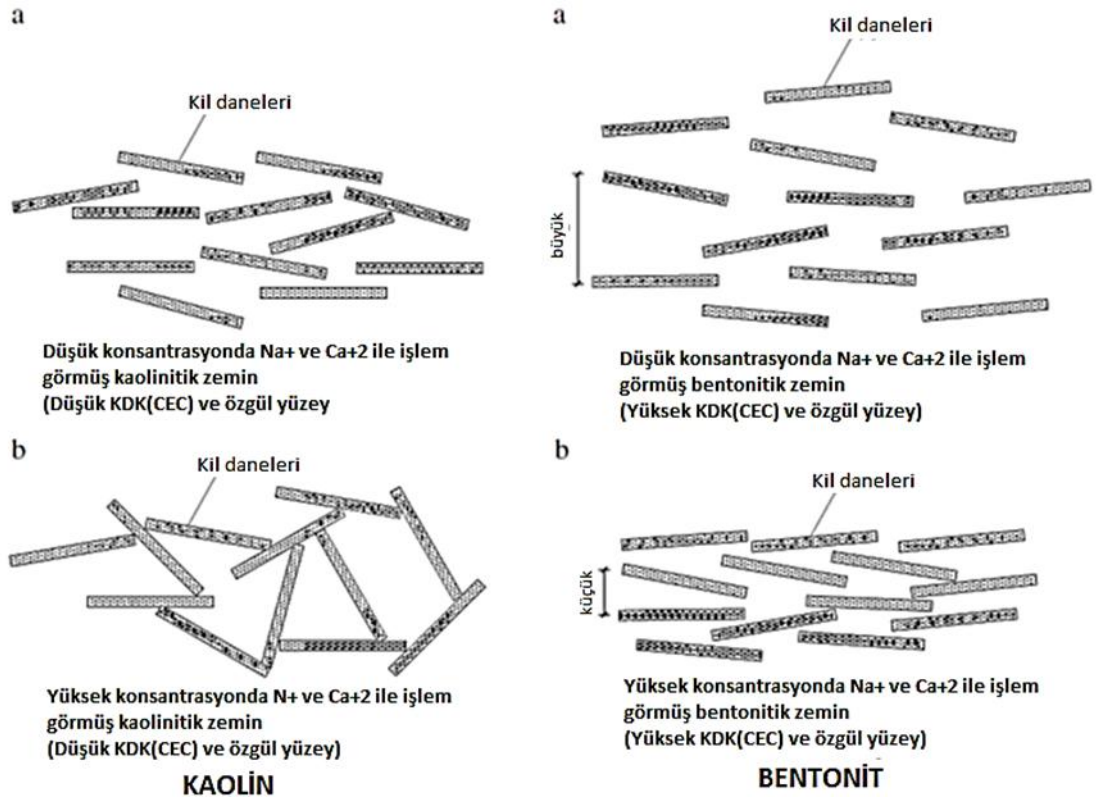
Özgül yüzeyi oldukça yüksek olan ve tipik mineral kristal kalınlığı 3nm civarlarında olan montmorillonitin (2:1 smektit grubu) baskın mineral olduğu killer, oldukça yüksek su tutma kapasitesine sahipken özgül yüzeyi kıyasla oldukça küçük olan kaolinitin (1:1 kaolinit grubu) baskın mineral olduğu killerin su tutma kapasitesi kıyasla oldukça düşüktür[1]. Su tutma davranışındaki bu farklılık nedeniyle killi zeminin bünyesindeki hâkim mineral tipi, mekanik davranışında da farklılıklar yaratmaktadır.

Özellikle Di Maio [17] Na-Montmorillonit ile yürüttüğü çalışmasında herhangi bir tuz tipi için 1M'e kadar likit limite hızlı bir düşüşe yol açtığını ve daha yüksek molaritelerde likit limitteki düşüşün az olduğunu belirtmiştir. Horan [18], sıfırdan 4,4M'a kadar farklı derişiklikteki NaCl çözeltileri ile killerin mekanik davranışını incelediği çalışmasında sadece molarite artışıyla likit limite sert bir düşüş olduğundan bahsetmiştir. Horpsibulsuk [19], Na-Kaolin için M artışıyla (0,001M – 0,01M) likit limitin (LL) arttığını Na-Bentonit için ise M(0,0001M-0,001M) artışıyla likit limitin (LL) azaldığını ifade etmiştir. Farklı boşluk suyu kimyası ile killerin fiziksel özellikleri baskın kil mineralinin montmorillonit veya kaolin olmasına bağlı olarak iki farklı mekanizma ile kontrol edildiğinden bahsetmiştir. Montmorillonitik veya şişen zeminlerin fiziksel özelliklerine DDL katkısı baskınken, kaolinitik killerde montmorillonitik killere kıyasla kısa olan DDL kalınlığının daha da kısalmasıyla kaolinitik zeminlerde topaklanmaya yol açtığından bahsetmiştir. Kaolinitik killerde çekme kuvvetleri büyük ve itme kuvvetleri küçük olduğunda kaolinitik zeminlerde daneler E-F bağlantıları kuracağından açık foliküle strüktür daha büyük kayma dayanımı ve daha yüksek su tutuma kapasitesine sahip olacağından bahsetmiştir. Ancak yazarın 0,001M-0,01M gibi düşük molar aralıkta çözeltilerle çalıştığına dikkat etmek gerekmektedir. Naeini [20] liner olarak kullanılan düşük ve yüksek plastik killerle killerin kayma dayanımını incelediği çalışmasında tuz (NaCl) konsantrasyonunun %2'nin (yaklaşık 0,34M NaCl çözeltisi) üzerine çıktığı andan itibaren drenajsız kayma dayanımında hızlı bir artış gözlemlendiğini ancak %10'un (yaklaşık 1,71M NaCl çözeltisi) üzerine çıkmasıyla kilin yapısında kimyasal yapısında bozulmayla hızlı bir düşüş gözlemlendiğini ifade etmiştir. Sridharan [21], yalıtkanlık sabiti (dielectric constant – DC) ile likit limitin ilişkili olduğunu ifade etmiştir. Elektriksel çekme kuvvetleri, boşluk suyu DC'i ile ters orantılı olarak değişmektedir ve itme kuvvetleri DC ile doğrudan arttığını belirtmiştir. Calvello [22] smektit grubu killerle yürüttüğü çalışmasında maksimum dayanım, hidrolik iletkenlik ve maksimum LL ve sıkışabilirlik saf su ile elde edildiğini ifade etmiştir. Özellikle saf su ve deniz suyu derişikliğindeki (0,6M NaCl) çözelti aralığında kilin likit limitindeki düşüşün oldukça belirgin olduğu ve sonrasında likit limitteki azalmanın oldukça az olduğunu ifade etmiştir. Song et al. [23], doğal killerle yürüttüğü

çalışmasında likit limitin boşluk suyu tuzluluğunun azalışıyla azaldığını ifade etmiştir. Bu azalışın, kaolinit ve illitin birincil mineral olduğu zeminlerde (şişmeyen killer için) tuzun sızmasıyla daneler arası çekme kuvvetinin artmasıyla ifade etmiştir. Yazar çalışmasında 0,075M-0,5M aralığında NaCl çözeltileriyle çalışmıştır. Dor [24], kil mineral tipi ve çözelti kimyasının kil levhacıklarının kendi içerisinde oluşturduğu hiyerarşik yapı (levhacık, taktodid veya agregata) sistemlerinin oluşum ve etkileşimlerini etkilediğini belirtmiştir. Yazara göre kil agregatları saf suda nispeten düzensiz ve kenardan yüze dizilimi (E-F) hâkimken tuz çözeltilerinde agregatlarda daha yüksek düzeyde düzgün dizilim söz konusu ve yüzden yüze (F-F) dizilim hâkimdir. Çözelti yoğunluğunun levhacıklar arasındaki itme kuvvetlerini azaltması ile daneler arası mesafe azalmakta ve böylece daha uyumlu paralel dizilim gerçekleşmektedir. Bu dizilimdeki en büyük etki, -yüzeyin hidrasyon düzeyi (su tutma kapasitesi), levhacık (platelet) arası mesafe, KDK (katyon değişim kapasitesi – CEC), özgül yüzey de göz önüne alındığında- kil levhacıkları (platelet) arasındaki kimyasal etkidir (bağ enerjisi gibi). Kaolinit plateletleri, oktahedral -O ve -OH grupları ve bitişindeki tetrahedral yapılar arasındaki hidrojen bağlarla bağlanmaktadır. İllitin aşırı katman yükü, iki tetrahedral yaprak arasında kubo-oktahedron koordinasyonunun Şekillendirdiği hegzagonal boşlukların içinde mobilize sabit potasyum katyonlarıyla sabitlenmektedir. Montmorillonitte tam tersine plateletler Van Der Waals kuvvetleriyle bir arada kalmakta ve yüzey yükü değişebilir katyonlarla dengelenmektedir. Tüm bu çalışmalara bakıldığında kil minerali ve tuz çözeltilerinin etkileşimini makalelerin özgün bakış açısıyla değerlendirip benzer sonuçlar elde etmişlerdir. İstisnalar hariç olmak üzere ağırlıklı olarak bu duruma neden olan mekanizma üzerinde durmaktansa çalışmalarındaki bulgulara odaklandıklarından sınırlı açıklamalarla yetinmişlerdir.

Ortaya konan bulgular özetlenecek olursa; smektit grubu killerde su tutma davranışı çift difüze katman (DDL) kalınlığıyla kontrol edilmektedir. Bu nedenle boşluk suyu tuz molaritesi artışıyla likit limit de azalmaktadır. Smektit grubu killerle yürütülen çalışmalarda suyun likit limiti düştükçe sert düşüşün görüldüğü tuz molaritesi sınır değeri de azalmaktadır [2,17,25]. Deniz yoğunluğunu (~0,6M) aşan derişiklikteki çözeltilerde çift difüze katmanın (DDL) yeterince incelendiğinde danelerin yaklaşmakta ve topaklanma hızlanmaktadır. Birçok yazarın saf sudan yaklaşık deniz suyu derişikliği arasında kilin mekanik davranışındaki değişimin azami olduğunu ifade etmesi bu vargıyı destekler niteliktedir [17,18,20,22,23]. Bu nedenle bentonit için boşluk oranı ve sıkışabilirlik molarite artışıyla azalmaktadır. Çift difüze katman kalınlığının su tutma davranışında belirleyici olduğu smektit tipi kil minerallerinin baskın olduğu kil zeminlerde boşluk suyunun tuz yoğunluğunun artışıyla su tutma kapasitesinin düşmektedir. Kaolinit ve illitin birincil mineral olduğu zeminlerde (şişmeyen killer için) tuzun sızmasıyla daneler arası çekme kuvveti artmaktadır. Diğer yandan tuz çözeltilerinin molaritesinin artışıyla kenardan yüze (E-F) dokusal birleşimin oluşmasını teşvik ederek daha yüksek boşluk oranı ve su tutma kapasitesi sağlamakta ve sıkışabilirliği arttırmaktadır [8,23].

Kaolin grubu killer için tuz etkisi ile likit limitin değişimi üzerine farklı görüşler yer almaktadır. Bazı çalışmalara göre kaolin için tuz molaritesi artsa da likit limit değeri azalmakta [2,19,26]; bazılarında göre sabit kalmakta [6,25] ve bazılarında göre azalmaktadır [27,28]. Kaolin için sözü edilen farklı su tutma davranışları kilin saflık durumu ve tuz molaritesine bağlı olarak derişiklik göstermektedir. Düşük molaritelerden itibaren (0,01M-0,1M) kaolinitik killerde kenardan yüze (E-F) tipi doku etkin olmaktadır (Şekil-3) [19]. Daha yüksek molaritelerde (0,1M ve üzeri) molarite artışıyla hızla kısalan DDL boyu ile tamamen yüzden yüze (F-F) tipi doku hâkim olmakta ve hatta tahrip olmaktadır. Tahrip olma sınırını geçen kilin genel davranışı nonplastik zemin davranışına doğru evrilmektedir [28].

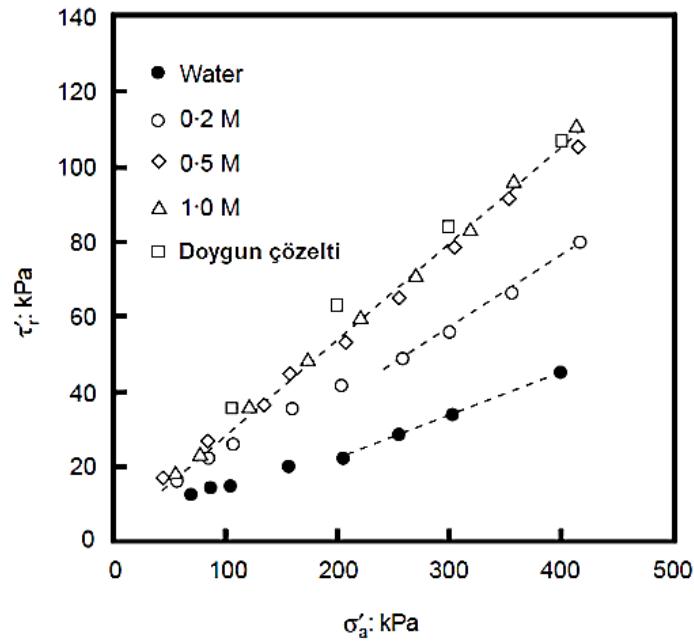


Şekil 3. İyon konsantrasyonu ve değerliğinin kaolin ve bentonit kilinin dokusuna etkisi (0,001-0,1M NaCl ve CaCl₂ ile çalışılmıştır) [19]

Kaolinit grubu minerallerin (1:1) baskın olduğu kil zeminlerde kil daneleri düşük tuz yoğunluğunda (0,2M altında) yüzden kenara (E-F) birleşimi; yüksek tuz yoğunluğunda (0,2M üzerinde) yüzden yüze (F-F) birleşimiyle topaklanmaktadır. Düşük tuz yoğunluğunda oluşan yüz-kenar tipi topaklanma neticesinde boşluk oranı artışı ve su tutma kapasitesinde artış gözlenmektedir. Yüksek tuz yoğunluğunda difüze çift katmanın çok kısılmasıyla yüz-yüz tipi topaklanma neticesinde su tutma kapasitesinde düşüşe neden olmaktadır. Smektit grubu minerallerin (2:1) baskın olduğu zeminlerde ise tüm tuz yoğunluklarında difüze çift katmanın kısılmasıyla daneler yaklaşmakta ve kilin su tutma kapasitesinde düşüş gözlenmektedir (Şekil-3) [19].

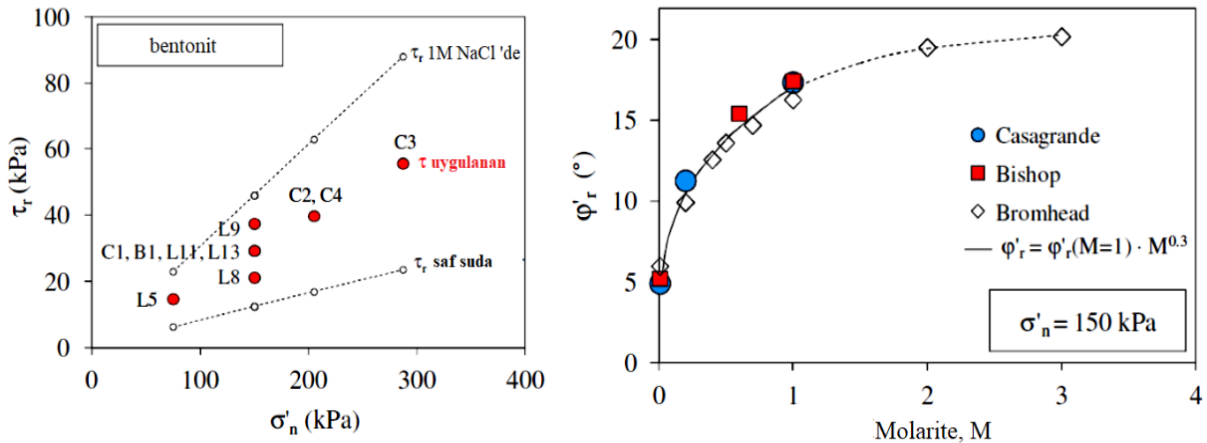
3. REZİDÜEL KAYMA DAYANIMI PARAMETRELERİNE TUZ ÇÖZELTİLERİ ETKİSİ

Doğru tuz çözeltilerine maruz kalan bentonit kilinde büyük hacim düşüşleri ve büyük rezidüel kayma dayanımı artışı gözlemlenmiştir (şekil-4). Di maio [17] Na⁺ 'a maruz kalan bentonit kilinin tekrar distile suya maruz kaldığında su tutma davranışında tersinirlik gözlenirse de rezidüel kayma dayanımındaki azalma sınırlı düzeyde kaldığını belirtmiştir. K⁺ ve Ca⁺² iyonlarına maruz kalmış kilde tekrar saf suya maruz kaldığında tersinir davranış gözlemlenmediği belirtilmiştir.



Şekil 4. Çeşitli NaCl çözeltileri için aksenal gerilmeye karşı rezidüel kayma dayanımı değişimi [17]

Özellikle heyelan bölgelerinde lokal kayma dayanımı parametrelerinin değişimi hareketin başlamasına ve heyelanın etki ettiği bölgenin alanına kadar birçok konuda öneme sahiptir. Özellikle Scaringi'nin [29] derin denizel kil bölgesinde gerçekleşmiş bir heyelan üzerine yürüttüğü çalışma dikkat çekicidir. Çalışmada heyelan düzlemindeki tuz yoğunluğunun stabil bölgelere kıyasla oldukça düşük olduğu gözlemlenmiştir. Çalışma dahilinde yürütülen deneysel çalışmalarda doymuş tuz çözeltilerine maruz kalan kilde büyük hacim düşüşleri ve büyük rezidüel kayma dayanımı artışı gözlemlenmiştir. Çalışmada elde edilen tuz yoğunluğu değişimiyle rezidüel kayma dayanımı parametrelerinin değişimi Şekil 5'de görülmektedir.



Şekil 5. NaCl çözeltisi molaritesi değişimiyle bentonitin rezidüel kayma dayanımı parametreleri değişimi [29]

Smektit grubu killerin kayma dayanımındaki değişikliğin de difüze çift katman kalınlığının değişimiyle şekillenmektedir. Tuz etkisiyle çift difüze katman kalınlığı (DDL) kısalmakta ve dokuyu yeni bağlar oluşturmaya teşvik etmektedir. Böylece molarite artışıyla kayma dayanımı da artacaktır. Kaolin grubu killerin kayma dayanımı çift difüze katman kalınlığındaki değişimden ziyade özgül yüzeyinin smektit grubu killere kıyasla çok daha küçük olmasından dolayı mekanik kuvvetlerle şekillenmektedir. Kaolin kilinin davranışındaki değişikliği de çift difüze katman kalınlığı ile ilişkili olsa da DDL kalınlığının kısılması hızlı bir folikülasyona neden olmaktadır ve kaolin kilinin kayma dayanımının artmasına neden olmaktadır [17,25,29,30]. İki kil grubu için de tuz etkisi benzer mekanizmaların işlemesiyle küçük farklılıklarla benzer sonuçlar doğurmaktadır. Tuz

çözeltileri hem smektit hem de kaolinit grubu killerde hacim azalmasıyla beraber rezidüel kayma dayanımında artışa yol açmaktadır.

4. KONSOLIDASYON PARAMETRELERİNE TUZ ÇÖZELTİLERİ ETKİSİ

Jang et al. [8], killerin su içerisinde çökerek doku oluşturma sistemlerini incelediği çalışmasında montmorillonitik killerde artan tuz yoğunluğuyla daneler arası etkileşimin DDL özellikleriyle belirlendiğinden bahsetmiş ve tuz artışıyla danelerin yaklaştığını ve topaklaştığından bahsetmiştir. Tuz artışıyla süspansiyon içinde çökme sırasında dağılımın homojenlikten uzaklaşarak daha çok süspansiyon gibi davrandığından bahsetmiştir. Doku oluşturmadaki bileşim şekillerinden çok danelerin daha çok birbirine yaklaşarak topakların büyümeye başladığına işaret etmiştir. Kaolin için ise saf suda kenardan yüze (E-F) doku oluşturarak yüksek boşluk oranına sahip olduğundan ve sıkışabilirliğinin yüksek olduğundan ve tuzlu suda yüzen yüze (F-F) birleşimin hâkim olduğundan ve sıkışabilirliğin düşük olduğundan bahsetmiştir. Song et al. [23], boşluk suyu tuzluluğu ve likit limitin sıkışabilirliğe etkisini incelediği çalışmasında başlangıç su içeriğinin yüksek olduğu numunelerde kıyasla yüksek deformasyon ve tuz içeriğinin artışıyla sıkışabilirlikte azalma gözlemlendiğini ifade etmiştir. Kaolinitik ve illitik killer gibi şişmeyen killerde tuzlu su sızıntısı sıkışabilirliği arttırdığından bahsetmiştir. Çalışmanın en dikkat çekici kısmı Doğal killerin boşluk suyu tuzluluğunun değişimiyle oksit bileşenlerde değişiklik olmadığını ifade etmesidir. Dolayısıyla boşluk suyu tuzluluğunun değişimi sırasında hiç kimyasal reaksiyon oluşmamaktadır. Bu durum NaCl çözeltileri ile kil mineralinin etkileşiminin tersinir olması durumunu [17] desteklemektedir. Bu nedenle boşluk suyu tuzluluğu değişiminin sıkışma davranışına etkisi, tuzluluğun fiziksel özelliklere etkisiyle izah edilebilmektedir. Nguyen et al. [31], yüksek plastik iki doğal kil numunesi e 0-0,5M aralığında NaCl çözeltileri kullandığı çalışmasında boşluk suyu kimyasının hidromekanik davranışa etkisini incelemiştir. Boşluk suyu tuzluluğu etkisi, mineraloji, gerilme durumu ve tuz yoğunluğuna bağlı olarak; sıkışabilirlik üzerindeki kimyasal etkinin eksenel yükün artışıyla zayıfladığından bahsetmiştir. Kimyasal etkinin artışı belli bir tuz içeriği değerine kadar artış gösterdiğini ifade etmiştir. Fiziko-kimyasal ve mekanik kuvvetler arasındaki rekabetin boşluk suyu kimyası kompozisyonu etkisinin hidromekanik davranışın fizikokimyasal etkiyle domine edildiği düşük gerilme düzeylerinde açık gözlemlenebildiğini söylemiştir. Anlaşılabileceği üzere sıkışma davranışında özellikle fiziko-kimyasal kuvvetlerin yük taşıma mekanizmasında daha etkin olduğu montmorillonitik killerde dış yük ile içsel kuvvetlerin dengesi de oldukça önemlidir. Horpsibulsuk et al. [19], çalışmasında kaolin ve smektit grubu killerin sıkışma ve geçirimsizlik davranışının tuz etkisiyle nasıl değiştiğini incelemiştir. Yazara göre farklı boşluk suyu kimyası ile killerin fiziksel özellikleri baskın kil mineralinin montmorillonit veya kaolin olmasına bağlı olarak iki farklı mekanizma ile kontrol edilmektedir: Kaolinitik zeminlerde boşluk suyu tuzluluğunun artması topaklanmaya yol açar. Bunun sonucunda LL ve kayma dayanımında artış gözlemlenir. Çekme kuvvetleri büyük ve itme kuvvetleri küçük olduğunda kaolinitik zeminlerde daneler E-F bağlantıları kurar. Açık foliküle strüktür daha büyük kayma dayanımı ve daha yüksek su tutuma kapasitesine sahip olur. Montmorillonitik veya şişen zeminlerin fiziksel özelliklerine DDL katkısı baskındır. İyon konsantrasyonu ve değerliği artışıyla DDL kalınlığı kısalır ve montmorillonitik zeminlerin LL'i azalır. Aynı boşluk oranında montmorillonitik killer ise boşluk suyu tuzluluğunun artışıyla düşük sıkışabilirlik sağlamaktadır.

Çalışmalardan elde edilen ve makaleler için ortak olan detay bulgular kabaca aşağıdaki gibi özetlenebilir:

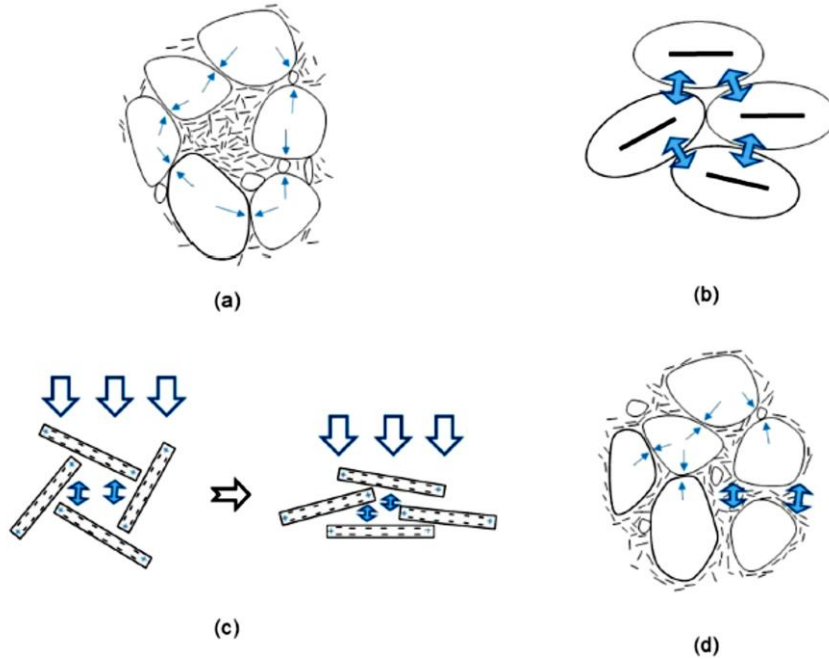
- Killerde sıkışma veya kayma kuvvetlerine direnç gibi mekanik davranışları zemin iskeleti ve boşluk suyu arasındaki etkileşimin sonucudur. Bu etkileşimde mineral tipi, boşluk suyu içeriği, boşluk oranı ve harici gerilme miktarına bağlıdır.
- Smektit grubu mineralin baskın olduğu killerde davranış çift difüze katman (double diffuse layer-DDL) kalınlığı değişimiyle şekillenmektedir.
- Kaolinitik killerde de davranışta çift difüze katman (double diffuse layer-DDL) kalınlığı etkin olsa da kil mineralinin özgül yüzeyine kıyasla çift difüze katman (double diffuse layer-DDL) kalınlığı oldukça kısa olduğundan boşluk suyundaki tuz etkisiyle dokudaki yük aktarma fiziko-kimyasal kuvvetlerin (kohezif kuvvetler) etkisinden mekanik ve fiziko-kimyasal etkinin beraber etkin olduğu karışık doku yapısına hızlı geçiş sağlamaktadır.
- Boşluk suyu tuzluluğunun ve tuz değerliğinin artışıyla,
 - ✓ Likit limit azalmaktadır.
 - ✓ Rezidüel kayma dayanımı (τ_r) ve rezidüel içsel sürtünme açısı (ϕ_r) artmaktadır.
 - ✓ e-logp grafikleri aşağı yönde baskılanmaktadır.
 - ✓ Permabilite katsayısı (k), konsolidasyon katsayısı (C_v) artmaktadır.

- ✓ Sıkışma indisi (C_c) ve şişme indisi (C_s), hacimsel sıkışma katsayısı, birincil konsolidasyon bitiş süresi (t_p) ve ikincil sıkışma katsayısı (C_α) azalmaktadır.
- Parametrelerdeki değişiklikler göz önüne alındığında yapı ve dokudaki değişimler gibi başka mekanizmaların etkisi de olabileceği gibi kabaca boşluk suyu tuz yoğunluğunun artışıyla baskılanan çift difüze katman (double diffuse layer-DDL) kalınlığı ile boşluk oranındaki düşüşün sonucu oluştuğu görülmektedir.
- İster kayma dayanımı parametreleri ister konsolidasyon parametrelerindeki değişim olsun, boşluk suyu molaritesinin belirli bir molarite değerine kadar artışıyla parametreler üzerindeki etkisi, sözü edilen belirli molarite değeri üzerindeki molaritelerdeki artışa kıyasla parametreler üzerinde oldukça büyük değişimlere yol açmaktadır. Bu değer hâkim kil mineraline ve kil içeriğindeki mineral yüzdesine bağlı olarak oldukça değişiklik göstermektedir.
- Sıkışma davranışında tüm kil türlerinde harici yük (konsolidasyon basıncı) artışıyla boşluk tuzluluğunun etkisiyle gözlemlenen değişimler silikleşmektedir

Çalışmaların genel sonuçları göz önüne alındığında zeminlerin yük altındaki davranışında sadece su tutma davranışları değil aynı zamanda nasıl bir başlangıç dokusuna sahip olduklarının da önemli olduğu görülmektedir [8]. Killerin su tutma davranışlarına bağlı olarak oluşturdukları doku temel mekanik davranışında yük aktarma mekanizması önemli olduğu da görülmektedir. Zemin dokusunun nasıl yük aktardığı oturma davranışında da etkin rol oynamaktadır. Yük aktarmada etkin olan doku tipleri aşağıdaki gibidir;

- Mekanik kuvvetlerin etkin olduğu doku,
- Elektriksel kuvvetlerin etkin olduğu doku,
- Hem mekanik hem de elektriksel kuvvetlerin etkin olduğu karışık doku.

Mekanik kuvvetlerin etkin olduğu doku iri daneli zeminleri temsil etmektedir ve daneleri temas noktalarından fiziksel olarak aktarmasıyla yük aktarılmaktadır (Şekil-6(a)). Elektriksel kuvvetlerin etkin olduğu doku hâkim kil mineraline göre şekillenmektedir. Smektit grubu killerin dokusu DDL kalınlığı ile şekillenmektedir (Şekil-6(b)). Yük aktarımı elektriksel kuvvetlerle gerçekleşmektedir. Diğer yandan kaolin grubu killer düşük basınçta yüksek boşluk oranına sahip ancak sıkışabilir ve orta basınç altında çökebilir dokuyla yük aktarmaktadır(Şekil-6(c)). Karışık dokularda yük aktarımının hem mekanik hem de elektriksel kuvvetlerle gerçekleşmektedir (Şekil-6(d)) [1,8].



Şekil 6. Doku bazlı harici yük aktarma mekanizması. (a) Mekanik kuvvetlerin etkin olduğu doku, (b ve c) elektriksel kuvvetlerin etkin olduğu doku (d) Karışık doku [1,8]

Kaolinin saf suda çökerek oluşturduğu yapıda kenardan yüze tipi doku hâkim olmaktadır. Kenardan yüze (E-F) tipi doku yüksek boşluk oranına sahip olduğundan, sıkışabilirliğinin yüksek olmaktadır. Diğer yandan tuzlu suda çökelen kaolin tipi kilde yüzen yüze (F-F) tipi doku hâkimdir ve sıkışabilirliği düşüktür. Bentonit için ise boşluk oranı ve sıkışabilirlik çift difüze katman ile şekillenmektedir. Boşluk oranı ve sıkışabilirlik boşluk suyundaki iyonik konsantrasyonun artışıyla azalmaktadır [8]. Killerin boşluk suyu tuzluluğunun değişimiyle oksit bileşenlerde değişiklik olmamaktadır. Yani boşluk suyu tuzluluğunun değişimi sırasında kalıcı değişikliğe neden olan kimyasal reaksiyonlar oluşmamaktadır. Bu nedenle boşluk suyu tuzluluğu değişiminin sıkışma davranışına etkisi, tuzluluğun fiziksel özelliklere etkisiyle izah edilebilmektedir [23].

Yüksek molaritede çözeltiye maruz kalmış numunelerin e-logp grafikleri daha düşük tuz içeriğindeki numunelere göre daha aşağıda konumlanmaktadır. Tuz etkisi olsun olmasın aynı başlangıç boşluk oranında hazırlanmış numunelerden yüksek likit limite sahip zeminin düşük likit limite sahip olana kıyasla e-logp grafikleri daha yukarıda konumlanmaktadır [19,23,32].

Tüm killerde boşluk suyu tuzluluğu arttıkça çift difüze katman teorisine uygun olarak sıkışma indisi (C_c) ve şişme indisinin (C_s) azaldığını gözlemlemiştir. Azalma etkisi düşük molaritelerde daha belirgin yüksek molaritelerde ihmal edilebilecek düzeylere düşmektedir. Hacim değişim davranışı mineral kompozisyonu değişiminden (özellikle smektit oranından) kuvvetle etkilenmektedir. Sıkışma (C_c) ve şişme (C_s) indisi üzerindeki etkinin aksel gerilmenin artmasıyla azalmaktadır [6,31,32].

Boşluk suyu tuzluluğu arttıkça permeabilite (k) ve konsolidasyon katsayısı (C_v) artmaktadır. Boşluk suyu tuzluluğu etkisi, mineraloji, gerilme durumu ve tuz yoğunluğuna bağlı olarak; yüksek smektit içeren killerde konsolidasyon katsayısının (C_v) üzerindeki kimyasal etkinin daha iyi gözlenebilmektedir. Bu iki parametre konsolidasyon sırasında zeminin sızma özellikleriyle değer almaktadır. Bu nedenle doku içi boşluklar bu iki parametrenin aldığı değer üzerinde etkindir. Yine de permeabilite (k) ve konsolidasyon katsayısı (C_v) değişimi üzerinde DDL değişimi etkisi önemli düzeydedir. Diğer yandan tuz etkisiyle artan sızma ile konsolidasyon tamamlanma süresi kısalmaktadır. Böylece birincil konsolidasyon bitiş süresi (t_p) de kısalmaktadır [6,31,32].

Killer, yapının etkisiyle aşırı konsolide davranışı gösterir. Bunun nedeni kil yapısında meydana gelen tiksotropik yaşlanmadır. Zemin yapısı dış yüke direnmekte ve ikincil sıkışmayı engellemektedir. Zemin yapısı göçmek üzereyken, konsolidasyon gerilmesi yapı tahribat eşiği gerilmesi değerine (p') ulaşır. Killin yapısı tamamen deforme olmadan önce C_a artarak bir pik $C_{a\max}$ değerine p' civarlarında ulaşmaktadır. Yapı deforme olduktan sonra C_a azalarak bir denge değerine ulaşmaktadır. Ulaşılan değer yükten bağımsızdır. $C_{a\max}$ değeri LL ile pozitif doğru orantılıdır. C_a 'nın ulaştığı pik değer, kil zeminin tutulabildiği maksimum tutuk su miktarı ile orantılıdır. Bu nedenle zeminin kompozisyonunun ikincil sıkışmaya büyük etkisi vardır ve uzun temel dönem deformasyonunda etkilidir. İkincil sıkışma evresinde artık sıkışma numunenin sızma özelliklerinden bağımsız olarak gerçekleşmektedir. Bu nedenle ikincil sıkışma sürecinde gözlemlenen sıkışma konsolidasyon sürecinden daha az sızma özelliklerine, daha çok DDL kalınlığı değişimine bağlıdır. Haliyle boşluk suyu tuzluluğu arttıkça çift difüze katman teorisine uygun olarak ikincil sıkışma katsayısı (C_a) azalmaktadır. $C_a - \log p$ grafiklerinde de aşağı yönde baskılanmaya yol açmaktadır [10,33–35].

Boşluk suyu konsantrasyonlarındaki tuz yoğunluğu artışı sıkışabilirlikte azalmaya yol açmakta ve smektit içeriğinin artışıyla bu etki artış göstermektedir. Özellikle, yüksek konsantrasyonda tuz çözeltileri smektit grubu killer ile kaolinin sıkışabilirliğinin oldukça benzer hale gelmektedir. Yüksek molaritelerde tuz çözeltisine maruz kalan kilerde oldukça kısalan DDL kalınlığı kil dokusunu tahrip ettiğinden killer nonplastik davranışa yaklaşmakta ve sıkışabilirlikler benzer hale gelmektedir. Gerilme seviyesine bağlılık ile boşluk suyu yapısı, hacim değişimi indisi ve katsayısına etkisi nitel olarak mineral kompozisyonu etkisiyle yakındır. Smektit grubu mineral miktarı davranışta belirleyicidir [36]. Boşluk tuzluluğunun killerde hidromekanik davranışa etkisi şişen killer için: (i) tuz konsantrasyonu ve iyon tipinin zemin hacmi değişimine tersinir ve tersinir olmayan etkisi temelde ozmotik konsolidasyon ve ozmotik basınç ile şekillenmektedir, (ii) düşey gerilmenin artışının kimyasal değişimle gerçekleşen hacim değişimini azaltmaktadır ve (iii) tuz konsantrasyonu artışıyla sıkışabilirlik ve şişme kapasitesinin azalmaktadır [31].

Efektif düşey basıncın düşüşüyle aşırı konsolidasyona ilaveten, yumuşak kil çökellerinin jeolojik yaşlanması ve mevcut efektif düşey gerilmeden daha büyük ön konsolidasyon basıncı oluşması sırasında üç temel mekanizma söz konusudur. Mekanizmalar, sabit düşey efektif gerilemede daneler arası direncin artmasına katkıda bulunabilmektedir: (i) İkincil sıkışmayla azalan boşluk oranı nedeniyle kısa mesafe partikül etkileşimlerinde artış oluşması, (ii) Boşluk oranında azalma gerekmeksizin yapısal (structural) dirençte tiksotropik artış oluşması, levha şekilli kil danelerinin yeniden yönlendirilip kısa mesafeli kenardan yüze (E-F) bağlantıları oluşturmaları ve iyonların, iyon komplekslerinin ve adsorbe su moleküllerinin yeniden

düzenlenmesiyle daneler arası direnç artışı gözlemlenmesi ve (iii) Boşluk oranı değişimine ihtiyaç olmaksızın kation değişimi ve oksitler, karbonatlar, silikatlar ve organik moleküller gibi zemin dokusu bileşenleri tarafından oluşturulan bağları içeren kimyasal değişimler. Bu mekanizmalar hem ön konsolidasyon basıncı oluşmasına hem de kayma gerilmelerine ve sıkışmaya karşı direnç oluşmasına neden olmaktadır. Killerin sıkışma davranışında da haliyle kil minerali önemlidir. Dışarıdan yapılan gözlemlerde harici yük artışıyla zemin katmanında boyca kısılma gözlemlense de kil zemindeki hâkim mineral tipi ve zeminin bulunduğu çevresel etkilere dayalı olarak farklı yapı ve doku oluşumlarına dayalı olarak sıkışma davranışında karakteristik farklılıklar oluşmaktadır [37].

Smektit grubu kil mineralinin hâkim olduğu zeminlerde çift difüze katman kalınlığının sıkışma davranışında belirleyici olduğu belirtilmiştir. Tuz çözeltileriyle etkileşime girdiklerinde ise çift difüze katman kalınlığının kısılmasıyla tutuk halden serbest hale geçen su miktarı artmakta ve harici yük etkisi altında serbest haldeki su hızlı şekilde drene olarak sıkışma süresi azalmakta ve daha rahat sıkışabilen ve daha düşük boşluk oranına sahip bir zemin dokusu oluşmaktadır. Smektit grubu mineralin hâkim olduğu kil zeminlerde dokuda farklılıklar oluşsa da yine yük aktarma mekanizması elektriksel kuvvetlerin hâkim olduğu dokuyla gerçekleşmektedir.

Kaolin grubu minerallerin hâkim olduğu killerde de esasen çift difüze katman kalınlığının değişimi sıkışma davranışının şekillenmesinde belirleyicidir. Diğer yandan doku ve tuz etkisinin doku üzerinde neden olduğu değişiklikler de sıkışma davranışının şekillenmesinde belirleyicidir. Boşluk suyundaki tuz miktarının artışıyla hızla kısılan çift difüze katman kalınlığı ile dokudaki (molariteye bağlı olarak yüz-kenar veya yüz-yüz tipi) folikülasyon artmakta ve oluşan dokuya bağlı olarak sıkışma davranışı şekillenmektedir. Kenar – yüz tipi folikülasyonun baskın olduğu dokuda su tutma kapasitesinde ve yük etkisiyle sıkışma miktarında artış gözlenirken yüz-yüz tipi folikülasyonun baskın olduğu dokuda sıkışma miktarı azalmakta ve su tutma kapasitesi düşmektedir. Tuz etkisiyle dokudaki yük aktarma fiziko-kimyasal kuvvetlerin (kohezif kuvvetler) etkisinden mekanik ve fiziko-kimyasal etkinin beraber etkin olduğu karışık doku yapısına hızlı geçiş sağlamaktadır.

5. SONUÇLAR

İncelenen çalışmalar genel hatlarıyla göz önüne alındığında killerin mekanik davranışında kil zemindeki hâkim kil minerali, boşluk suyunun kimyasal yapısı ve kilin mekanik etkiye maruz kaldığı sıradaki yapı ve dokusu oldukça önem arz etmektedir. Kilin yük altındayken boşluk suyunun kimyasal birleşimindeki değişim dahi başlangıç ve bitiş davranışında farklılıklara yol açabilecektir. Temel zemin mekaniği deneylerinde tahribatsız (UD – undisturb) dokunun ve davranışta neden olabileceği farklılıklar kısmen göz önüne alınmıştır. Diğer yandan zemin mekaniği deneylerinde numunelerle saf su kullanılmaktadır. Bu şartlarda kilin mekanik davranışının tahmininde kullanılan hem tanımlama hem de mühendislik parametrelerinde hata oluşma ihtimali oldukça yüksek olacaktır. Güncel olarak kullanılan zemin mekaniği deneylerinin doğal boşluk suyu içeriğini göz önüne alan revizyon çalışmaları daha verimli deneysel çalışmalarla daha isabetli parametre tahminleri sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

1. Mitchell JK, Soga K. Fundamentals of soil Behavior. John Wiley& Sons, Hoboken, New Jersey, USA. 2005;
2. Sridharan A. Engineering behaviour of fine grained soils—a fundamental approach. Indian Geotechnical Journal. 1991;21:1–136.
3. Man A, Graham J. Pore fluid chemistry, stress-strain behaviour, and yielding in reconstituted highly plastic clay. Eng Geol [Internet]. 2010;116:296–310. Available from: internal-pdf://183.103.134.107/Pore-fluid-chemistry-stress-strain-behaviour-a.pdf
4. Gratchev I, Towhata I. Stress–strain characteristics of two natural soils subjected to long-term acidic contamination. Soils and Foundations [Internet]. 2013;53:469–76. Available from: internal-pdf://64.89.60.125/Stress–strain characteristics of two natural s.pdf
5. Sridharan A, Prakash K. Influence of clay mineralogy and pore-medium chemistry on clay sediment formation. Canadian Geotechnical Journal. 1999;36:961–6.
6. Di Maio C. Influence of Pore Fluid Composition on Volume Change Behaviour of Clays Exposed to the Same Fluid as the Pore Fluid. In: Loret B, Huyghe JM, editors. Chemo-Mechanical Couplings in Porous Media Geomechanics and Biomechanics [Internet]. Vienna: Springer Vienna; 2004. p. 1–17. Available from: https://doi.org/10.1007/978-3-7091-2778-0_1

7. Pontolillo DM, De Rosa J, Scaringi G, Di Maio C. Clay Creep and Displacements: Influence of Pore Fluid Composition. *Procedia Eng.* 2016. p. 69–74.
8. Jang J, Cao SC, Stern LA, Jung J, Waite WF. Impact of Pore Fluid Chemistry on Fine- Grained Sediment Fabric and Compressibility. *J Geophys Res Solid Earth.* 2018;123:5495–514.
9. Prakash K, Sridharan A. Determination of liquid limit from equilibrium sediment volume. *Geotechnique* [Internet]. 2002;52:693–6. Available from: [internal-pdf://159.36.159.28/Determination of liquid limit from equilibrium.pdf](#)
10. Jiang N, Wang C, Wu Q, Li S. Influence of structure and liquid limit on the secondary compressibility of soft soils. *J Mar Sci Eng.* 2020;8:627.
11. Schmitz RM, Schroeder C, Charlier R. Chemo–mechanical interactions in clay: a correlation between clay mineralogy and Atterberg limits. *Appl Clay Sci* [Internet]. 2004;26:351–8. Available from: [internal-pdf://189.24.94.64/Schmitz-2004-Chemo–mechanical interactions in.pdf](#) [internal-pdf://4004932370/Schmitz-2004-Chemo–mechanical interactions in1.pdf](#)
12. Jang J, Carlos Santamarina J. Fines Classification Based on Sensitivity to Pore-Fluid Chemistry. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* [Internet]. 2016;142:6015018. Available from: [internal-pdf://120.246.130.252/Fines Classification Based on Sensitivity to P.pdf](#)
13. Ghosh P. Chemical Engineering - Interfacial Engineering [Internet]. Intermolecular and Surface Forces. Indian Institutes of Technology-Department of Chemical Engineering : NPTEL ; 2012 [cited 2018 Oct 12]. Available from: <http://nptel.ac.in/courses/103103033/>
14. Holtz RD, Kovacs WD, Sheahan TC. An introduction to geotechnical engineering. 2nd ed. Prentice-Hall Englewood Cliffs; 1981.
15. Koper GJM. An Introduction to Interfacial Engineering. VSSD Delft; 2007.
16. Holtz RD, Kovacs WD, Sheahan TC. An introduction to geotechnical engineering. 2011;
17. Di Maio C. Exposure of bentonite to salt solution: Osmotic and mechanical effects. *Geotechnique.* 1996;46:695–707.
18. Horan AJ. The Mechanical Behavior Of Normally Consolidated Soils As A Function Of Pore Fluid Salinity [Internet]. *Civil and Environmental Engineering.* 2015. Available from: [internal-pdf://66.165.152.48/The mechanical behavior of normally consolidat.pdf](#)
19. Horpibulsuk S, Yangsukkaseam N, Chinkulkijniwat A, Du YJ. Compressibility and permeability of Bangkok clay compared with kaolinite and bentonite. *Appl Clay Sci.* 2011;52:150–9.
20. Naeini M. A., Jahanfar S. A. Effect of Salt Solution and Plasticity Index on undrain Shear Strength of Clays. *International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering* [Internet]. 2011;5:92–6. Available from: [internal-pdf://67.227.106.255/Effect of Salt Solution and Plasticity Index o.pdf](#)
21. Sridharan A. Engineering behaviour of fine grained soils—a fundamental approach. *Indian Geotechnical Journal: Thirteenth IGS Annual Lecture delivered on the occasion of its 32nd Annual General Session* [Internet]. 1991 [cited 2023 Mar 7];447–540. Available from: <http://www.iitg.ac.in/amurali/IGJ/IGS%20Annual%20Lectures/1990%20Prof.%20A.%20Sridharan%20-%20IGS%20Annual%20Lecture.PDF>
22. Calvello M, Lasco M, Vassallo R, Di Maio C. Compressibility and residual shear strength of smectitic clays: influence of pore aqueous solutions and organic solvents. *Italian Geotechnical Journal* [Internet]. 2005 [cited 2023 Mar 7];1:34–46. Available from: https://associazionegeotecnica.it/wp-content/uploads/2010/03/RIG_2005_1_034.pdf
23. Song MM, Zeng LL, Hong ZS. Pore fluid salinity effects on physicochemical-compressive behaviour of reconstituted marine clays. *Appl Clay Sci.* 2017;146:270–7.
24. Dor M, Levi-Kalisman Y, Day-Stirrat R, Mishael Y, Emmanuel S. Assembly of Clay Mineral Platelets, Tactoids, and Aggregates: Effect of Mineral Structure and Solution Salinity. *J Colloid Interface Sci.* 2020;566.
25. Calvello M, Lasco M, Vassallo R, di Maio C. Compressibility and residual shear strength of smectitic clays: influence of pore aqueous solutions and organic solvents. 2005; Available from: [internal-pdf://248.141.175.146/Compressibility and residual shear strength of.pdf](#)
26. Rao SM, Sridharan A, Chandrakaran S. Influence of Drying on the Liquid Limit Behavior of a Marine Clay. *Geotechnique.* 1989;39:715–9.
27. Varank G, Demir A, GÜVENÇ SY, ÖZÇOBAN MŞ. Effect of inorganic salt solutions on consistency limits of kaolinite. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi.* 2018;20:110–20.
28. Arasan S, Yetimoğlu T. Effect of Inorganic Salt Solutions on the Consistency Limits of Two Clays. *Turkish J Eng Env Sci* [Internet]. 2008;32 (2008):107 – 115. Available from: [internal-pdf://248.105.97.247/Effect of Inorganic Salt Solutions on the Cons.pdf](#)

29. Scaringi G. Influence Of Pore Fluid Composition On Clay Behaviour And Chemo-Mechanical Study Of A Clayey Landslide [Internet]. *Rischio Sismico, Ingegneria Strutturale e Geotecnica*. 2015. Available from: [internal-pdf://245.78.127.58/INFLUENCE OF PORE FLUID COMPOSITIONIN FLUENCE.pdf](internal-pdf://245.78.127.58/INFLUENCE%20OF%20PORE%20FLUID%20COMPOSITIONIN%20FLUENCE.pdf)
30. Park J, Vipulanandan C, Kim JW, Oh MH. Effects of surfactants and electrolyte solutions on the properties of soil. *Environmental Geology*. 2006;49:977–89.
31. Nguyen XP, Cui YJ, Tang AM, Deng YF, Li XL, Wouters L. Effects of pore water chemical composition on the hydro-mechanical behavior of natural stiff clays. *Eng Geol*. 2013;166:52–64.
32. Dutta J, Mishra AK. Consolidation behaviour of bentonites in the presence of salt solutions. *Appl Clay Sci*. 2016;120:61–9.
33. Wu Z, Deng Y, Cui Y, Zhou A, Feng Q, Xue H. Experimental Study on Creep Behavior in Oedometer Tests of Reconstituted Soft Clays. *International Journal of Geomechanics*. 2019;19.
34. Deng YF, Cui YJ, Tang AM, Li XL, Sillen X. An experimental study on the secondary deformation of Boom clay. *Appl Clay Sci*. 2012;59–60:19–25.
35. Miao L, Kavazanjian E. Secondary compression features of Jiangsu soft marine clay. *Marine Georesources and Geotechnology* [Internet]. 2007;25:129–44. Available from: <https://doi.org/10.1080/10641190701380258>
36. Di Maio C, Santoli L, Schiavone P. Volume change behaviour of clays: The influence of mineral composition, pore fluid composition and stress state. *Mechanics of Materials*. 2004;36:435–51.
37. Mesri G, Castro A. $C\alpha/Cc$ concept and K_0 during secondary compression. *Journal of Geotechnical Engineering*. 1987;113:230–47.