Sepiyolit Katkısının Kumların Statik Sıvılaşması Üzerine Etkisinin Araştırılması

Sinan Gürbüz

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Şubat 2022

Investigating the Effect Of Sepiolite Suspension on Static Liquefaction of Sands

Sinan Gürbüz

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Civil Engineering

February 2022

Sepiyolit Katkısının Kumların Statik Sıvılaşması Üzerine Etkisinin Araştırılması

Sinan Gürbüz

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Geoteknik Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Doç. Dr. Kâmil Bekir Afacan

Şubat 2022

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Dr. Kamil Bekir Afacan danışmanlığında hazırlamış olduğum "Sepiyolit Katkısının Kumların Statik Sıvılaşması Üzerine Etkisinin Araştırılması" başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyanederim. 11/02/2022

Sinan Gürbüz

İmza

ÖZET

Suya doygun kohezyonsuz zeminlerin sıvılaşması geoteknik mühendisliği açısından büyük öneme sahip bir olgu olmuştur. Dinamik veya statik yükler sonucu gerçekleşen bu olay çoğu zaman büyük yer değiştirmelere neden olarak ciddi ekonomik ve sosyal zararlara sebep olmaktadır. Tarih boyunca sıvılaşma meydana gelmiş suya doygun gevşek kumların önemli bir çoğunluğunun belli miktarlarda silt muhteva ettiği görülmüştür. Siltlerin drenajsız koşulda monotonik yükleme altında statik sıvılaşma potansiyeline etkisi araştırmacılar tarafından uzun süredir tartışma konusu olmuştur. Bu nedenle silt içeren kumlu zeminlerden oluşan su altı şevleri, kıyı ve liman zeminleri ve hidrolik dolgular gibi yapıların monotonik yükleme altında statik sıvılaşma potansiyelinin belirlenebilmesi için drenajsız üç eksenli basınç deneyleri yapılması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında temiz kumlar ve siltli temiz kum karışımları üzerinde drenajsız üç eksenli basınç deneyleri gerçekleştirilmiş ve siltlerin temiz kumların genişleme davranışına ve statik sıvılaşma potansiyeli üzerine etkisi araştırılmıştır. Bunun için %6 ve %12 oranında hazırlanan siltli temiz kum karışımları, %0, %10 ve %20 rölatif sıkılık oranlarında nemli tokmaklama yöntemi ile yerleştirilip 50,100 ve 150 kPa çevre basınçları altında drenajsız üç eksenli basınç deneyiyle monotonik yükleme uygulanmıştır. Silt içeriğinin artışıyla temiz kumların genişleme davranışının arttığı ve buna bağlı olarak aşırı boşluk suyu basıncında artış gerçekleşerek gevşek kum zeminler için statik sıvılaşma potansiyelini artırdığı açıkça görülebilmektedir. Daha sonra bu çalışmanın esas amacını oluşturan doygun kumlarda sıvılaşmayı azaltmak için sepiyolit katkısı kullanılmıştır. Sepiyolit su emme kapasitesi çok yüksek olan doğal bir kil mineralidir, öyle ki kendi ağırlığının 200-250 katı kadar su emebilir. Bu özelliği sıvılaşmanın temel nedeni olan aşırı boşluk suyu basıncını azaltmak amacıyla kullanılmıştır. Tamamen statik sıvılaşma görülen siltli temiz kum karışımları ile %4, %5 ve %7 olmak üzere üç farklı oranda sepiyolit karıştırılmıştır. Sonuç olarak sepiyolitin aşırı boşluk suyu basıncı artışını önemli ölçüde azaltarak sıvılaşmanın önüne geçtiği ve kum numunelerinin davranışını değiştirdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Gevşek kum, Silt, Sepiyolit, Statik Sıvılaşma, Boşluk Suyu Basıncı, Üç Eksenli Basınç

SUMMARY

The liquefaction of the saturated cohesionless soils is very important phenomenon for geotechnical engineers. This event, which occurs under cyclic or static loadings most of the times causes large deformation which leads to serious economic or social damages. Throughout history, it has been observed that a significant majority of liquefied saturated loose sands contain certain amount of silt. The effects of silts on the static liquefaction potential under monotonic loadings with undrained conditions has long been the subject of debate by researchers. For this reason, undrained triaxial compression tests required to determine the potential of static liquefaction under monotonic loading of the structures such as submarine slopes, mine tailings and hydraulic fillings containing silty sands. In this study, undrained triaxial compression tests carried out on clean sands and silt clean sand mixtures and effects of the silts on dilative response and static liquefaction potential investigated. For this purpose, silt clean sand mixtures prepared in 6% and 12% ratios were deposited %0, %10 and %20 relative densities with moist-tamping method and monotonic loading were applied with undrained triaxial compression tests under 50,100 and 150 kPa confining pressures. With the increasing silt content, it can be clearly seen that the dilative response of clean sands increases and therefore building more excess pore pressure which leads to increasing the potential for static liquefaction for loose sand samples. Then, sepiolite suspension was used to liquefaction mitigation on saturated sands, which constituted the main purpose of this study. Sepiolite is a highly absorbent natural clay mineral that can absorb 200-250 times of water than its own weight. This feature has been used to reduce excess pore pressure which is the main cause of the liquefaction phenomenon. Mixed in three different ratios which is 4%, 5% and 7% with silt clean sand mixtures that completely static liquefied. As a result, it has been observed that sepiolite prevents complete static liquefaction by reducing excess pore pressure and changes the behavior of sand samples.

Keywords: Loose Sand, Silt, Sepiolite, Static Liquefaction, Pore Pressure, Triaxial Compression

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET vi
SUMMARY vii
TEŞEKKÜR viii
İÇİNDEKİLER ix
ŞEKİLLER DİZİNİ xi
ÇİZELGELER DİZİNİ xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ xiv
1. GİRİŞ VE AMAÇ 1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 4
3. STATİK SIVILAŞMA 14
3.1. Genel Tanım 14
3.2. Sıvılaşma Mekanizması 14
3.3. Monotonik Yükleme 15
3.4. Akma Tipi Sıvılaşma 17
3.4.1 Akma sıvılaşması yüzeyi 17
3.4.2 Akma tipi sıvılaşmasının gelişimi 17
3.5 Aşırı Boşluk Suyu Basıncının Etkisi 18
3.6. Kririk Boşluk Oranı 18
3.7 Siltlerin Statik Sıvılaşmaya Etkisi 22
3.8 Sepiyolitin Statik Sıvılaşmaya Etkisi 23
4. MATERYAL ve YÖNTEM 25
4.1 Deneyde Kullanılan Numuneler 25
4.1.1 Temiz kum 25
4.1.2 Silt 26
4.1.3 Sepiyolit 27
4.2 Zemin Özelliklerinin Belirlenmesi 28
4.2.1 Elek analizi deneyi 28

İÇİNDEKİLER(devam)

Sayfa

4.2.2 Özgül ağırlık deneyi 29
4.2.3 Maksimum ve minimum boşluk oranları 31
4.2.4 Hidrometre deneyi 33
4.3 Numune Hazırlama Yöntemleri 34
4.4 Üç Eksenli Basınç Deney Sistemi 35
4.4.1 Deney sisteminin hazırlanması 36
4.4.2 Numunenin sisteme yerleştirilmesi 37
4.4.3 Numunenin doyurulması 38
4.4.4 Konsolidasyon aşaması 39
4.4.5 Kesme aşaması 40
5. BULGULAR ve TARTIŞMA 41
5.1 Temiz Kumun Davranışı 43
5.2 Siltin Temiz Kumun Davranışına Etkisi 46
5.3 Siltli Temiz Kumlarda Göreceli Sıkılığın Etkisi 51
5.4 Sepiyolitin Siltli Temiz Kumların Statik Sıvılaşmasına Etkisi 55
5.5 Başarısız Deneyler Serisi 60
5.5.1 Numune yerleştirme yönteminin etkisi 60
5.5.2 Doygunluk aşamasında gerçekleşen aşırı konsolidasyon durumu 62
6. SONUÇ ve ÖNERİLER 63
KAYNAKLAR DİZİNİ 66
EK AÇIKLAMALAR 70
Ek Açıklama-A: Kullanılan Numunelerin Deviatör Gerilme-Şekil Değiştirme Grafikleri 71
Ek Açıklama-B: Deneylerin Yapılışına Ait Fotoğraflar 82

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

3.1. Zeminin a) sıvılaşma öncesi durumu b) sıvılaşma sonrası durumu 15
3.2. Drenajsız koşullarda basınç deneyleriyle kumların olası dayanım grafikleri (Castro, 1969) 16
3.3. Akma tipi sıvılaşmaya duyarlı ve duyarsız olan zeminlerin ayrılmasında kullanılan KBO çizgisi (Kramer, 1996) 19
3.4. Sabit boşluk oranında drenajsız monotonik yükleme davranış diyagramı (Şematik) a) Hal Diyagramı b) q-p Grafiği (Alarcon-Guzman, vd. 1988).....21
3.5. Tersine davranış a) yerleştirildikten sonra b) konsolidasyon sonrası kesme aşamasında (Lade ve Yamamuro, 1997) 22
3.6. Siltli kumun davranışı a) yerleştirildikten sonra b) konsolidasyon sonrası kesme aşamasında (Lade ve Yamamuro, 2011) 23
4.1. Deneysel çalışmada kullanılan a) temiz kum ve b) elek takımı 26
4.2. Deneysel çalışmada kullanılan silt numunesi 27
4.3 Beyaz sepiyolit ve yüksek kaliteli kahverengi sepiyolit 28
4.4. Elek üstü kalan daneler.....29
4.5. Özgül ağırlık deneyi 30
4.6. Islak sıkıştırma yöntemiyle yapılan e_{min} deneyi.....32
4.7. Deneyde kullanılan numunelerin dane dağılım eğrileri 33
4.8. Silt ve Sepiyolit numunelerinin hidrometre deneyleri 34
4.9. Üç eksenli basınç deney sistemi 36
4.10. Nemli tokmaklama yöntemi şematik gösterim 37
4.11. Yerleştirilmiş ve vakumlanmış numune 38
4.12. B değeri kontrol grafiği 39
4.13. Kesme aşamasından bir grafik örneği 40
5.1. Kumların statik yükler altında davranışı Bardet (1997).....43
5.2. %0 göreceli sıkılıktaki CEN temiz kumunun deney sonuçları.....45
5.3. Siltli temiz kum numunelerinin temiz kum ile karşılaştırılması a) 50 kPa b) 100 kPa c) 150 kPa çevre basınçları altında 49
5.4. Tamamen statik sıvılaşan ve sıvılaşma gerçekleşmeyen numunenin farkı 51

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil **Sayfa**

5.5. Sıkılık farkının siltli temiz kum numuneleri üzerine etkisi a) 50 kPa b) 100 kPa c) 150 kPa çevre basınçları altında 54

5.6. Sepiyolit katkısının sıvılaşabilir siltli temiz kum karışımları üzerine etkisi a) 50 kPa b) 100 kPa c) 150 kPa çevre basınçları altında 59

5.7. Tam doygun özellik göstermeyen bir numunenin kesme aşaması sonrası durumu 62

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge **Sayfa**

4.1. Temiz kumun fiziksel özellikleri ve zemin sınıflandırması 25

4.2. Deneysel çalışmada kullanılan numunelerin özgül ağırlıkları.....30

4.3. Deneyde kullanılan numunelerin maksimum ve minimum boşluk oranları 32

4.4. Deney setleri ve malzeme oranları.....35

5.1. Konsolidasyonlu drenajsız üç eksenli deney sonuçları özeti.....42

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
ρd	Kuru yoğunluk
ρw	Suyun birim hacim kütlesi
σvo	Toplam düşey gerilme
σ'vo	Efektif düşey gerilme
Cc	Eğrilik katsayısı
Cu	Üniformluk katsayısı
D10	Ağırlıkça %10'dan daha ince için çap
D30	Ağırlıkça %30'dan daha ince için çap
D60	Ağırlıkça %60'tan daha ince için çap
Dr	Göreceli sıkılık
e	Boşluk oranı
emak	Maksimum boşluk oranı
emin	Minimum boşluk oranı
Gs	Özgül ağırlık
Ms	Kuru numune kütlesi
V	Hacim
kPa	Kilo paskal
c	Kohezyon
u	Boşluk suyu basıncı
τ	Kayma gerilmesi
g	Gram
Hz	Hertz
mm	Milimetre
cm	Santimetre
dk	Dakika

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

Kısaltmalar	Açıklama
ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Standartları Birliği
CEN	Avrupa Standartlar Komitesi
TS	Türk Standardı
USCS	Birleşik Zemin Sınıflama
ASY	Akma Sıvılaşması Yüzeyi
KBO	Kritik Boşluk Oranı
CU	Konsolidasyonlu-Drenajsız

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Suya doygun kohezyonsuz zeminlerin sıvılaşması durumu geoteknik mühendisliğindeki en çok merak edilen aynı zamanda da en karmaşık olgularından biri olmuştur. Aşırı boşluk suyu basıncının yükselmesi sonucu efektif gerilmenin sıfırlanarak zeminin viskoz özellik göstermesi halinde meydana gelen sıvılaşma, taşıma gücü kayıpları ve buna bağlı büyük yer değiştirmelere sebep olarak ciddi yapısal hasarlara neden olabilir. Literatür de sıvılaşma kavramı genellikle depremler nedeniyle meydana gelen dinamik yüklemeler sonucunda oluşan bir durum olarak bilinir. Castro (1969) yaptığı çalışma ile monotonik yükleme nedeniyle drenajsız koşullarda ani aşırı boşluk suyu basıncı geliştiren kumların da sıvılaşabileceğini göstermiş ve bunu statik sıvılaşma olarak tanımlamıştır.

Lade ve Yamamuro (2011) yayınlarında bugüne kadar çeşitli yapılarda meydana gelmiş 20 statik sıvılaşma örneğinden bahsetmiştir. Her ne kadar SPT, CPT ve kuyu yöntemi kullanarak, kayma dalgası hızı belirleme gibi arazi deneyleri ile sismik yükler altında sıvılaşma potansiyeli tahmini yapılabilse de statik yükler altında sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi için benzer arazi deneylerine dayanan bir yöntem bulunmamaktadır. Bu sebeple kumlu zeminlerden oluşan setler, dolgular, kıyı ve liman zeminleri, sualtı şevleri ve hidrolik dolgular vb.… gibi mühendislik yapılarının statik yükler altında sıvılaşma potansiyellerinin belirlenmesi için drenajsız üç eksenli basınç deneyi yapılması gerekmektedir (Etminan, 2016). Ayrıca Jefferies ve Been (2016), kitaplarında eğer kalıcı kayma dayanımı yeterliyse tekrarlı yüklemelerin zeminin dayanımını kaybetmesine yol açarak yapıların zemine gömülmesine neden olacağını ve bu durumun can kaybı yaşatmasının pek de ihtimal dahilinde olmadığını ifade etmişlerdir. Öte yandan tarih boyunca statik sıvılaşma nedeniyle yüzden fazla insanın hayatını kaybettiği birden fazla olayın gerçekleştiğini belirtmişlerdir.

Bu çalışmada CEN temiz kumu üzerinde drenajsız üç eksenli basınç deneyleri gerçekleştirilmiş ve monotonik yükleme altında davranışı incelenmiştir. Lade ve Yamamuro (1997) yaptığı çalışmada temiz kumların çok düşük göreceli sıkılık oranlarında dahi içerisinde silt bulunan kumlar kadar kolay sıvılaşmayacağını söylemiştir. Bunun sebebi

olarak temiz kumların daha hızlı şekilde genişleme eğiliminde davranacağı ve bunun sonucu olarak da statik sıvılaşma potansiyelinin düşük olduğunu belirtmiştir. Temiz Ottawa kumu ile yaptıkları çalışma esnasında tamamen statik sıvılaşma gerçekleşmesi için göreceli sıkılık gerçek dışı olan %0 seviyesine kadar düşürülmüştür. CEN temiz kumu ise %0 göreceli sıkılıkta bile genişleme eğiliminden ötürü sıvılaşmamıştır. Ishihara (1993) sıvılaşma meydana gelmiş zeminlerin içerisinde bir miktar ince dane bulunduran gevşek kumlar olduğunu ifade etmiş ve temiz kumlardan ziyade siltli kumlar üzerine yoğunlaşmanın daha gerekli olduğunu savunmuştur. Buradan yola çıkarak bu çalışmada kuru kütlesine oranla farklı yüzdelerde silt temiz kuma eklenerek silt-temiz kum karışımları hazırlanmış ve siltin temiz kumların sıvılaşma potansiyeline etkisi araştırılmıştır. Siltlerin kumların drenajsız davranışına etkisi geçmiş yıllarda birçok araştırmacı tarafından araştırılmıştır. Fakat gözlemler ve sonuçlar hakkında ortak bir karar bulunmamaktadır bazı araştırmacılar siltlerin sıvılaşma potansiyelini artırdığını söylerken bazıları ise aksini savunmuştur. Bu fikir ayrılığının olası sebeplerinden bazıları farklı numune yerleştirme yöntemleri, kullanılan çevre basınçları, rölatif sıkılıklar, silt içeriği, siltin dane dağılımından ve siltin karakteristiğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. (Lade ve Yamamuro, 2011)

Kumların drenajsız koşullarda sıvılaşma potansiyelini etkileyen ne etkili faktörlerden biri numunenin yerleştirilme biçimidir. Bu çalışmada literatürde en yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri olan nemli tokmaklama (Castro, 1969; Kramer ve Seed, (1988); Ishihara, 1993) yöntemi bütün numuneler için kullanılmıştır. Nemli tokmaklama yöntemi numunede yapay bir kohezyon oluşturmaktadır ve numune içerisinde hacimsel boşluklar yaratarak statik sıvılaşma potansiyelini artırdığı düşünülmektedir. Diğer önemli faktör ise kullanılan siltin dane dağılımıdır. Siltler statik sıvılaşma potansiyelini iki şekilde artırabilmektedirler. Bunlardan ilki iri daneler arasına yerleşip kesme esnasında iri daneleri temas halinde tutarak daha büyük hacimsel boşluklar oluşturmalarından yani genişleme eğilimini artırmalarından kaynaklanmaktadır. İkinci durumda ise ince danelerin içsel çekim kuvveti yer çekim kuvvetinden daha etkili olarak ince danelerin bir arada kalma eğiliminde olması ve boşluk oranını artırmasıdır. Diğer faktörlerde ise literatürde bir fikir birliği sağlanmıştır. Statik sıvılaşma gevşek kumlarda ve düşük çevre basınçlarında gerçekleşen bir olaydır. Bu çalışmada gevşek temiz kumların ve siltllerin gevşek temiz kumların statik sıvılaşma potansiyeline etkisini araştırmak amacıyla, iki farklı silt yüzdesiyle, üç farklı düşük çevre

basıncında ve iki farklı rölatif sıkılıkta konsolidasyonlu drenajsız üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır.

Daha önceden bahsedildiği üzere sıvılaşma dinamik ya da statik yüklere maruz kalan zeminin aşırı boşluk suyu basıncındaki artış nedeniyle efektif gerilmenin sıfıra düşmesi ve zeminin taşıma gücünü kaybetmesidir. Sıvılaşabilir zeminler için birçok zemin iyileştirme tekniği bulunmaktadır. Bunlardan başlıca mekanik, hidrolik, fiziksel ve kimyasal olarak sınıflandırılabilir. Literatürde birçok farklı katkı malzemesi sıvılaşmayı engellemek amacıyla zeminlerle karıştırılmıştır. Bu çalışmada katkı malzemesi olarak sepiyolit kullanılmıştır. Sepiyolit magnezyum hidrosilikatten oluşan doğal bir kil mineralidir. Sepiyolit kendine has yapısı ile yüksek oranda su emici özellik gösterir. Kendi ağırlığının 2-2,5 katı kadar su emebilmektedir. Bu özelliğinden faydalanarak sepiyolit, sıvılaşmanın temel faktörü olan suyu katkı içerisine hapsederek kum zeminlerden uzaklaştırmayı ve aşırı boşluk suyu basıncındaki artışa engel olarak ya da azaltarak sıvılaşmayı önlemek amacıyla kullanılmıştır.

Siltli temiz kum karışımlarına üç farklı oranda sepiyolit eklenerek ve diğer parametreler aynı tutularak optimum katkı oranı araştırılmıştır. Sepiyolit yüksek yüzey alanına sahip ucuz ve çevre dostu bir malzeme olarak diğer katkıların belirli koşullarda önüne geçmektedir. Bu çalışma kapsamında sepiyolitin etkisi monotonik yükleme altındaki tamamen statik sıvılaşan siltli temiz kum üzerinde araştırılmıştır. Dinamik etkilerde göz önüne alınarak sepiyolit ile çalışmalar çeşitlendirilebilir ve kullanım alanı artırılabilir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Sıvılaşma olayı uzun yıllar boyunca araştırmacılar tarafından birçok farklı bakış açısıyla incelenen bir konu olmuştur. Bu başlık altında araştırmacıların teferruatlı çalışmalarının bu tezle ilişkili kısımlarına değinilmiştir.

Anderson ve Bjernum (1968), yaptıkları çalışmada İskandinavya'nın çok gevşek kum ve siltlerden oluşan zemin yapısına sahip sualtı şevlerini incelemişlerdir. Bu çalışmada sualtı şevlerindeki kayma mekanizmasını açıklamak için Terzaghi tarafından önerilen yarı kararlı dane yapısı terimini kullanmışlardır. Fakat yazarlar o sıralarda şev kaymalarının mekanizmasını gerçek manada kavrayamadıklarını kabul etmiştir. Yaptıkları deformasyon kontrollü drenajlı ve drenajsız üç eksenli basınç deneyleri sonucu ince kumların ve iri siltlerin akma davranışına karşı daha kırılgan zeminler olduğunu keşfetmişlerdir. Ayrıca deneyde kullanılan numunelerin yüksek boşluk oranını içerdikleri ince danelere bağlamış ve hem numune yerleştirme yönteminin hem de dane dağılımı karakteristiğinin akma davranışına etkili olduğu saptanmıştır.

Daha sonra Castro (1969), Ottawa kumları üzerinde monotonik ve tekrarlı yüklemelerle drenajsız koşulda üç eksenli deneyler yapmıştır. Monotonik yüklemeler ile yaptığı deneyler sonucunda göreceli sıkılık arttıkça numunelerin sıvılaşma potansiyelinde düşüş olduğu anlaşılmıştır. Bu çalışmada yapılan hiçbir numune de tamamen sıvılaşma (gerilmenin sıfıra düşmesi) gerçeklememiştir fakat %37 ile en düşük göreceli sıkılıkta hazırlana numune Youd'un ''limitsiz akma'' olarak nitelendirdiği duruma ulaşmıştır. Sıvılaşma olayına genel bir tanım arama amacıyla Youd (1973) bir literatür taraması gerçekleştirmiş ve Castro (1969) yaptığı dinamik üç eksenli deneylerden elde ettiği veriler ile tekrarlı yükleme esnasında oluşan aşırı boşluk suyu basıncının numune sıvılaşana veya limitsiz akma duruma gelene kadar devam ettiğini saptamıştır.

Kohezyonsuz zeminlerle yapılan dinamik üç eksenli deneylerinin yaygın olduğu bu sıralar, Casagrande (1975), dinamik sıvılaşma ve akma sıvılaşması arasında daha belirgin bir ayrım olması gerektiği kanaatine varmıştır. Akma tipi sıvılaşmanın sıkı kumlar için monotonik yüklemeler altında gerçekleşmezken tekrarlı yüklemeler altında bu kumların sıvılaşabildiğini vurgulamıştır.

Aynı yıl Castro (1975), ‘’kararlı hal’’ terimini hem akma tipi hem de dinamik durum için ortaya çıkardı. Bu terimi de numune en yüksek dayanıma ulaşması ardından göreceli büyük deformasyonlar sonrası ortaya çıkan kalıcı kayma dayanımı ile açıkladı. Gevşek kumlar ile yaptığı drenajsız monotonik ve tekrarlı yüklemeler sonucunda kararlı hal teorisi uygun görünüyordu fakat hala deneyde kullanılan numunelerin yeterli deformasyon seviyelerine ulaşana kadar deneye tabi tutulduğu konusunda şüpheler mevcuttu, bütün numuneler %20 deformasyon seviyesine ulaştığı anda deneyler sonlandırılmıştı. Casagrande’nin daha önce yaptığı çalışmalarla birlikte, Castro numunelerde deformasyon artışı sürdüğü halde hacim ve dayanımının sabit kaldığı duruma kritik durum adını vermiş ve kritik durumun boşluk oranıyla ilişkili olduğunu eklemiştir.

İki yıl sonra, Castro ve Poulos (1977), kararlı hal çizgisini ortaya çıkardı, bu çizgi zeminlerin boşluk oranına karşı efektif çevre basıncı grafiğinden elde edilen ve zeminin daralma ya da genişleme eğiliminde olduğunu anlamak için kullanılmıştır. Buna göre çizgi üzerinde kalan numuneler akma tipi sıvılaşma gerçekleştirirken, çizgi altında kalan numuneler ise dinamik sıvılaşmaya maruz kalmaktadır. Ayrıca yazarlar bu çalışmada statik ve dinamik sıvılaşmayı etkileyen faktörleri incelemişlerdir. Efektif çevre basıncının akma tipi sıvılaşma için en önemli faktörlerden biri olduğunu saptamışlardır.

Mulilis vd. (1977), numune hazırlama yöntemlerinin ve göreceli sıkılığın izotropik olarak konsolide edilmiş numunelerin drenajsız koşullar altında davranışını tekrarlı yüklemeler uygulayarak inceleyen bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmaya göre nemli tokmaklama yöntemi ile hazırlanan numunelerin diğer yöntemlere göre sıvılaşma direncinin daha yüksek olduğunu belirtmiştir. Sıkılık üzerindeki ufak farklılıkların bile numunenin

davranışında büyük değişimlere sebep olabileceği ve farklı şekillerde dayanımı etkileyebileceği sonucuna ulaşmıştır.

Hanzawa vd. (1979), Arap körfezlerindeki zemin davranışlarını araştırdığı çalışmasında ilk kez ‘’hassas kum’’ terimini literatüre sokmuştur. Yaptığı tanımlama deneyleri sonrası zeminlerin %20-30 ince dane oranına sahip gevşek kumlar olduğunu sonucuna varmıştır. Yazarlar bu tarz zeminler üzerinde örselenmemiş numune almak mümkün olmaması nedeniyle kendi geliştirdiği özel bir metot kullanmışlardır. Yaptıkları monotonik ve tekrarlı yüklemeler neticesinde bütün numunelerin daralma eğilimine sahip olduğu ve bu sebeple sıvılaşma potansiyelinin yüksek olduğu saptanmıştır. Ayrıca yazarlar numunelerin göstermiş olduğu bu aşırı daralma eğilimini silt ve kum daneleri arasındaki yarı kararlı bağ yapısından kaynaklanabileceğini ifade ederek, dane dağılımının sıvılaşma potansiyeline önemini vurgulamıştır. Bu çalışma, Castro (1969) tarafından gerçekleştirilen ve yuvarlak dane yapısına sahip kumların, köseli dane yapısına sahip kumlara göre daha fazla sıvılaşabilir olduğunu ifade ettiği çalışma ile paralellik göstermiştir.

Sladen vd. (1985), Beafort denizinde konumlanmış yapay adalarda meydana gelen kaymaları inceledikleri çalışmalarında ilk defa ‘’göçme yüzeyi’’ terimini kullanmışlardır. Göçme yüzeyi normal kuvvet, kesme kuvveti ve boşluk oranından (Cambridge’in p-q diyagramına boşluk oranının eklenmesi) oluşmaktadır ve kumların sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi için kullanılmaktadır. Yazarlar drenajsız koşullarda yapılan üç eksenli deneylerde, göçme yüzeyi üzerinde veya yakın olan numunelerde sıvılaşma meydana geleceğini belirtmiştir. Yapılan çalışmalar sonrası Beafort denizindeki ince dane oranının %0 ile %15 arasında değiştiğini tespit eden yazarlar saha koşullarını yansıtmak amacıyla %0, %2 ve %12 ince dane oranına sahip numuneler hazırlamışlardır. Yaptıkları çalışmalar ile ince dane oranı arttıkça numunelerde dayanım düşüşünü net bir şekilde gözlemlemişlerdir. Ayrıca ince dane oranı arttıkça kumlarda sıkıştırılabilirliğin artığını ve geçirgenliğin azaldığı sonucuna ulaşılmıştır.

Kumların drenajsız koşullarda davranışını araştırmak amacıyla Vaid ve Chern (1985), içlerinde monotonik ve tekrarlı yükleme de dahil olmak üzere birçok laboratuvar

deneyi gerçekleştirmişlerdir. Biri köşeli kenarlı kum ve diğeri de yuvarlak kenarlı Ottawa kumu olmak üzere iki farklı numune üzerinde çalışmalarını yürütmüşler ve kumların şeklinin sıvılaşma potansiyelini etkisini incelemişlerdir. Monotonik üç eksenli deneyler sonucunda bu çalışmada kullanılan kum numunelerinin bazılarında geçici sıvılaşma gerçekleşmiş olsa dahi hiçbirinde tamamen sıvılaşma gerçekleşmemiştir. Araştırmacıların deneylerinde çok yüksek çevre basınçları kullanmaları (100-2500 kPa) tamamen sıvılaşma gerçekleşmemesine neden olmuştur. Aynı numune ile dinamik üç eksenli deneyi gerçekleştiren araştırmacılar, dinamik deneylerin sonucunun monotonik yüklemeyle bağlantılı olduğunu görmüştür. Monotonik yükleme altında geçici sıvılaşma gerçekleştiren numuneler, tekrarlı yüklemeler altında ise daralma eğilimi göstermişlerdir. Aynı yerleştirme yöntemiyle ve aynı göreceli sıkılıkta yerleştirilen numuneler ile yapılan bu deney sonuçları ışığı altında görülmüştür ki kumların drenajsız koşullardaki davranışları yükleme biçimine değil efektif çevre basıncı ve boşluk oranına bağlı olarak değişmektedir.

Aynı yıl Troncoso ve Verdugo (1985), içeriğindeki silt yüzdesi %0 ile %30 arasında değişen siltli kum numuneleri üzerinde monotonik ve tekrarlı üç eksenli deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Yazarlar yaptıkları deney sonucunda ince dane oranı arttığı takdirde içsel sürtünme açısında düşüş gözlemlemişlerdir. İnce dane oranı arttıkça zeminlerin daha sıkıştırılabilir hale gelmesinden ötürü sıvılaşma potansiyelinin arttığını belirtmişlerdir. İnce dane oranı arttıkça karışımların sıvılaşmaya karşı daha dayanıksız olduğunu gözlemlemişlerdir. Bunun nedenini ince danelerin gelişigüzel olarak kumlar arasındaki boşluklara yerleşmesi ve kum daneleri arası bağları zayıflatması olarak göstermişlerdir.

Üç yıl sonra Kuerbis vd. (1988) ince dane oranının ve dane dağılımının etkisini araştırma amacıyla drenajsız koşullarda monotonik ve tekrarlı yüklemelerle üç eksenli deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Brenda maden bölgesinden alınan kum numunesi ile Kamloopse siltini farklı dane dağılımına sahip olacak şekilde çeşitli yüzdelerde karıştırarak hazırlanan numuneler ile geniş kapsamlı bir deneysel çalışma sergilemişlerdir. Bu deneysel çalışmada numune yerleştirme yöntemi olarak bulamaç yönteminin kullanıldığını belirtmek gerekmektedir. Monotonik yükleme yapılan temiz kum numunelerinin (%0 ince dane) deney sonuçlarına göre dane boyutu küçüldükçe genişleme eğiliminin arttığı tespit edilmiştir,

Tekrarlı yükleme deneylerinin sonuçlarına göre ise dane dağılımının küçülmesi tam tersi bir davranış göstererek daralma eğilimi göstermiştir. Bütün siltli numuneler için ise ince dane oranındaki artış genişlemene eğiliminin artmasına sebep olmuştur. Yapısal olarak silt danelerinin kum daneleri arasındaki boşluklara yerleşerek daha sıkı bir yapı oluşturduğu gözlenmiştir.

Aynı yıl Alarcon-Guzman vd. (1988), kararlı hal çizgisinin özellikle yüksek ölçüde daralma eğilimi gösteren kumlar için tek başına yeterli olmadığı ifade ederek yeni bir diyagram sunmuşlardır. Sunulan bu diyagram Castro ve Poulos (1977) tarafından sunulan iki bölümden oluşan (daralma ve genişleme) diyagrama göre daha detaylı olarak üç bölümden oluşmaktadır. Bunlar; yumuşama bölgesi, geçiş bölgesi ve pekleşme bölgesidir. Yazarların hipotezine göre drenajsız koşullarda yapılan üç eksenli deneylerde yumuşama bölgesinde bulunan numuneler kesme esnasında tamamen sıvılaşmaya maruz kalır. Öte yandan pekleşme bölgesinde bulunan numuneler ise genişleme eğilimindedirler ve kesme aşaması boyunca numune dayanım kazanmaya devam eder. Son olarak geçiş aşamasındaki numuneler ise geçici sıvılaşma görülen numunelerdir. Yani kesme esnasında dayanımda bir miktar azalma görülmesinin ardından genişleme eğilimi kontrolü devralarak dayanım kaybını sona erdirir ve dayanım artışı gerçekleşir.

Yine aynı yıl Kramer ve Seed (1988), gerilme kontrollü olarak monotonik yüklemeli üç eksenli basınç deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada esasen sıvılaşma olayının başlangıç koşullarını araştırmaya yoğunlaşmışlardır. Deneysel çalışma için Sacramento temiz kumu ve %12 ince dane içeriğine sahip siltli kum kullanmışlardır. Numune yerleştir yöntemi olarak nemli tokmaklama yöntemi tercih edilmiştir ve deneyler drenajsız koşullarda gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerin sonuçlarına göre çevre basıncı ve göreceli sıkılık arttığı takdirde sıvılaşma potansiyelinde düşüş yaşandığı tespit edilmiştir.

Kararlı hal davranışını incelemek amacıyla Konrad (1993), hem monotonik hem de tekrarlı yüklemeler uyguladığı üç eksenli deneyler gerçekleştirmiştir. Deneysel çalışmada iki farklı kum numunesi kullanmıştır. Bunlar; Houston temiz kumu ve %32 ince dane oranına sahip Till kumudur. Çoğu zaman sahadaki zemin yapısını tam olarak yansıtmadığını

düşünmesine rağmen, numune yerleştirme yöntemi olarak nemli tokmaklama yöntemini seçmiştir. Deney sonuçlarına göre, bütün deneylerin düşük deformasyon sevilerine gelindiğinde sonlandırıldığı (monotonik yüklemeler için %20 ve tekrarlı yüklemeler için %12) sonucuna ulaşılmıştır. Sahada görülen sıvılaşma vakaları için bu deformasyon seviyeleri yeterli gibi görünse dahi, bu deformasyon seviyelerinde zeminlerin kararlı hale ulaştığını söylemek doğru değildir. Kararlı hale ulaşmak için zeminlerde boşluk suyunun sabitlenmesi gerektiğini ifade ederek yazar teorisini desteklemiştir. Bu çalışmaya göre zeminlerin kararlı hale ulaşması aslında daralma eğilimi gösteren zeminlerin dönüşüm geçirerek genişleme eğilimine geçmesi olduğu sonucu çıkarılmaktadır.

Aynı yıl Ishihara (1993)**,** kohezyonsuz zeminlerin sıvılaşması ile ilgili geniş bir çalışma yapmıştır. Çalışmasına sıvılaşma gerçekleşen zeminlerin bir miktar ince dane içeren çok gevşek kumlar olduğunu ifade ederek başlamıştır. Konu sıvılaşma olduğu takdirde temiz kumlarla çalışmaktansa bir miktar silt içeren kumlar üzerinde çalışmanın daha uygun olacağını belirtmiştir. Venezüella bölgesinden elde ettiği siltli kum numunesini iki farklı çevre basıncı altında izotropik olarak konsolide ederek drenajsız koşullarda monotonik yükleme uygulamıştır. Numune yerleştirme yöntemi olarak bazı numuneler için kuru huni yöntemi kullanırken bazıları için ise suyla çökertme yöntemini kullanmıştır. Bütün numuneler için çevre basıncı arttığında sıvılaşma potansiyelinde düşüş görülmüştür. Bunun yanı sıra iki numune yerleştirme yöntemi içinde tutarlı sonuçlar elde edilememiştir. Suyla çökertme yöntemiyle yerleştirilen numunelerin kuru huni yöntemiyle yerleştirilen numunelere göre daha fazla daralma eğilimine sahip olduğu görülmüştür. Bu kapsamlı çalışmanın bir diğer kısmında yazar Toyoura kumu ile üç eksenli deneyler gerçekleştirmiş ve nemli sıkıştırma yöntemi kullanarak numuneleri yerleştirmiştir. 100,300 ve hatta 1000 kPa çevre basınçlarında gerçekleştirilen bütün numunelerde tamamen sıvılaşma gözlenmiştir. Fakat bu deney sonuçları nemli sıkıştırma yönteminden kaynaklanan aşırı gevşek dane yapısı nedeniyle gerçekleşmiş olabileceğinden yeterince faydalı veriler olmadığını ifade etmek gerekmektedir.

Yamamuro ve Lade (1997), Ottawa 50/200 ve Nevada kumlarının hem drenajlı hemde drenajsız koşullar altında davranışını incelemek amacıyla üç eksenli deneyler

gerçekleştirmiştir. İki kum numunesi de köşeli dane yapısına ve benzer dane dağılımına sahiptir. Nevada kumu içeriğinde %6 plastik özellik göstermeyen ince dane bulundurmaktadır. Numune yerleştirme yöntemi olarak Nevada kumu için kuru huni yöntemi tercih edilirken, Ottawa kumunu yerleştirmek için ise nemli tokmaklama yöntemi kullanılmıştır. Yazarlar tamamen sıvılaşmayı efektif gerilmenin sıfırlanması olarak tanımlamışlardır. Bu tanıma göre drenajsız koşullarda Nevada kumu üzerinde monotonik yükleme yaparak gerçekleştirdikleri deneylerin sonucunda çevre basıncı 25 ile 125 kPa arasında konsolide edilen numunelerde tamamen sıvılaşma görülmüştür. Çevre basıncı arttıkça sıvılaşma potansiyelinde düşüş gözlenmiştir. 125 kPa'dan büyük çevre basınçlarında geçici sıvılaşma görülmüştür. Yazarlar bu durumun çok gevşek olarak hazırlanan numunelerin düşük çevre basınçlarında izotropik olarak konsolide edildiğinde yüksek oranda sıkışabilirlik göstermesiyle bağlantılı olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca ufak miktarda dahi plastik olmayan ince dane içeriğine sahip zeminlerin yüksek oranda sıkışabilir dane yapısına sahip olduğunu ve bu tarz zeminlerin sıvılaşmaya karşı daha zayıf olduğunu belirtmişlerdir. Öyle ki aynı boşluk oranında hazırlanıp drenajsız koşullarda monotonik yükleme uygulanan %6 silt içeriğine sahip Nevada kumu üzerinde tamamen sıvılaşma gözlenirken, %0 ince dane oranına sahip Ottawa temiz kumu üzerinde geçici sıvılaşma görülmüştür. Drenajlı koşullarda yaptıkları deneylerde ise numunelerin çoğunda hacimsel daralma eğilimi görülürken sadece göreceli çok yüksek deformasyon seviyelerinde küçük genişleme eğilimleri görülmüştür.

Aynı yıl Lade ve Yamamuro (1997)**,** yaptıkları bir başka çalışmada, plastik olmayan ince danelerin statik sıvılaşma üzerinde etkisine odaklanmışlardır. Bu çalışmada yazarlar köşeli Nevada kumu ve yuvarlak Ottawa kumu kullanmışlardır. Numune yerleştirme yöntemi olarak kuru huni yöntemi tercih edilmiştir. İnce dane oranı %0 dan %60'a kadar değişen numuneler üzerinde yaptıkları deneyler sonrası ince dane oranı arttıkça, göreceli sıkılık artmasına rağmen sıvılaşma direncinin düştüğünü belirtmişlerdir. Yazarlar bu deney sonuçlarına bir miktar plastik olmayan silt içeriğine sahip kum zeminlerin sıvılaşması için boşluk oranı ve göreceli sıkılığın tek başına yeterli parametreler olmayacağını ifade etmişlerdir. Gelenekselleşmişin dışında görülen bu davranışı araştırmak amacıyla yazarlar Nevada kumu ile bir silt numunesini ince dane oranı %50 olacak şekilde karıştırmışlardır. Çevre basınçları 50 ila 500 kPa arasında değişen altı numune üzerinde deneylerini

gerçekleştirmişlerdir ve çevre basıncı arttığı takdirde sıvılaşma potansiyelinin azaldığını doğrulamışlardır.

Yine Lade ve Yamamuro (2011), gerçekleştirdiği çalışmada bir literatür taraması ortaya koymuştur. 80'li yıllarda zeminlerde neyin kararsız davranışlara sebep olduğunun ve 90'lı yıllarda ince dane içeren kumların ve siltlerin statik sıvılaşması ile ilgili çalışmaların hız kazanmasının ardından literatüre birçok yeni kavramın kazandırıldığını fakat aynı zamanda yanlış çıkarımların ve gerçek davranışın tam olarak ifade edilemediği durumların da yer edindiğini belirtmiştir. Yazarlar çeşitli laboratuvar deneyleri ve tarihsel vakayı incelemeleri ardından tersine davranışın (ince danelerin, iri daneler arasına yerleşerek göreceli sıkılığı artırmasına rağmen sıvılaşma potansiyelinde de artış gözlenmesi) tüm ince daneli kumlar için tam olarak doğru olmadığını belirtmişlerdir. Dane boyutu 200'nolu elek altına küçüldükçe içsel çekim kuvvetleri yer çekimi kuvvetine baskın gelir, ince daneler iri daneler arasına yerleşerek daha sıkı bir yapı oluşturmaktansa birbirlerine bağlı kalma eğilimi sergileyerek gevşek zincirli ve peteksi dane yapıları oluşturur. Yazarlar bunun sonucu olarak ince danelerin numune içerisinde daha büyük boşluklar oluşturmasına yol açarak sıvılaşma potansiyelini artırdığını tespit etmiştir. Plastik davranış göstermeyen silt numunelerinin statik sıvılaşma üzerindeki etkisi uzun yıllardır çeşitli yazarlar tarafında araştırılmaktadır. Fakat gözlemler ve sonuçlar konusunda ortak bir karar bulunmamaktadır, bazı yazarlar siltlerin sıvılaşma potansiyelini artırdığını ileri sürerken bazıları ise azalttığını savunmuştur. Bunun sebebi temel olarak silt karakteristiği, kullanılan numunenin dane dağılımı, çevre basınçları, numune yerleştirme yöntemleri, sıkılık ve deney sonuçlarının birbiri ile nasıl kıyaslandığı olarak görülmektedir.

Sabah ve Çelik (1999), yayınladıkları çalışmada sepiyolit madeninin özelliklerini ve kullanım alanlarını incelemişlerdir. Magnezyum hidrosilikatten ibaret doğal bir kil minerali olan sepiyolitin, yüksek yüzey alanı ve su emme kapasitesi gibi birçok özelliği nedeniyle çeşitli alanlarda kullanıldığını ve kullanımının yıllar içerisinde bir artış trendi yakaladığını belirtmişlerdir. Yazarlar sepiyolitin fiziksel özelliklerini kaygan görünümlü, ince daneli, genellikle beyaz, krem, gri veya pembe renkli olarak tanımlamış, Sivrihisar bölgesinin güneyindeki gibi kahverengi ve siyahımsı türlerinin de olduğunu belirtmişlerdir. Sepiyolitin

en önemli özelliklerinden biri sorptif yapısı olarak görülmektedir, kendine has yapısı nedeniyle son derece yüksek oranda sorptif özellik gösteren bu kil mineralinin ağırlığının 200-250 katı kadar su tutabileceği tespit edilmiştir. Sepiyolitin zemin mekaniği ve geoteknik mühendisliği alanında bilinen bir kullanımı yoktur. Fakat bu çalışmada benzer bir kil olan bentonit ile karşılaştırıldığında sepiyolitin daha bağlayıcı özellik gösterdiği görülmüştür.

Mohtar vd. (2013), yaptıkları çalışmada bentonit katkısının Ottawa temiz kumu üzerinde etkisini araştırma amacıyla monotonik ve tekrarlı yüklemeler gerçekleştirdikleri üç eksenli deneyler yapmışlardır. Tüm deneyler için numune yerleştirme yöntemi olarak air pluvation yöntemi kullanılmıştır. Bu çalışmada temiz kumun kuru kütlesine oranla %0, %3 ve %5 olacak şekilde bentonit katkısı sıvılaşmayı engellemek amacıyla kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre bentonit katkısının dayanımda ufak bir düşüşe sebep olmasına rağmen sıvılaşma direncini yüksek oranda artırdığı tespit edilmiştir.

Sabbar vd. (2017), yaptıkları çalışmada kumların statik sıvılaşmaya karşı direncini artırmak amacıyla katkı maddesi olarak bentonit ve cüruf kullanmışlardır. Çalışmalarında Perth temiz kumu kullanarak ve drenajsız koşullarda monotonik yükleme yaptıkları üç eksenli deneyler gerçekleştirmişlerdir. Öncelikle ayrışmayı daha sonra ise daha gevşek numuneler üzerinde çalışabilmek için numune yerleştirme yöntemi olarak nemli tokmaklama yöntemini kullandıklarını ifade etmişlerdir. Deneylerin de farklı oranlarda sadece cüruf, sadece bentonit ve hem cürufu hem de bentoniti beraber kullandıkları numuneler hazırlamışlardır. Deney sonuçlarına göre düşük oranda kullanılan bentonitin negatif etki göstererek dayanımı düşürdüğü aynı zamanda da boşluk suyu basıncının temiz kuma göre daha fazla arttırdığı tespit edilmiştir. Daha sonra bentonit oranı %3 ile sabit tutularak üç farklı oranda cüruf bentonit-temiz kum karışımlarıyla karıştırılmıştır. Karışımlar tüm çevre basınçları altında akıcı olmayan bir form göstermiştir ve dayanımlarda artış görülmüştür.

Aytekin (2018), sepiyolit katkısını inşaat mühendisliği alanında kullandığı çalışmasında beton içerisindeki donatının korozyonunu önlemeyi hedeflemiştir. Çimento harcına farklı oranlarda sepiyolit katarak hazırladığı karışımlarda, sepiyolit oranı arttıkça

çimento harcının ihtiyaç duyduğu su miktarının arttığını gözlemleyerek sepiyolit katkısının sorptif yapısını kanıtlamıştır.

3. STATİK SIVILAŞMA

3.1. Genel Tanım

Sıvılaşma kelime anlamı erimek ve yumuşamak anlamına gelir. Geoteknik mühendisleri için ise, statik veya dinamik yüklemeler sonucu drenajsız koşullarda aşırı boşluk suyu artışı sebebi ile efektif gerilemenin sıfıra inerek zeminin akışkan bir form göstermesi olayıdır.

Zeminlerde ‘’sıvılaşma’’ kavramı ilk olarak 1920 yılında Hazen tarafından California Calaveras Barajında meydana gelen akma yenilmesi davranışını açıklamak amacıyla kullanılmıştır. (Castro, 1987). Daha sonra Karl Terzaghi 1925’te Norveç’in kıyılarında ve Hollanda’nın sahillerinde meydana gelen sualtı şevlerinde meydana gelen kaymalar için bu terimi kullanmıştır. (Terzaghi 1956). Terzaghi bahsedilen bu kaymaları çok zayıf yarı kararlı dane yapısına sahip alüvyal tortular halindeki ince kumlarla ilişkilendirmiştir.

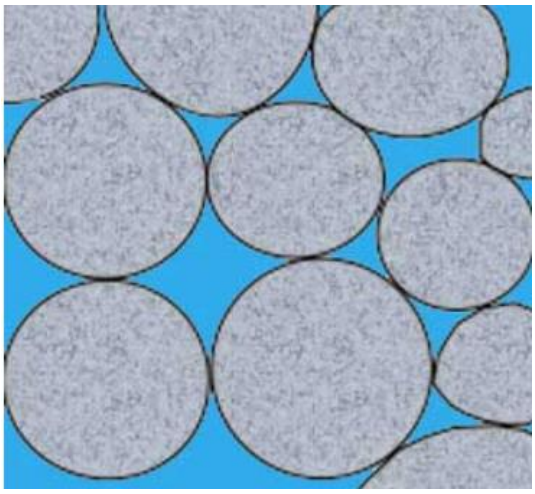
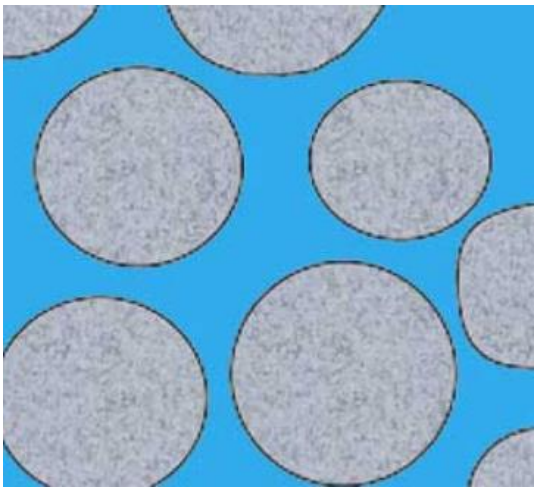
3.2. Sıvılaşma Mekanizması

Yer altı su seviyesi altındaki gevşek ve suya doygun kum danelerinden oluşan bir zemin üzerinde hidrostatik basınç nedeniyle, boşluk suyu basıncı oluşmaktadır. Bu durumda, kumun kayma dayanımı (τ_f), Denklem 3.1’de verilen bağıntı ile ifade edilir.

$$\tau_f = c' + \sigma' \cdot tan\,\emptyset' \tag{3.1}$$

Bu bağıntıda σ' zemindeki efektif normal gerilmeyi, c' ve $\emptyset'$ ise efektif gerilmeye bağlı kayma dayanım parametrelerini belirtmektedir. Dinamik veya monotonik yüklemeler

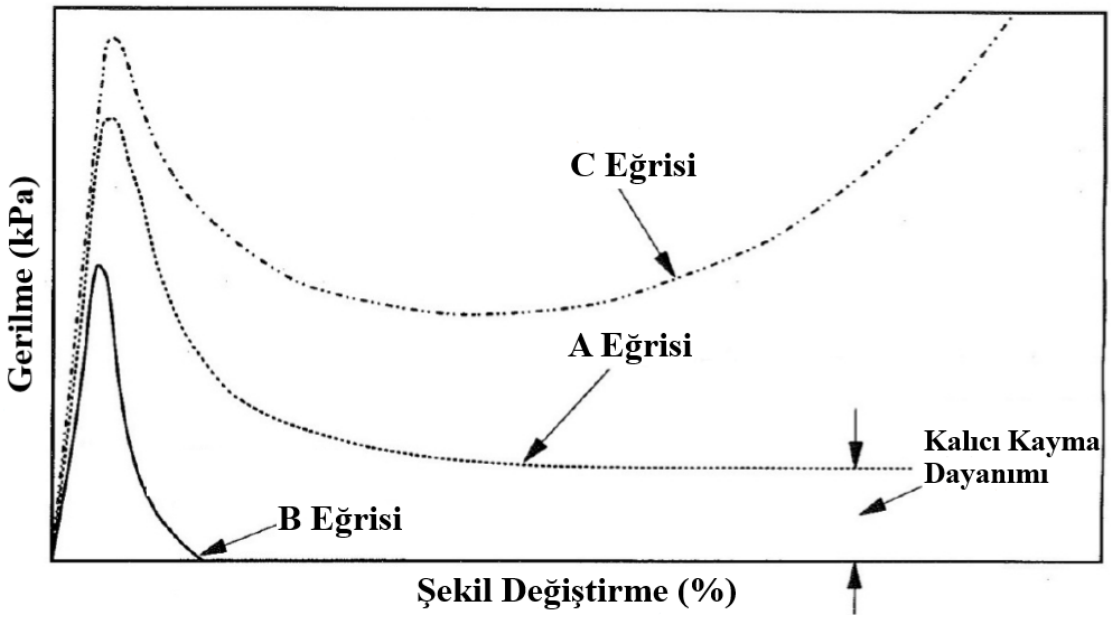
sonucu oluşan aşırı boşluk suyu basıncı nedeniyle efektif gerilme sıfıra inmektedir. Bu durumda, kayma mukavemeti (τ_f) sıfıra eşit olacaktır çünkü kumlar kohezyonsuz zeminler olmaları nedeniyle c parametresi genellikle sıfıra eşittir. Zemin içerisindeki kum daneleri gevşeyerek su içerisinde asılı duruma geçer. Şekil 3.1'de bu durum şematik olarak verilmiştir.

a)  b) 

Şekil 3.1. Zeminin a) sıvılaşma öncesi durumu b) sıvılaşma sonrası durumu

3.3. Monotonik Yükleme

Akma tipi sıvılaşmaların gerçekleşmesi için başlangıçtaki en kolay şartlar zemin monotonik olarak artan yüklemelere maruz kaldığı takdirde gerçekleşir. Monotonik yüklemenin etkisini araştırmak amacıyla izotropik olarak konsolide edilmiş çok gevşek, suya doygun bir kum numunesi üzerinde drenajsız koşulda üç eksenli basınç deneyi gerçekleştirilmelidir. Başlangıçta kararlı hal çizgisinin çok üzerinde olan kum numunesi daralan bir davranış gösterir. Drenajsız kayma başladığında ise deviatör gerilme nispeten küçük deformasyon seviyelerinde pik değere ulaşırken numune içerisinde aşırı boşluk suyu basıncı oluşur. Bu andan itibaren düşen efektif gerilme nedeniyle numune dayanım kaybeder ve statik sıvılaşma gerçekleşerek numune göçer. Castro (1969), drenajsız monotonik yüklemeler uyguladığı kum zeminler üzerinde çalışmalar gerçekleştirmiştir. Bu çalışma kapsamında kumların drenajsız koşullar altındaki dayanımları için üç farklı olası sonuç göstermiştir. Bu sonuçlar Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Drenajsız koşullarda basınç deneyleriyle kumların olası dayanım grafikleri (Castro, 1969)

Bu grafikte A eğrisi ile verilen sonuç araştırmacılar tarafından genellikle sıvılaşma olarak kabul edilmektedir. Bu tip sıvılaşma durumunda artan aşırı boşluk suyu basıncı etkisiyle dayanımda büyük miktarlarda kayıp yaşanır. Fakat bu eğrinin tamamen statik sıvılaşma olmadığını belirtmek gerekir. Tamamen statik sıvılaşmada dayanım sıfıra düşer. B eğrisi tamamen statik sıvılaşma durumunu ifade etmektedir. Daha önce tanımlandığı gibi efektif gerilme ve dayanım sıfıra düşmüştür. Son olarak C eğrisi ise Castro (1969) tarafından kısıtlı sıvılaşma, Lade ve Yamamuro (1997) tarafından ise geçici sıvılaşma durumu olarak tanımladığı eğridir. Literatürde çoğu araştırmacı tarafından da geçici sıvılaşma olarak tanımlanması nedeniyle bu çalışama da bu durumdan geçici sıvılaşma olarak bahsedilmiştir. Bu durumun geçici sıvılaşma olarak tanımlanmasının nedeni numunenin öncelikte daralma eğilimde davranış göstermesi fakat daha sonra yüksek deformasyon seviyelerinde tekrar pekleşme diye adlandırılan dayanım kazanması durumundandır. A eğrisi aslında geçici sıvılaşmanın özel bir halidir. Biraz daha gevşek zeminlerde tamamen sıvılaşma görülebilirken, biraz daha sıkı zeminlerde ise C eğiriş gibi gerçek geçici sıvılaşma halini gösterebilir.

3.4. Akma Tipi Sıvılaşma

Monotonik yükleme sonucu statik sıvılaşan zeminlerde akma tipi sıvılaşma görülür. Akma tipi sıvılaşma, bir zemin kütlesinin statik dengesi için gerekli kayma gerilmesinin (statik kayma gerilmesi), zeminin sıvılaşmış haldeki kayma dayanımından daha büyük olduğu durumda gerçekleşmektedir. Akma sıvılaşması sonucu oluşan büyük şekil değiştirmelerin asıl sebebi statik kayma gerilmeleridir. Akma sıvılaşması çok hızlı bir şekilde ortaya çıkması, çabuk gelişmesi ve sıvılaşmış durumdaki zeminde çok büyük yer değiştirmeler meydana getirmesiyle bilinmektedir (Kramer, 1996). Sheffield Barajı ve San Fernando Barajı'ndaki akma kayması türü yenilmeler, akma tipi sıvılaşma için tarihsel örneklerdir.

3.4.1 Akma sıvılaşması yüzeyi

Akma tipi sıvılaşmaların başlangıç koşulları en iyi gerilme izi yardımıyla açıklanabilmektedir. Hanzawa vd. (1987), yaptıkları çalışama ile gevşek ve doygun kumlarda birim deformasyon yumuşama davranışının oluştuğu efektif gerilme şartlarının basit bir biçimde bir gerilme uzayı ile tanımlanabileceğini keşfetmişlerdir. Akma tipi sıvılaşmada başlangıçtaki efektif gerilme durumu, bu çalışmada akma sıvılaşması yüzeyi (ASY) olarak bahsedilecek olan üç boyutlu gerilme izi uzayı vasıtasıyla tanımlanacaktır. Genel gerilme izleri için ASY'nin ölçülmesi konusunda bazı pratik güçlükler bulunsa da değişik sıvılaşma durumları arasındaki ilişkileri kavramsal olarak analiz etmede büyük öneme sahiptir.

3.4.2 Akma tipi sıvılaşmasının gelişimi

Akma tipi sıvılaşma iki aşamada gerçekleşir. Küçük birim deformasyon düzeylerinde gelişen ilk aşamada gerilme izini başlangıç konumundan ASY'ne doğru kaydıracak büyüklükte aşırı boşluk suyu basıncı oluşur. Bu aşırı boşluk suyu basıncı statik sıvılaşma durumu için drenajsız koşullarda monotonik yükleme ile meydana gelir. Efektif gerilme izi

ASY'ne ulaştığı anda zemin karalı yapısını kaybetmeye başlar ve bu ikinci aşamayı başlatır. İkinci aşamada, statik dengenin sağlanabilmesi için gerekli kayma gerilmeleri tarafından harekete geçirilen birim deformasyon yumuşaması ve ilave aşırı boşluk suyu basıncı oluşumu meydana gelir.

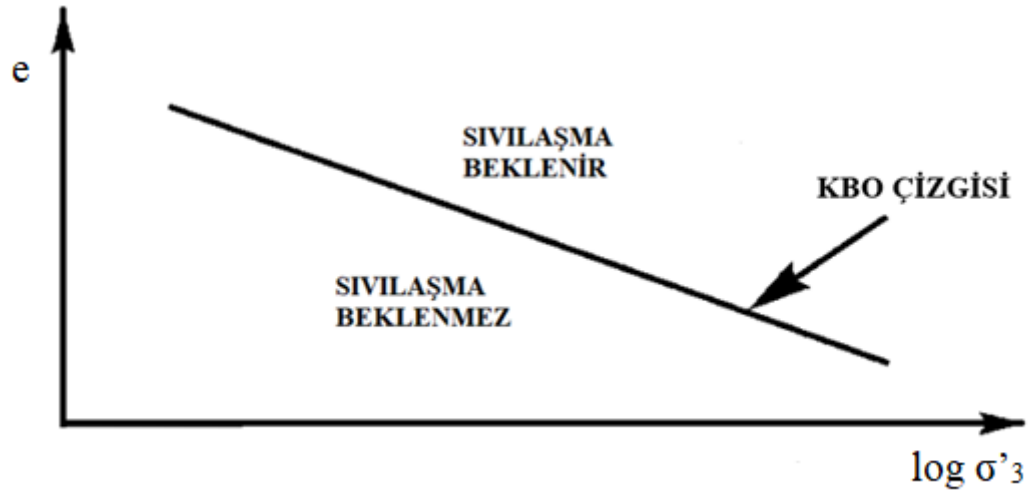
3.5 Aşırı Boşluk Suyu Basıncının Etkisi

Aşırı boşluk suyu basıncının oluşması sıvılaşma olayının gerçekleşmesi için anahtar faktördür. Artan boşluk suyu basıncı efektif gerilmenin azalmasına neden olarak zeminlerde sıvılaşma meydana getirir. Aşırı boşluk suyu basıncı oluşmadığı durumlarda sıvılaşma olayı görülmez fakat daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi tamamen sıvılaşma ya da geçici sıvılaşma gibi durumlar için farklı miktarlarda aşırı boşluk suyu basıncı oluşması gerekmektedir.

3.6. Kririk Boşluk Oranı

Casagrande (1936), zeminlerin kayma dayanımı üzerinde ilk çalışmaları ortaya koymuştur. Bu çalışmasında gevşek ve sıkı kum numuneleri üzerinde drenajlı koşulda deformasyon kontrollü üç eksenli deneyler gerçekleştirmiştir. Bu deneylerden elde ettiği sonuçlar, zeminlerin dayanım davranışı ile ilgili çalışmalara bugün bile ışık tutmaktadır. Aynı çevre basıncı altında yaptığı deneyler esnasında tüm numunelerin belirli bir yoğunluğa ulaştığını fark etmiştir. Başlangıçta gevşek olan numuneler, yükleme esnasında daralmış veya sıkılaşmış; başlangıçta sıkı olan numuneler ise önce daralmış ve sonra hızlı bir şekilde genişleme göstermiştir. Bu şekilde tüm numuneler belirli bir yoğunluğa ulaşmış ve sabit bir kalıcı kayma dayanımı vermiştir. Bu sabit yoğunluğa karşılık gelen boşluk oranına kritik boşluk oranı e_c denir. Casagrande farklı çevre basınçları altında deneyler yaparak kritik boşluk oranının efektif gerilme ile özel bir ilişkisi olduğunu tespit etmiştir ve bunu bir eğri ile göstererek kritik boşluk oranı (KBO) çizgisini ortaya çıkarmıştır. Zeminin boşluk oranına karşılık efektif gerilme grafiğinde KBO çizgisi gevşek (daralan) ve sıkı (genişleyen) kumları birbirinden ayırmak için kullanılır.

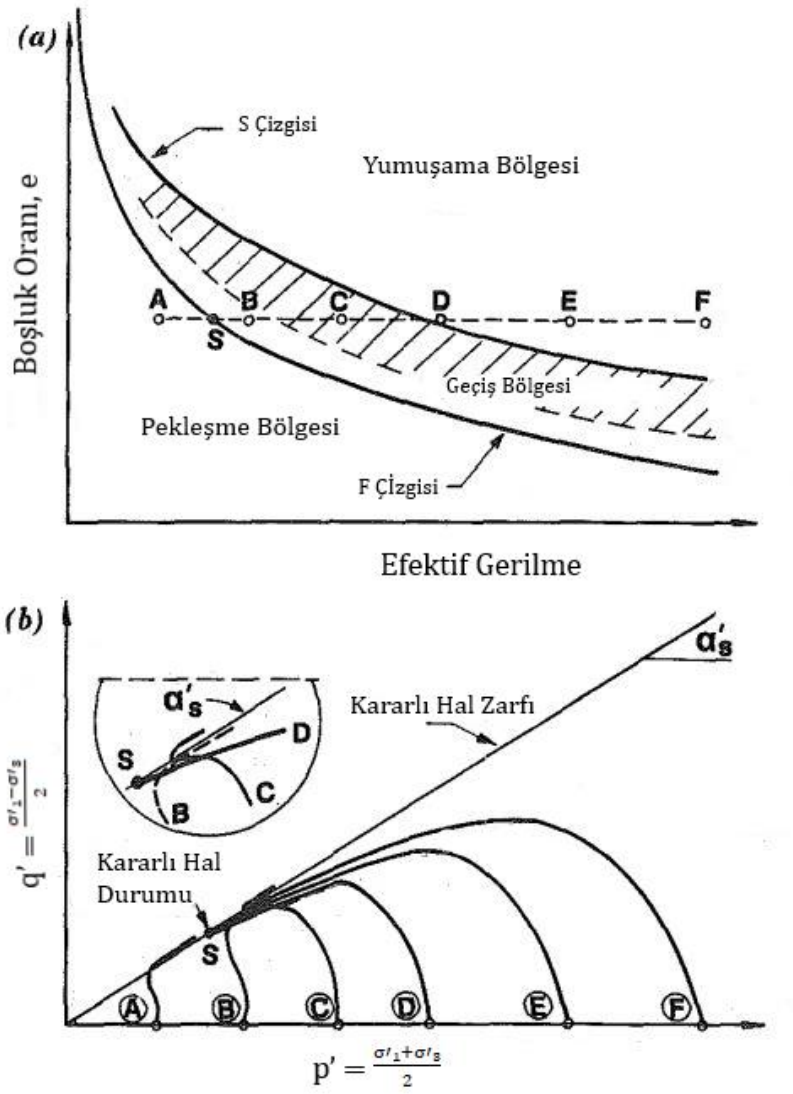
Boşluk suyu basıncı ölçebilen cihazlar o yıllarda mevcut olmasa da Casagrande teorik olarak KBO çizgisi üzerinde kalan gevşek numunelerde daralma eğilimi nedeniyle pozitif aşırı boşluk suyu basıncı oluşacağını; sıkı numunelerde ise genişleme eğilimi nedeniyle negatif aşırı boşluk suyu basıncı oluşacağını belirtmiştir. İlerleyen yıllarda bu hipotez deneysel olarak kanıtlanmıştır. KBO çizgisi zeminin daralma eğiliminde veya genişleme eğiliminde davranış göstereceğini belirlemede kullanılır. Bu sayede zeminin akma sıvılaşmasına duyarlı olup olmadığını anlamak mümkündür. KBO çizgisi Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.3. Akma tipi sıvılaşmaya duyarlı ve duyarsız olan zeminlerin ayrılmasında kullanılan KBO çizgisi (Kramer, 1996)

Bu teorinin ilk yıllarında KBO çizgisi üzerindeki gevşek zeminlerin akma tipi sıvılaşmaya karşı duyarlı olduğu ve KBO çizgisi altında kalan sıkı zeminler için ise akma tipi sıvılaşma gerçekleşmeyeceği düşünülmekteydi. Fakat, 1938 yılında Montana'da yer alan Fort Peck Barajı inşası sırasında memba tarafında akma tipi statik sıvılaşma gerçekleşmiştir ve Middlebrooks (1942), yaptığı incelemeler sonucunda tamamen sıvılaşma gerçekleşen bu zeminin KBO çizgisi altında yer aldığını ve akma tipi sıvılaşmaya duyarsız olan bölgede bulunduğunu tespit ederek bu düşüncenin yanlış olduğunu kanıtlamıştır. Casagrande bu durum karşısında, gerçek bir akma tipi sıvılaşma için drenajsız koşulda zemin davranışını etkileyen tüm faktörleri modellemede drenajlı deneylerin yeterli olmamasına bağlamıştır.

Daha sonraki yıllarda Alarzon-Guzman vd. (1988) kararlı hal çizgisinin özellikle yüksek ölçüde daralma eğilimi gösteren kumlar için tek başına yeterli olmadığı ifade ederek yeni bir diyagram sunmuşlardır. Sunulan bu diyagram Castro ve Poulos (1977) tarafından sunulan iki bölümden oluşan (daralma ve genişleme) diyagrama göre daha detaylı olarak üç bölümden oluşmaktadır. Bunlar; yumuşama bölgesi, geçiş bölgesi ve pekleşme bölgesidir. Yazarların hipotezine göre drenajsız koşullarda yapılan üç eksenli deneylerde yumuşama bölgesinde bulunan numuneler kesme esnasında tamamen sıvılaşmaya maruz kalır. Öte yandan pekleşme bölgesinde bulunan numuneler ise genişleme eğilimindedirler ve kesme aşaması boyunca numune dayanım kazanmaya devam eder. Son olarak geçiş aşamasındaki numuneler ise geçici sıvılaşma görülen numunelerdir. Yani kesme esnasında dayanımda bir miktar azalma görülmesinin ardından genişleme davranışı kontrolü devralarak dayanım kaybını sona erdirir ve dayanım artışı gerçekleşir. Kumların sabit boşluk oranında drenajsız monotonik yükleme altındaki davranışına dair diyagram şematik olarak Şekil 3.4'te verilmiştir.



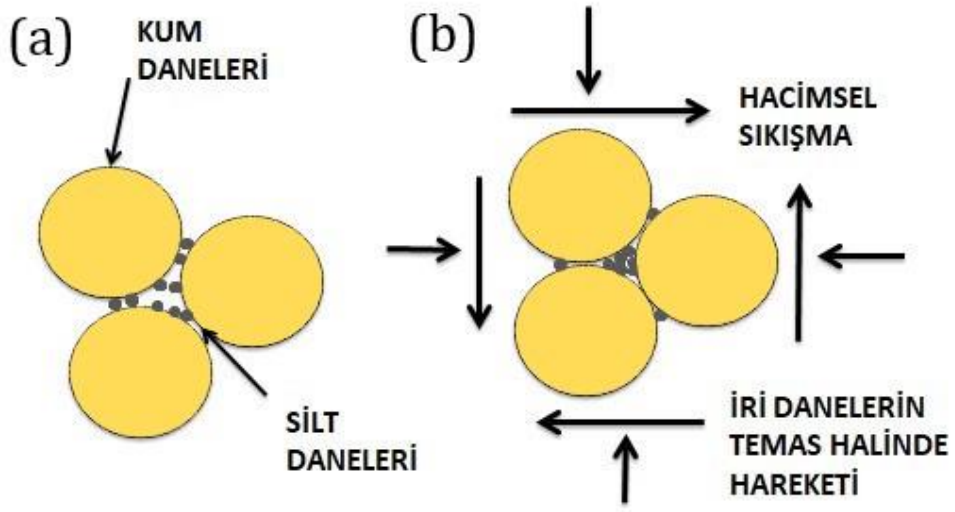
Şekil 3.4. Sabit boşluk oranında drenajsız monotonik yükleme davranış diyagramı (Şematik) a) Hal Diyagramı b) q-p Grafiği (Alarcon-Guzman, vd. 1988)

Şekilde görüldüğü gibi pekleşme bölgesinde yer alan A numunesi için, öncelikle daralma eğiliminde gibi davranarak çok az aşırı boşluk suyu basıncı oluşmuş daha sonra genişleme hemen devreye girerek grafik bir dirsek vermiş dayanım kazanımı gerçekleşmiştir. Bu diyagramda F çizgisi drenajsız deneylerden elde edilen dayanım sonuçlarıyla elde edilirken, S çizgisi ise drenajlı deneylerden elde edilir. F çizgisinin S çizgisinden bir miktar daha aşağıda yer almasının nedeni zemin içerisinde oluşan aşırı boşluk suyu basıncından kaynaklanmaktadır. Son olarak yumuşama bölgesinde bulunan numunelerde ise büyük dayanım kayıpları görülmektedir. Sadece A ve B numuneleri için hiçbir yumuşama görülmeden pekleşme gerçekleşmiştir.

3.7 Siltlerin Statik Sıvılaşmaya Etkisi

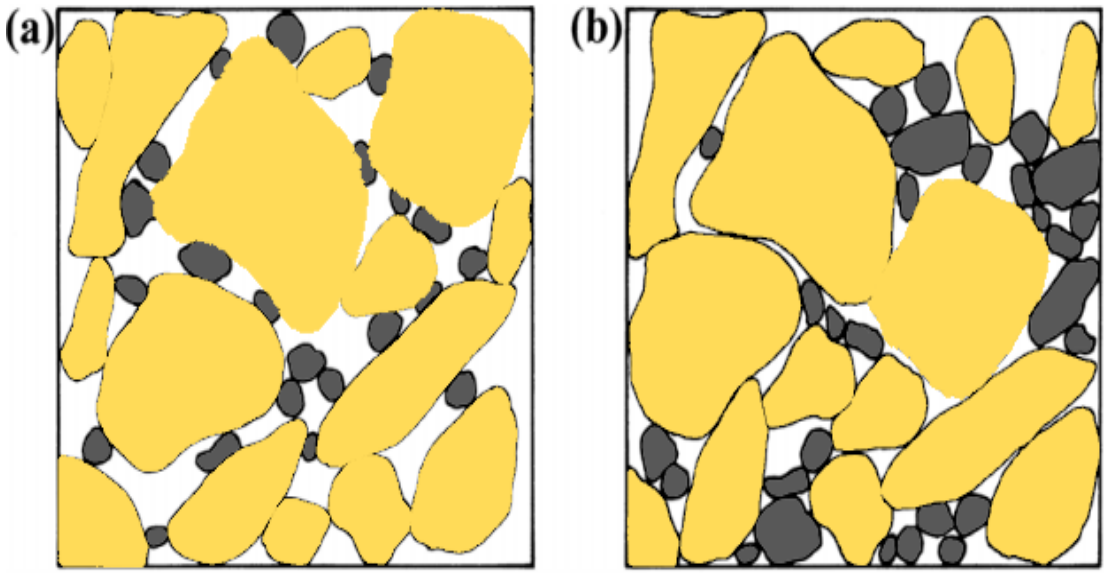
Siltlerin statik sıvılaşmaya etkisi birçok araştırmacı tarafından incelenmiş olmasına karşın bugüne kadar ortak bir karara varılamamıştır. Bazı araştırmacılar statik sıvılaşma potansiyelini artırdığını belirtirken bazı araştırmacılar ise tersini savunmuştur. Bu fikir ayrılığının olası sebeplerinden bazıları farklı numune yerleştirme yöntemleri, kullanılan çevre basınçları, göreceli sıkılıklar, silt içeriği, siltin dane dağılımından ve siltin karakteristiğinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Literatürde siltlerin kumların statik sıvılaşma potansiyeline etkisi için iki farklı teori mevcuttur. Bunlardan ilki tersine davranıştır. Tersine davranışta silt daneleri kumların arasına yerleşerek boşluk oranını azaltmaktadır, literatüre göre boşluk oranındaki azalmanın statik sıvılaşma potansiyelini düşürmesi beklenir fakat kesme anında siltler etrafındaki iri danelerin birbirinden uzaklaşmasını engeller. Bu şekilde daha büyük parçaların birbirinden uzaklaşmasına neden olarak numune içerisinde daha fazla boşluk oluşmasına neden olur ve statik sıvılaşma potansiyelini artırmaktadır (Lade ve Yamamuro, 1997). Şekil 3.5'te siltli kumların yerleştiği ve kesme esnasındaki durumu şematik olarak verilmiştir.



Şekil 3.5. Tersine davranış a) yerleştirildikten sonra b) konsolidasyon sonrası kesme aşamasında (Lade ve Yamamuro, 1997)

Lade ve Yamamuro (2011) daha sonra yaptıkları çalışma ile tersine davranışın siltli kumların davranışını tam olarak doğru ifade etmediğini belirtmişlerdir. Elektron mikroskobu ile ince dane içeren kumlar incelendiğinden dane boyutu 0.075 mm'den daha küçük seviyelere düştüğünde içsel çekim kuvvetlerinin yer çekimi kuvvetine baskın geldiği gözlemlenmiştir. Yani ince daneler yer çekimi etkisi ile iri daneler arasına yerleşmek yerine içsel çekim kuvveti etkisinde birbirlerine bağlı kalma eğilimi sergilemektedir. Buda sürtünmenin de yardımıyla numune içerisinde daha yüksek boşluk oranına sahip peteksi yapılar oluşturarak statik sıvılaşma potansiyelini artırmaktadır. Siltli kumların davranışı şematik olarak Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6. Siltli kumun davranışı a) yerleştirildikten sonra b) konsolidasyon sonrası kesme aşamasında (Lade ve Yamamuro, 2011)

3.8 Sepiyolitin Statik Sıvılaşmaya Etkisi

Daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi gevşek ve doygun kum zeminlerde sıvılaşma olayının gerçekleşmesi için en önemli faktör oluşan aşırı boşluk suyu basıncıdır. Sepiyolit su emme kapasitesi çok yüksek olan doğal bir kil mineralidir. Öyle ki kendi ağırlığının 200-250 katı kadar suyu emebilmektedir. Sıvılaşabilir zeminler ile karıştırıldığı takdirde sepiyolitin suyu içerisine hapsederek boşluk suyu basıncında azalmaya sebep olması ve böylelikle sıvılaşmanın önüne geçmesi beklenmektedir. Araştırmacılar

tarafından daha önce bentonit, cüruf gibi malzemeler kullanılmış ve zeminlerin sıvılaşma potansiyelleri üzerinde olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Türkiye dünyada sepiyolit rezervi olarak ciddi bir miktara sahiptir. Ucuz ve çevre dostu olan bu kil mineralinin zemin iyileştirme yöntemi olarak kullanılması geoteknik mühendisliği alanında ve ekonomik alanda ülkemize çeşitli faydalar sağlaması beklenmektedir.

4. MATERYAL ve YÖNTEM

4.1 Deneyde Kullanılan Numuneler

Bu deneysel çalışma kapsamında temiz kum olarak CEN standart kumu, Sakarya bölgesinden alınan siltli kum numunesinden yıkama yöntemiyle elde edilen silt numunesi ve katkı olarak yüksek kaliteli kahverengi sepiyolit kullanılmıştır. Silt numunesi temiz kumun statik sıvılaşma potansiyeline etkisinin gözlenmesi için, sepiyolit numunesi ise aşırı boşluk suyu basıncını kontrol ederek statik sıvılaşmanın önüne geçmek amacıyla kullanılmıştır.

4.1.1 Temiz kum

Literatürde zemin iyileştirme yöntemi olarak katkı tercih edildiği takdirde deneysel süreçte genellikle temiz kumlar üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmada temiz kum olarak CEN standart kumu (TS EN 196-1) kullanılmıştır. Temiz kum üzerinde fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amacı ile elek analizi, maksimum ve minimum boşluk oranları, özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır. CEN temiz kumunun fiziksel özellikleri ve elek analizi sonucu zemin sınıflandırması Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Temiz kumun fiziksel özellikleri ve zemin sınıflandırması

Çakıl (%)	Kum (%)	Silt ve Kil (%)	D_{60} (mm)	D_{30} (mm)	D_{10} (mm)	C_c	C_u	USCS	Gs	e_{maks}	e_{min}
0	99,31	0,69	0,75	0,36	0,12	6,52	1,50	SW	2,65	0,71	0,46



Şekil 4.1. Deneysel çalışmada kullanılan a) temiz kum ve b) elek takımı

4.1.2 Silt

Sakarya bölgesinden alınan siltli kum numunesi 200 Nolu (<0.075 mm) elek altından ıslak eleme yöntemi ile elenip siltler ve kumlar ayrıştırılarak elde edilmiştir. Kohezyon özelliği göstermemektedir ve likit limitleri yoktur bu sebepten plastik olmayan siltler olarak birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi (USCS) kapsamında zemin sınıfı ML olarak belirlenmiştir. Dane dağılımını tespit etmek ve fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla hidrometre ve özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında sitlerin statik sıvılaşma potansiyeline etkisini incelemek amacıyla temiz kumun kuru kütlesine oranla %6 ve %12 oranlarında karışım oluşturmak için kullanılmıştır.



Şekil 4.2. Deneysel çalışmada kullanılan silt numunesi

4.1.3 Sepiyolit

Sepiyolit magnezyum hidrosilikatten oluşan doğal bir kil mineralidir. Türkiye yüksek miktarda sepiyolit rezervine sahip bir ülkedir. Can (1992), yaptığı bir çalışma ile Türkiye'nin ekonomik olarak değerlendirilebilecek sanayi ve tabakalı tip sepiyolit yataklarının Eskişehir, Çanakkale, Bursa, Kütahya ve Isparta bölgelerinde bulunduğunu, Eskişehir'in bazı bölgelerinde bulunan tabakalı sepiyolit rezervin ise yaklaşık 57 milyon ton olduğunu tespit etmiştir. Sepiyolit yüksek yüzey alanına sahip ucuz ve çevre dostu bir malzemedir. En önemli özelliği ise yüksek derecede sorptif (su emme) özellik gösteren bir malzeme olmasıdır öyle ki Sabah (1999) kendi ağırlığının 200-250 katı kadar su tutabileceğini ifade etmiştir. Endüstride mevcut kullanım alanları kedi kumu ve bebek bezi üretimi üzerinedir. Sepiyolit yüksek su emme kapasitesi yanında aynı zamanda kötü kokuları hapsetme özelliğine sahiptir. Bu çalışmada yüksek su emme kapasitesinden faydalanarak aşırı boşluk suyu basıncı artışını engellemesi ve statik sıvılaşmanın önüne geçmesi amacıyla silt-temiz kum karışımlarının kuru kütlesine oranla %4, %5 ve %7 oranında karıştırılarak kullanılmıştır. Sepiyolit, Eskişehir Organize Sanayi Bölgesinde hizmet veren Sakarya

Madencilik tarafından temin edilmiş ve su emme kapasitesi yüksek, kaliteli kahverengi sepiyolit kullanılmıştır. Sepiyolit ile dane dağılımını tespit etmek ve fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla hidrometre ve özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır.



Şekil 4.3 Beyaz sepiyolit ve yüksek kaliteli kahverengi sepiyolit

4.2 Zemin Özelliklerinin Belirlenmesi

Statik sıvılaşmaya etkili en önemli faktörlerden bazıları zeminin fiziksel özellikleriyle direkt ilişkilidir. Bu nedenle deneysel çalışmada kullanılacak zeminlerin öncelikle zemin özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada kullanılan numuneler ve bu numunelerle oluşturulan karışımlarla elek analizi, özgül ağırlık, hidrometre ve maksimum-minimum boşluk oranları deneyleri gerçekleştirilmiştir.

4.2.1 Elek analizi deneyi

Elek analizi deneyi kum zeminlerin dane dağılımını tespit etmek için yapılmaktadır. Dane dağılımı sayesinde zeminler hakkında deneysel bir çalışma veya sahada olmak üzere birçok tahminde bulunmak mümkündür. Elek analizi deneyi ASTM D 422 yöntemine uygun olarak yapılmış ve zemin sınıfı USCS zemin sınıflandırma sistemine göre SW (iyi

derecelendirilmiş kum) olarak belirlenmiştir. Deney sonrası elek üstü kalan kum daneleri Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4. Elek üstü kalan daneler

4.2.2 Özgül ağırlık deneyi

Bir katı maddenin özgül ağırlığı, belirli bir malzeme hacminin ağırlığının eşit hacimdeki suyun ağırlığına oranıdır. Geoteknik mühendisliği açısından özgül ağırlığın belirlenmesi büyük öneme sahiptir. Zeminlerin boşluk oranlarının belirlenmesi ve hidrometre deneylerinin sonuçlandırılabilmesi için zeminin özgül ağırlığının bilinmesi gerekmektedir. Özgül ağırlık deneyleri ASTM D 854 yöntemine uygun olarak yapılmıştır. Sadece temiz kum, silt ve sepiyolit için değil bütün karışım oranları için özgül ağırlık deneyleri tekrarlanmış ve sonuçlar Çizelge 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5. Özgül ağırlık deneyi

Çizelge 4.2. Deneysel çalışmada kullanılan numunelerin özgül ağırlıkları

Numune	Gs
Temiz Kum	2,65
Silt	2,65
Sepiyolit	2,49
%6 S.T.K.	2,68
%12 S.T.K.	2,69
%4SP S.T.K.	2,62
%5SP S.T.K.	2,61
%7SP S.T.K.	2,60

4.2.3 Maksimum ve minimum boşluk oranları

Kum zeminlerde çalışırken en önemli parametrelerden biri göreceli sıkılıktır. Sıkılık oranının belirlenebilmesi için kum numunesinin maksimum ve minimum boşluk oranlarının bilinmesi gerekmektedir. Bu amaçla hacmi belirlenen kalıba kum numunesi öncelikle hiçbir sıkıştırma işlemi uygulanmadan, herhangi bir titreşim veya enerji verilmeden yerleştirilerek en gevşek hali elde edilir ve buradan maksimum boşluk oranına ulaşılır. Minimum boşluk oranı için ise kalıba ağırlık olarak olabildiğince kum numunesi sıkıştırılmalıdır. Bunun için iki yöntem kullanılmıştır. Öncelikle ıslak sıkıştırma yöntemi kullanılarak sular kalıptan sızana kadar sıkıştırma işlemi devam etmiştir ve sıkıştırma öncesi ve sonrası tartılarak kullanılan kum miktarının ağırlığına göre hesap yapılmıştır fakat bu yöntemde sıkıştırma esnasında daneler üzerinde kırılmalar meydana gelip kumun dane dağılımını değiştirme ihtimali mevcuttur. Bu nedenle deneylere Lade vd. 1998, çalışmalarında önerdikleri titreşimle sıkıştırma yöntemi ile devam edilmiştir. Kalıba az miktarda kum döküldükten sonra kalıbın dört köşesine ikişer kez vurularak kum danelerinin sıkıştırılması sağlanmaktadır. İki yöntemle de aynı ağırlıkta kum kalıba sıkıştırılmıştır. Deneyler en az beşer kez tekrarlanarak çıkan sonuçların ağırlıklı ortalaması alınmış ve göreceli sıkılıklar hesaplanırken bu değerler kullanılmıştır. Boşluk oranları ve göreceli sıkılıklar hesaplanırken denklem 4.1 ve 4.2'den faydalanılmıştır.

$$\rho_d = \frac{G_s}{1+e} \times \rho_w = \frac{M_s}{V} \tag{4.1}$$

Bu denklemde ρd: numunenin kuru yoğunluğu (g/cm3), Gs: numunenin özgül ağırlığı, e: deneyde kullanılacak olan numunelerin istenilen rölatif sıkılıktaki boşluk oranı, ρw: suyun birim hacim kütlesi (1,0 g/cm3), Ms: deney için gereken kuru numune kütlesi (g), V ise numune hacmidir (cm3).

$$D_r = \frac{e_{maks} - e}{e_{maks} - e_{min}} \tag{4.2}$$

Bu denklemde Dr: göreceli sıkılık, e_{maks}: kuru numunenin en gevşek haldeki boşluk oranı, e_{min}: kuru numunenin en sıkı haldeki boşluk oranı, e ise kuru numunelerin istenilen göreceli sıkılıktaki boşluk oranıdır. Bütün karışımlar için boşluk oranları deneyleri tekrarlanmıştır. Temiz kum numunesinin ve karışımların boşluk oranları Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Deneyde kullanılan numunelerin maksimum ve minimum boşluk oranları

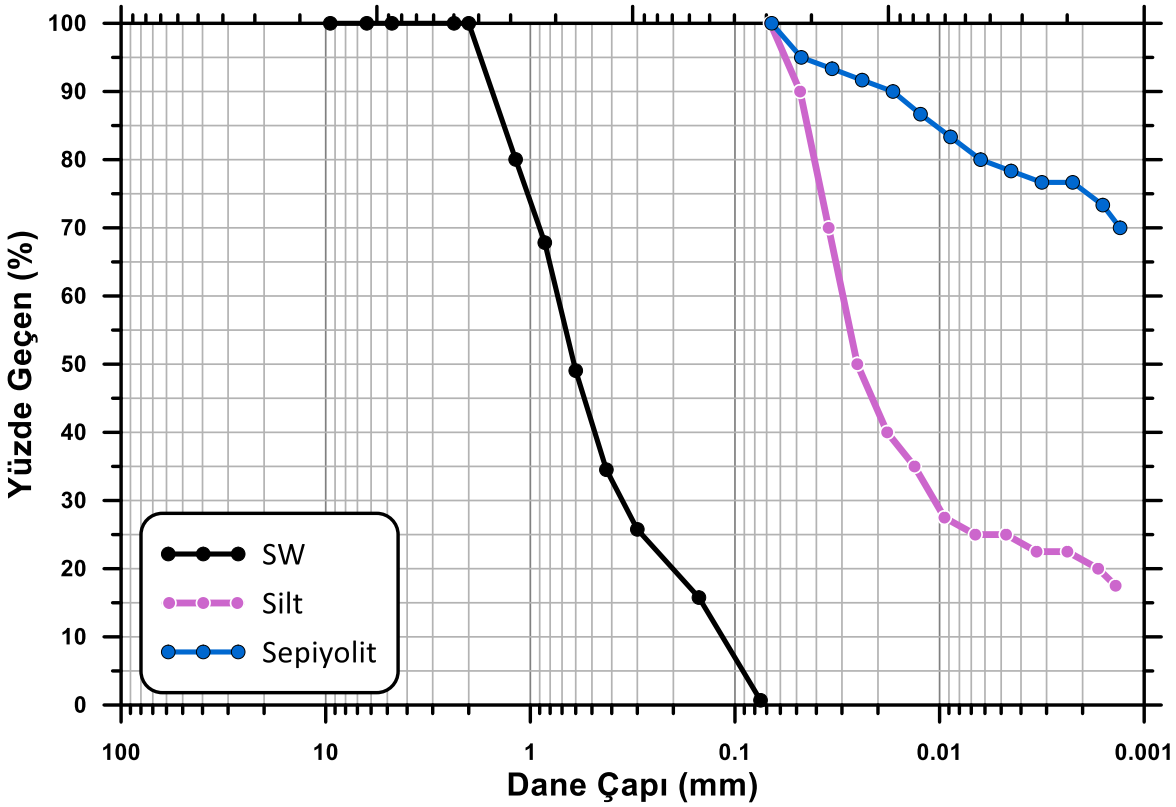
Numune	e_{maks}	e_{min}
Temiz Kum	0,705	0,460
%6 Siltli Temiz Kum	0,730	0,530
%12 Siltli Temiz Kum	0,740	0,540
%4 Sepiyolitli S.T.K.	0,805	0,540
%5 Sepiyolitli S.T.K.	0,828	0,556
%7 Sepiyolitli S.T.K.	0,874	0,587



Şekil 4.6. Islak sıkıştırma yöntemiyle yapılan e_{min} deneyi

4.2.4 Hidrometre deneyi

Hidrometre deneyleri 200 Nolu (0.075 mm) elek altına geçen kil ve silt zeminlerin dane dağılımlarının tespiti için yapılır. Hidrometre deneyi için 50 gram kuru numune 100 gram saf su ile ve 4 gram hegzametafosfat ile miksere atılarak 15 dakika boyunca karıştırılır. Daha sonra hazırlanan karışım hidrometre tüpüne malzeme kaybı yaşanmayacak şekilde dökülür ve 1000 ml. seviyesine kadar saf suyla doldurularak hidrometre tüp içine atılır. İlk okumalar alındıktan sonra kalibrasyon için tüpten çıkarılarak saf su dolu tüpe konulur ve 24 saat boyunca belli aralıklarla ölçüm alınır. Çıkan sonuçlar neticesinde ince danelerin çapları ve geçen malzeme bulunur. Hidrometre deneyi kullanılan silt ve sepiyolit numunesi için yapılmıştır. Bununla birlikte deneyde kullanılan bütün numunelerin dane dağılım eğrisi elde edilmiş ve Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.7. Deneyde kullanılan numunelerin dane dağılım eğrileri



Şekil 4.8. Silt ve Sepiyolit numunelerinin hidrometre deneyleri

4.3 Numune Hazırlama Yöntemleri

Bu çalışma kapsamında temiz kum, silt ve sepiyolit numuneleriyle çeşitli oranlarda karışımlar hazırlanmıştır. Deney kapsamında katkısız ve farklı oranlarda silt ile sepiyolit içeren temiz kumlar üzerinde toplamda 23 adet deney yapılmıştır. Numune hazırlanırken temiz kumların kuru kütlesinin ağırlıkça %6 ve %12'si kadar silt eklenmiştir. Daha sonra %12 siltli temiz kum karışımının kuru kütlesinin ağırlıkça %4, %5 ve %7'si oranının da sepiyolit eklenerek katkılı karışımlar hazırlanmıştır. İlk olarak sepiyolit oranı %4 ile başlatılmış deney sonuçlarına göre öncelikle %1 daha sonra da %2 artış uygun görülerek katkı oranları belirlenmiştir. Üç farklı çevre basıncı altında deneyler yapılmıştır. Deney setlerinin malzeme oranları Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. Deney setleri ve malzeme oranları

Numune	50 kPa	100 kPa	150 kPa
Temiz Kum		Dr: %0	
Temiz Kum	Dr: %10	Dr: %10	Dr: %10
%6 Siltli Temiz Kum	Dr: %10	Dr: %10	Dr: %10
%12 Siltli Temiz Kum	Dr: %10	Dr: %10	Dr: %10
%12 Siltli Temiz Kum	Dr: %20	Dr: %20	Dr: %20
%4 Sepiyolitli %12 Siltli Temiz Kum	Dr: %10	Dr: %10	Dr: %10
%5 Sepiyolitli %12 Siltli Temiz Kum	Dr: %10	Dr: %10	Dr: %10
%7 Sepiyolitli %12 Siltli Temiz Kum	Dr: %10	Dr: %10	Dr: %10

4.4 Üç Eksenli Basınç Deney Sistemi

Üç eksenli basınç deneyi geoteknik mühendisliğinde zeminin kesme kuvvetinin ölçülmesini için en yaygın kullanılan laboratuvar deneylerinden biridir. Kesme kutusu ya da halka kesme deneylerine nazaran drenajın kontrol edilebilmesi ve boşluk suyu basıncının ölçülebilmesi gibi avantajlara sahiptir. Basitçe geçirimsiz bir membrana sarılı silindir bir zemin numunesinin belirli bir çevre basıncı altında göçme meydana gelene kadar eksenel olarak basınca maruz kalması olarak açıklanabilir. Tüm üç eksenli basınç deneyleri konsolidasyonlu drenajsız (CU) koşullarda ASTM D4767 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında yapılan üç eksenli basınç deneyleri Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarlarında bulana ELE markalı cihaz ve ekipmanları üzerinde gerçekleştirilmiştir. Gerilme, deformasyon, deney veri çıktılarının depolanması amacıyla da bilgisayar ortamında DS7 yazılımı kullanılmıştır. Bu deneysel çalışmada kullanılan üç eksenli basınç sistemi Şekil 4.9'da verilmiştir.



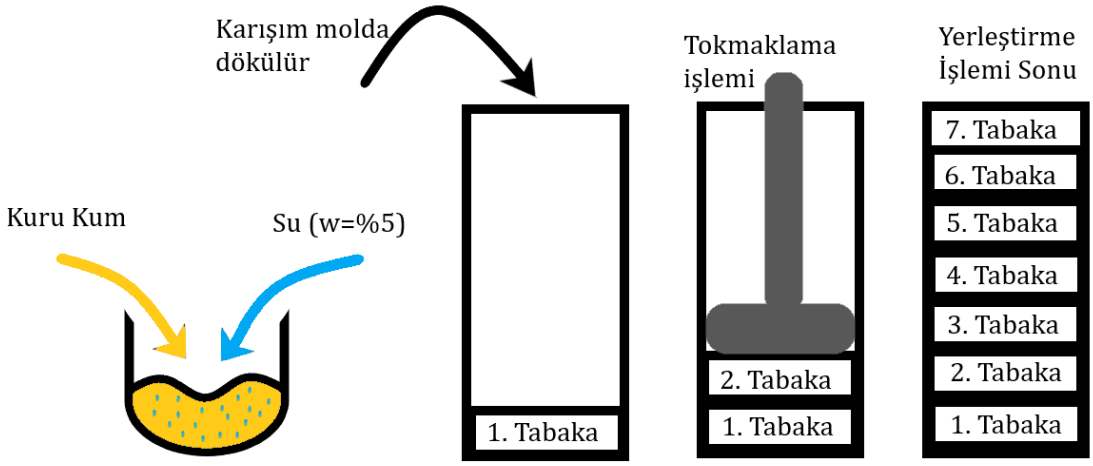
Şekil 4.9. Üç eksenli basınç deney sistemi

Numune hazırlama ve yerleştirme aşamasında 2 adet poroz taş ve filtre kâğıdı, kürek, membran, metal sıkıştırma kalıbı, kelepçe, tornavida, ıspatula, ahşap tokmak, 4 adet o-ring halkası ve diş fırçası yardımcı materyaller olarak kullanılmıştır.

4.4.1 Deney sisteminin hazırlanması

Her deney sonunda ve başında hava ve su kanallarına dane kaçması sonucu herhangi bir tıkanıklık olup olmadığından emin olunur. Daha sonrasında su tankına bir miktar su konulur ve vakum yardımıyla havası alınır. Alt başlık üzerine poroz taş ve filtre kâğıdı yerleştirilir. Zarar görmemiş üzerinde bir delik veya yarık bulunmayan, hiç kullanılmamış veya az kullanılmış membran alt başlığa geçirilir ve iki adet o-ring yardımı ile yerine sabitlenir bu işlem esnasında o-ringlerin rahat yerleştirilmesi için metal halka kullanılmaktadır. İki parçadan oluşan kalıp düzgün şekilde birleştirilir ve kelepçe yardımıyla sabitlenerek membranın üzerine geçirilir. Kalıp içerisinde bulunan membran kalıp çevresine burulma veya katlanma olmadan pürüzsüz bir şekilde gerilir.

4.4.2 Numunenin sisteme yerleştirilmesi



Şekil 4.10. Nemli tokmaklama yöntemi şematik gösterim

Statik sıvılaşma olayı için numune yerleştirme yöntemi büyük öneme sahiptir, numune yerleştirme yöntemine göre statik sıvılaşma potansiyelinde değişimler görülmesi mümkündür. Bu nedenle bu çalışmada nemli tokmaklama yöntemi tercih edilmiş ve bütün numuneler bu yöntemle yerleştirilmiştir. Nemli tokmaklama yöntemi için numune kuru ağırlığının %5'i kadar saf su ile homojen kıvama gelene kadar karıştırılır. Hassas kumpas yardımıyla hacmi belirlenen kalıba tabakalar halinde istenilen göreceli sıkılık miktarına uygun olacak şekilde sıkıştırma işlemi yapılır. Nemli tokmaklama yönteminde her numuneye eşit derecede enerji uygulamak mümkün olmamaktadır fakat numune bütün deneylerde eşit tabakalar halinde yerleştirilerek bu farklılık en aza indirgenmeye çalışılmıştır. Numunene yerleştirme işlemi tamamlandıktan sonra numune üzerine filtre kâğıt ve poroz taş konur. İstenilen sıkılık oranına erişmek için poroz taş ve kalıbın üst kısmının yüksekliği eşit sevide olmalıdır. Sıkıştırma işleminin tamamlanması ile üst başlık numune üzerine geçirilir. Kumlar kohezyonsuz zeminler olmaları nedeniyle kendi kendileri tutmaları mümkün değildir, nemli tokmaklama yöntemi yapay bir kohezyon oluştursa dahi hacimsel değişimlere ve numunenin çökmesine engel olmak amacıyla sıkıştırma kalıbını çıkartmadan önce numuneye -10 kPa kadar vakum uygulaması yapılır. Vakumlama sonrası sıkıştırma kalıbı çıkarılır, hücre yerleştirilir ve cıvatalar ile sabitlenerek sızdırmazlık

sağlanır. Yerleştirildikten sonra vakum uygulaması yapılarak sabitlenen numune Şekil 4.12'de verilmiştir.



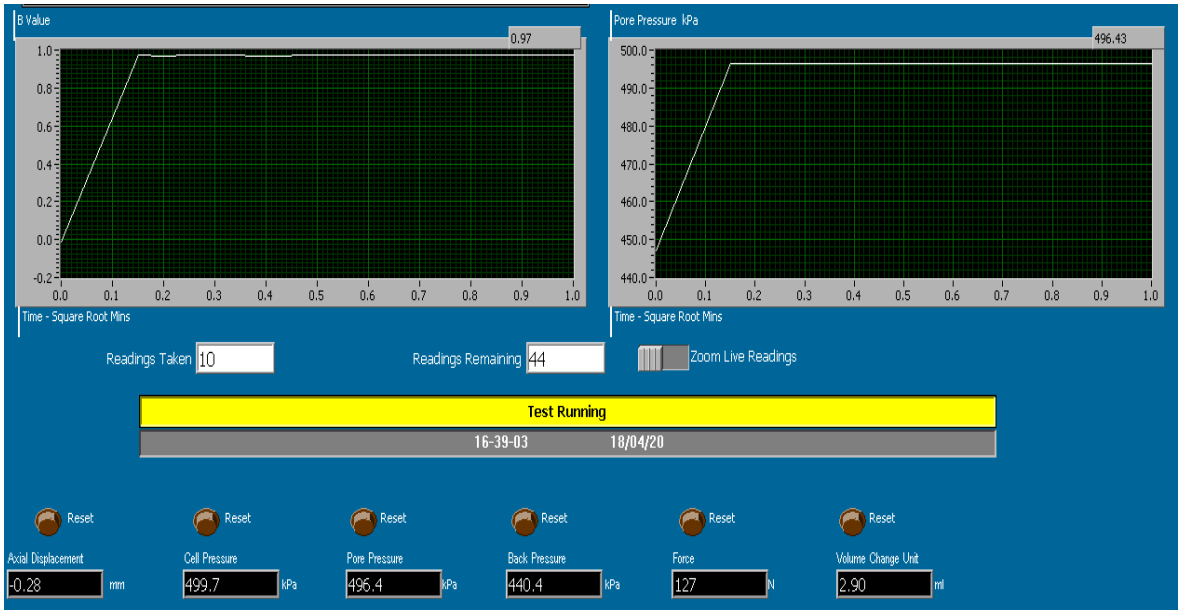
Şekil 4.11. Yerleştirilmiş ve vakumlanmış numune

4.4.3 Numunenin doyurulması

Doyurma işlemi numunenin herhangi bir deformasyon veya yüklemeye maruz kalmadan boşluklarının tamamının suyla dolmasını amaçlar. Doyurma işlemi çevre basıncı ve ters basıncın karşılıklı şekilde artırılması ile yapılır. Doyurma işlemi esnasında su havayı itmekte zorlanır. Bu nedenle doyurma işlemini kısaltmak amacıyla numunenin alt kısmından CO_2 gazı 30 dakika boyunca verilir ve numune içerisindeki hava ile CO_2 gazının yer değiştirmesi sağlanır. CO_2 gazı suda çözünür ve doyurma işlemi büyük ölçüde kısaltılır. Çevre basıncı ve ters basınç arasında 5 kPa fark olacak şekilde ayarlanır, numune içerisine giren su miktarı ve boşluk suyu basıncı kontrol edilir. Numune içerisine su alımı çok yavaşladığı yani hacim-zaman grafiği sabitlendiği anda basınçlar artırılarak kademeli olarak

numune suya doyurulur. Kademe artışları sırasında efektif gerilmenin (çevre basıncı ve boşluk suyu basıncı arasındaki fark) 30 kPa'ı geçmemesi ve aşırı konsolidasyon meydana gelmemesine özen gösterilmiştir. Doyurma işlemine B değeri 0.95-1 seviyelerine gelene kadar devam edilmiştir. B parametresi boşluk suyu basıncındaki değişimin çevre basıncındaki değişime oranıdır. (Skempton, 1964)

$$B = \frac{\Delta U}{\Delta \sigma_3} \tag{4.3}$$



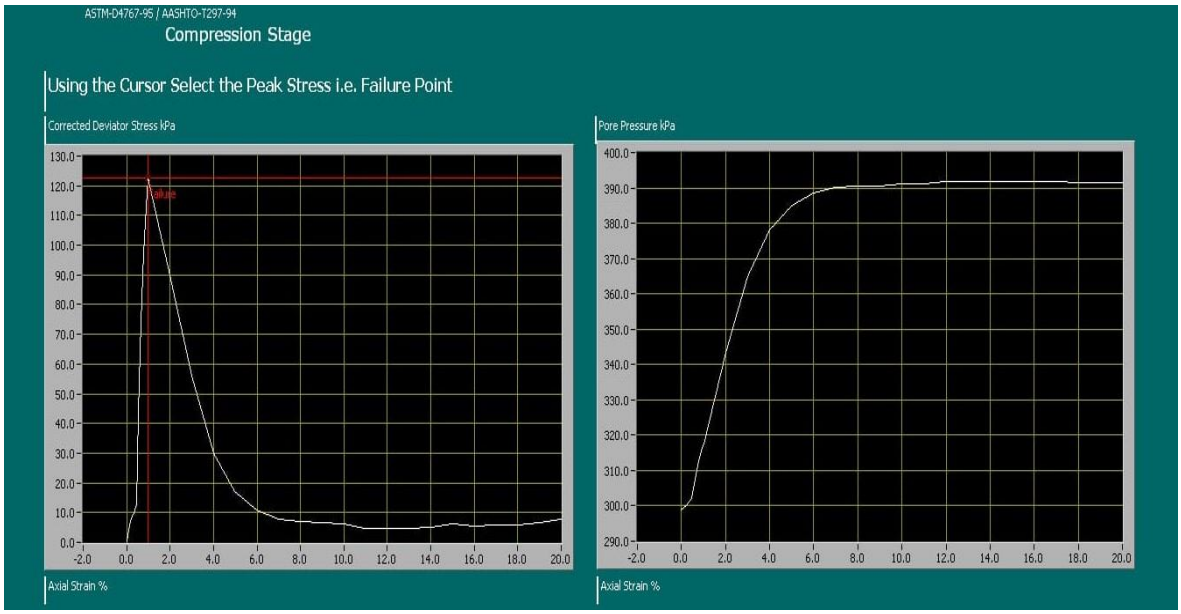
Şekil 4.12. B değeri kontrol grafiği

4.4.4 Konsolidasyon aşaması

Bu çalışma kapsamında numuneler üç farklı çevre basıncı altında izotropik olarak konsolide edilmiştir. İzotropik konsolidasyon düşey ve yatay efektif gerilmelerin eşit olması durumudur. Statik sıvılaşma düşük çevre basınçlarında meydana gelen bir olaydır. (Lade ve Yamamuro, 1997; Rahman ve Lo, 2014; Etminan 2016). Bu nedenle numuneler doygunluğu ulaştığı andan itibaren, ters basınç üzerine 50,100 ve 150 kPa çevre basıncı artışı yapılır ve efektif gerilme istenilen seviyeye düşene kadar valf açılarak su çıkışı sağlanır.

Konsolidasyon sona erdiği anda hemen kesme işlemi başlatılarak herhangi bir hacimsel büzüşmeye müsaade edilmez.

4.4.5 Kesme aşaması



Şekil 4.13. Kesme aşamasından bir grafik örneği

Numune izotropik olarak konsolide edilmesi ardından drenaj vanası kapatılarak kesme aşamasına geçirilir, drenaj vanasının kapalı olması aşırı boşluk suyu basıncı oluşmasına neden olmaktadır. Monotonik yüklemenin hızı 1 mm/dk olacak şekilde seçilmiştir. Literatürde daha önceden yapılmış çalışmalar sıvılaşma incelemeleri için düşük kesme hızlarını önermiştir (Lade ve Yamamuro 1997). Bu kesme hızı numune içerisindeki boşluk suyu basıncını dengelemek için idealdir (Sabbar, Chegenizadeh ve Nikraz, 2017). Tüm deneylere deformasyon seviyesi %20 olana kadar devam edilmiştir.

5. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu deneysel çalışmada doygun hale getirilen CEN temiz kumu üzerinde drenajsız koşullarda üç eksenli basınç deneyleri yapılarak temiz kumların monotonik yüklemeler altında davranışı incelenmiştir. Daha sonra siltlerin temiz kumların statik sıvılaşma potansiyeline etkisini araştırma amacıyla temiz kum numunesi kuru kütlesinin %6 ve %12'si kadar plastik olmayan bir silt numunesi ile iki farklı oranda karıştırılarak siltli temiz kum karışımları hazırlanmıştır. %12 siltli temiz kum karışımları farklı göreceli sıkılıklarda yerleştirilerek sıkılığın etkisi araştırılmıştır.

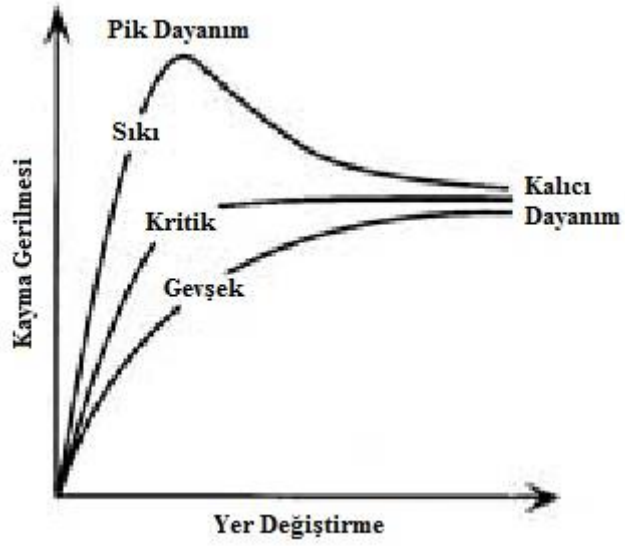
Kum zeminlerde sıvılaşma olayını artan aşırı boşluk suyu basıncının efektif gerilmeyi sıfırlayarak zeminin taşıma gücünü kaybetmesine sebep olmasıdır. Boşluk suyu basıncındaki artışı azaltarak sıvılaşmayı önlemek amacıyla su emme kapasitesi yüksek sepiyolit minerali siltli temiz kum karışımlarına ilave edilerek, katkının sıvılaşma potansiyeline etkisi araştırılmıştır. Optimum katkı oranını belirlemek amacıyla boşluk suyu basıncındaki değişim temel parametre olarak kabul edilmiştir. Sepiyolit katkısı %12 siltli temiz kum karışımlarıyla %4, %5 ve %7 olmak üzere üç farklı oranda karıştırılmıştır. Daha önce yapılan çalışmalar incelendiğinde statik sıvılaşmanın düşük çevre basınçları altında gerçekleşen bir olay olduğu tespit edilmiştir. Tarih boyunca kıyı ve liman zeminleri, su altı şevleri ve barajlarda gerçekleşen statik sıvılaşma vakaları 5-40 metre derinlikler arasında yaşanmış olup bunların ise çoğunu 20 metreden düşük derinliklerdeki zeminler oluşturmaktadır. (Middlebrooks 1942; Peck ve Kaun 1948; Andresen ve Bjerrum 1968; Bjerrum 1971; Troncoso 1988; Lade 1993). Bu nedenle statik sıvılaşma ile ilgili çalışmalar genellikle 0-250 kPa arasında efektif gerilmeye maruz kalmış çok gevşek, suya doygun kumlar üzerinde yapılmıştır. Bu çalışmada ise çevre basınçları 50,100 ve 150 kPa olarak seçilmiştir ve bütün numuneler bu çevre basıncı altında konsolide edildikten sonra kesme işlemi uygulanmıştır. Bu çalışma kapsamında yapılan deneylerin sonuçları özet şeklinde Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Konsolidasyonlu drenajsız üç eksenli deney sonuçları özeti

No	Numuneler	Göreceli Sıkılık	Çevre Basıncı	q_{max}	Aşırı Boşluk Suyu Basıncı
1	Temiz Kum	%0	100	82,4	22,9
2	Temiz Kum	%10	50	67,8	-14,9
3	Temiz Kum	%10	100	97,1	39,0
4	Temiz Kum	%10	150	132,1	95,6
5	%6 Siltli T.K	%10	50	50.5	-3.3
6	%6 Siltli T.K	%10	100	104,6	40,1
7	%6 Siltli T.K	%10	150	126,8	52,2
8	%12 Siltli T.K	%10	50	35,4	50
9	%12 Siltli T.K	%10	100	61,3	100
10	%12 Siltli T.K	%10	150	81,0	150
11	%12 Siltli T.K	%20	50	41,4	27
12	%12 Siltli T.K	%20	100	66,1	82,9
13	%12 Siltli T.K	%20	150	157,2	28,9
14	%4 SP'li S.T.K	%10	50	21,5	39,7
15	%4 SP'li S.T.K	%10	100	48,6	72,8
16	%4 SP'li S.T.K	%10	150	38,4	113,3
17	%5 SP'li S.T.K	%10	50	33,7	33,8
18	%5 SP'li S.T.K	%10	100	36,8	67,0
19	%5 SP'li S.T.K	%10	150	79,9	103,8
20	%7 SP'li S.T.K	%10	50	15,5	24,3
21	%7 SP'li S.T.K	%10	100	57	43,8
22	%7 SP'li S.T.K	%10	150	71,1	86,3

5.1 Temiz Kumun Davranışı

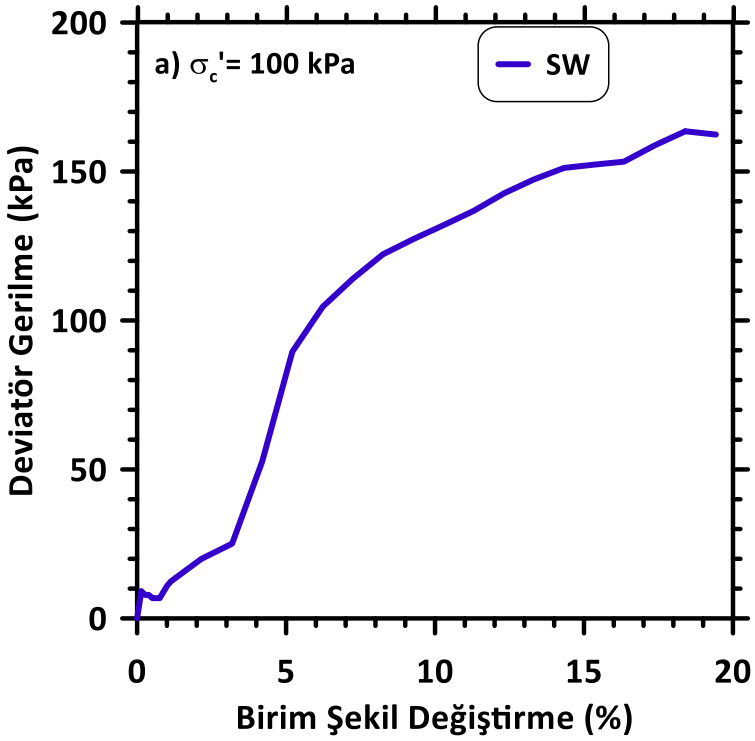
Deneysel çalışmanın başlangıcında ilk olarak temiz kumların davranışı incelenmiştir. Temiz kumlar doğaları gereği genişleme eğilimine sahip olmaları sebebiyle statik sıvılaşma potansiyelleri düşüktür fakat yine de birçok laboratuvar deneyleri için tercih edilmektedir. Bardet (1997)' de kumlu zeminlerin statik yükler altında davranışını Şekil 4.1'de verildiği gibi göstermiştir.

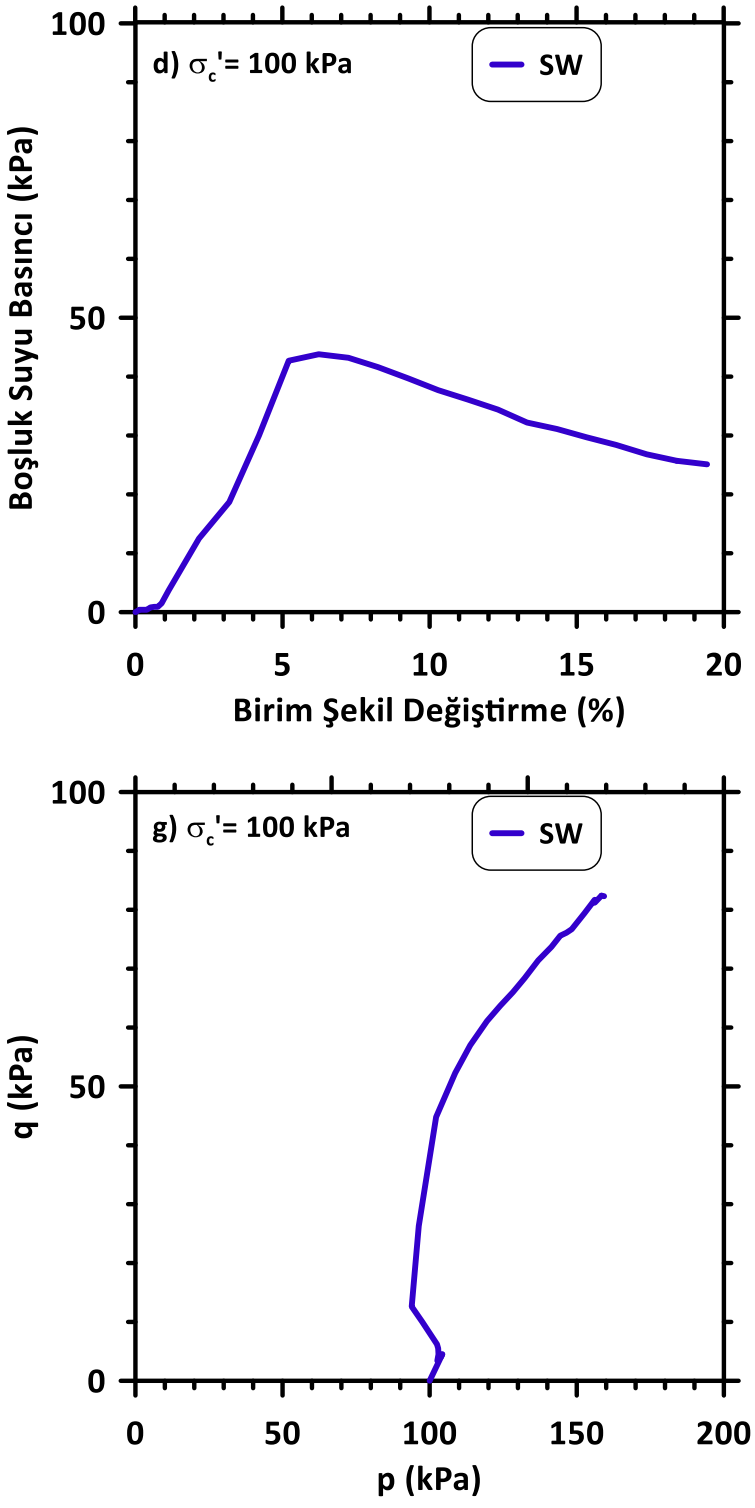


Şekil 5.1. Kumların statik yükler altında davranışı Bardet (1997)

Lade ve Yamamuro (1997)'de yaptıkları çalışmada temiz kumların statik yükler altında kolay kolay sıvılaşmayacağını ifade etmiştir. Ottawa temiz kumu ile yaptıkları çalışma sonucunda tamamen sıvılaşma gerçekleşmesi için %0 göreceli sıkılıkta numuneler hazırlanması gerekmiştir. Bu çalışmada temiz kumlar üzerinde %0 ve %10 göreceli sıkılıklarda numuneler hazırlanmıştır. Fakat temiz kum numunelerinden hiçbiri üzerinde tamamen sıvılaşma görülmemiştir. Bunun sebebi daha önce de bahsedildiği gibi temiz kumların genişleme eğilimine sahip olmalarından kaynaklıdır. Doygun kumlar yükleme altındayken öncelikle su daneleri yükü alır ve bu aşırı boşluk suyu basıncının yükselmesine neden olur. Aşırı boşluk suyu basıncı belirli bir seviyeye geldikten sonra kum daneleri birbirinden uzaklaşmaya başlar ve yük su danelerinden kum danelerine aktarılır, aşırı boşluk

suyu bu noktadan itibaren düşer ve zemin dayanım kazanmaya başlar. Yüksek boşluk oranına sahip çok gevşek göreceli sıkılıklarda hazırlanan numuneler düşük çevre basınçları altında bu şekilde genişleme davranışına sahiptir. Genişleme eğilimine sahip zeminler için eğer çevre basıncı yeterince düşük ise zemin gevşek dahi olsa sıkı gibi davranış gösterir. (Holts and Kovacs, 1981). Statik sıvılaşma düşük çevre basınçları altında gerçekleşen bir olay olması nedeniyle deneyde kullanılan çevre basınçlarında temiz kumlar üzerinde genişleme eğilimi hakimdir ve çok gevşek hazırlanan numunelerde dahi sıvılaşma görülmemiştir. Daralma eğiliminde davranacağı çevre basınçları ise statik sıvılaşma gerçekleşmesi için çok yüksek olduğundan CEN temiz kumu için tamamen statik sıvılaşma gerçekleşmeyeceğini söylemek mümkündür. Yine de Sabbar, Chegenizadeh ve Nikraz, (2017) yaptıkları drenajsız üç eksenli basınç deneyleri sonucunda, kullandıkları Perth temiz kumu ile %10 göreceli sıkılıkta ve 100 kPa çevre basıncı altında tamamen statik sıvılaşmayı gözlemlemişlerdir. Bu çalışmada kullanılan %0 sıkılıkta hazırlanan ve 100 kPa çevre basıncı uygulanan CEN temiz kumunun deney sonuçları Şekil 5.2'de verilmiştir.





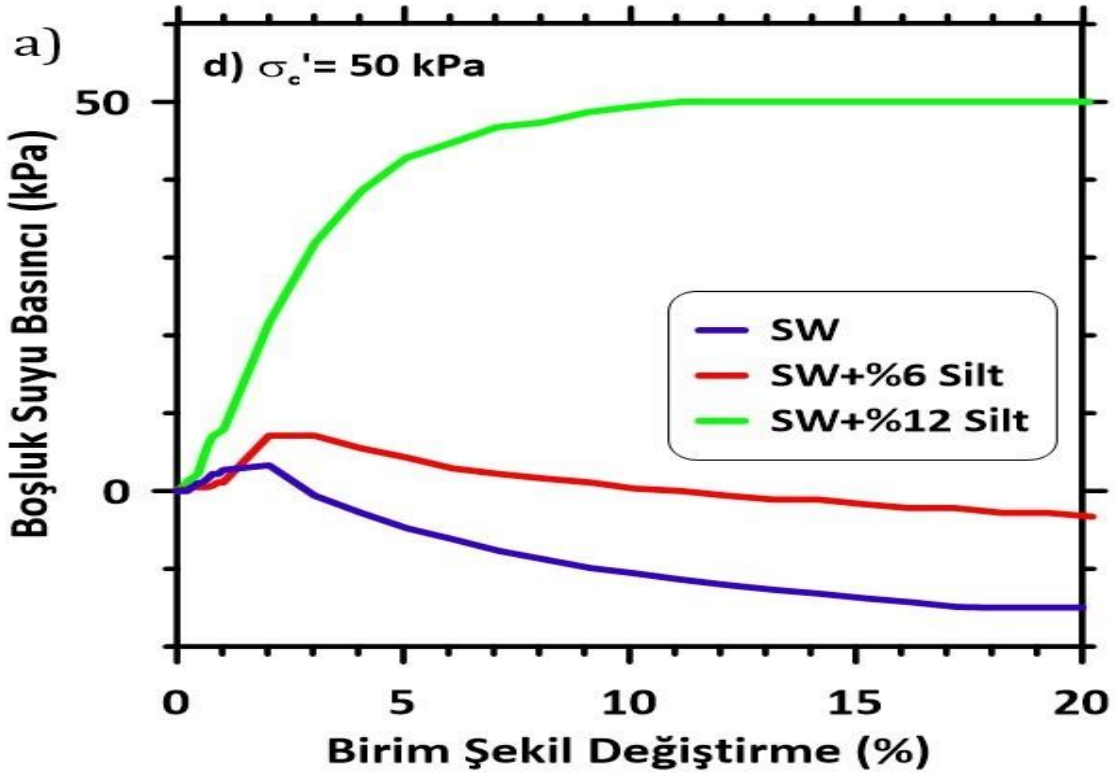
Şekil 5.2. %0 göreceli sıkılıktaki CEN temiz kumunun deney sonuçları

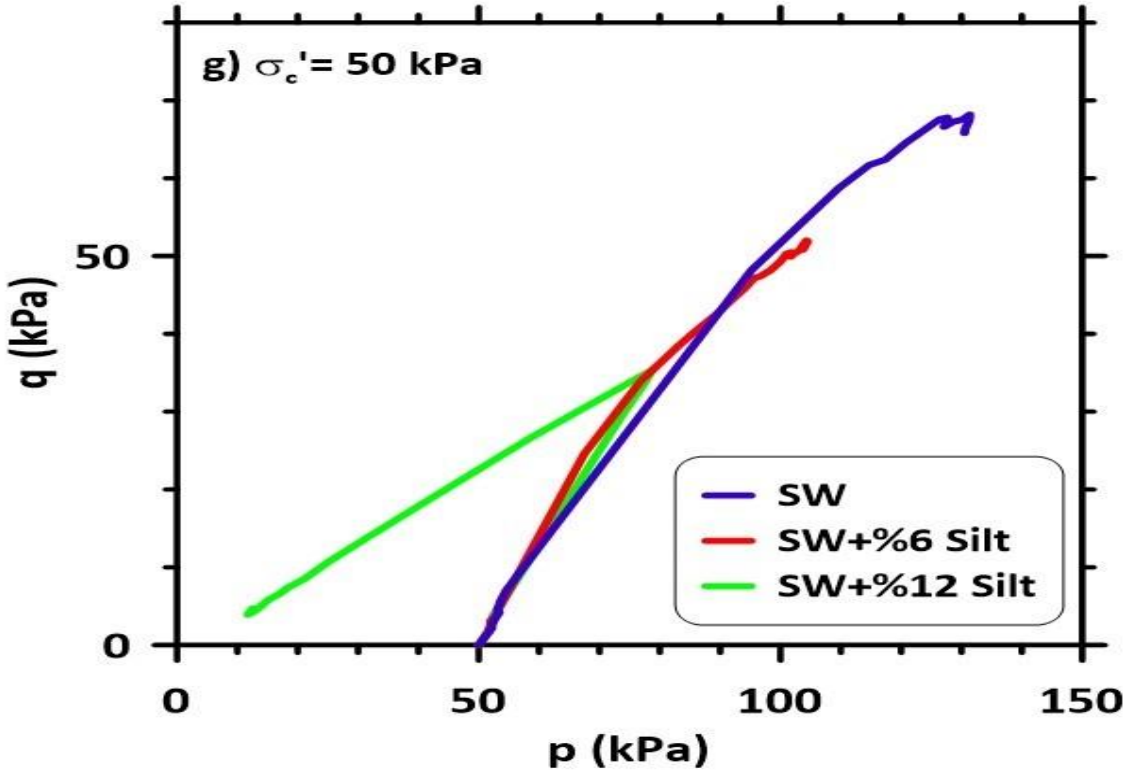
5.2 Siltin Temiz Kumun Davranışına Etkisi

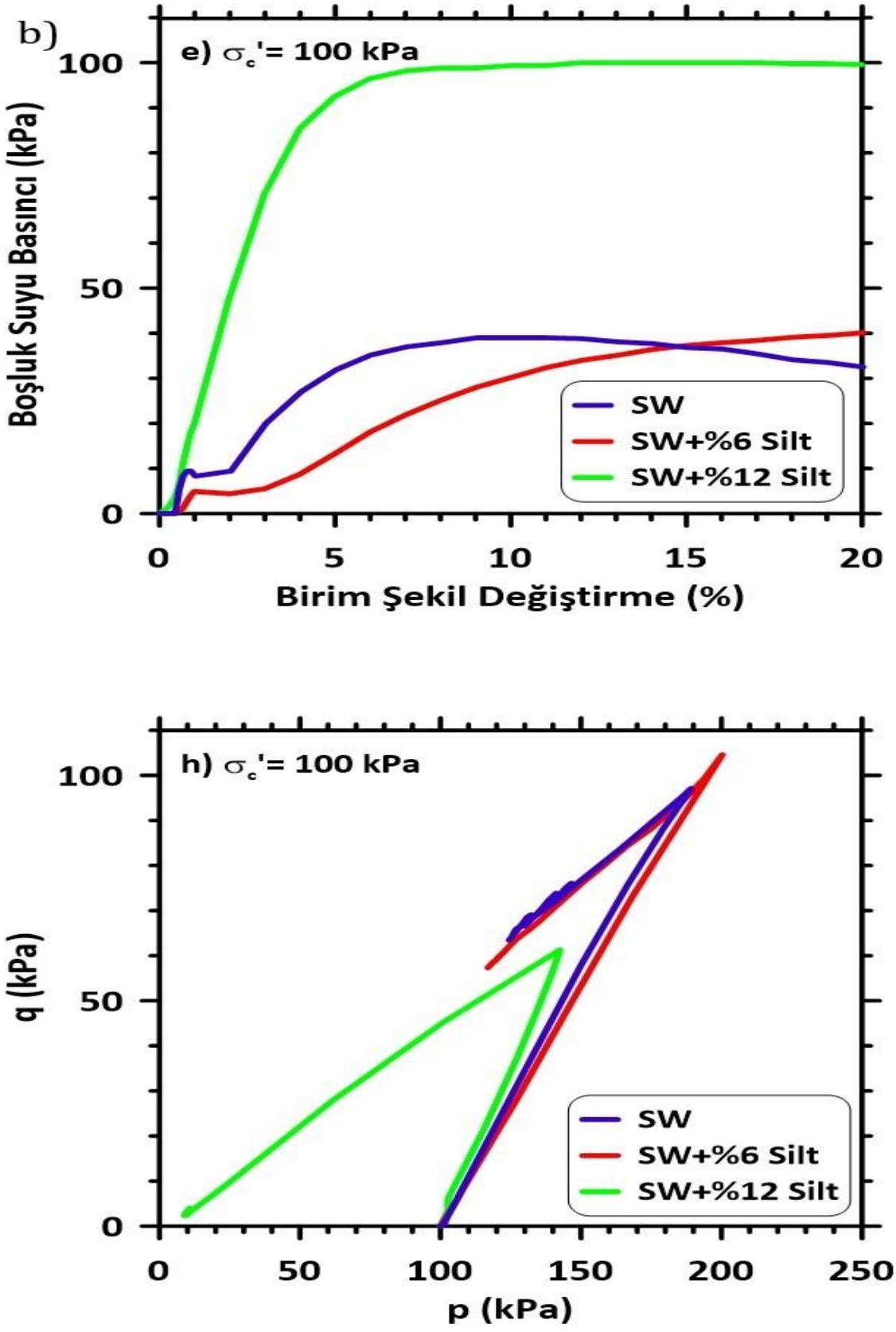
Ishihara (1993) tarihsel vakalar incelendiği takdirde sıvılaşma meydana gelmiş zeminlerin büyük çoğunluğunun içeriğinde bir miktar ince dane bulunduran gevşek kumlar olduğunu ifade etmiş ve deneysel çalışmalar yapılırken temiz kumlar yerine siltli kumlar üzerinde çalışmanın daha faydalı olacağını belirtmiştir. Lade ve Yamamuro (1997) Ottawa temiz kumu ile %6 plastik olmayan silt içeriğine sahip Nevada kumuyla drenajsız üç eksenli deneyleri gerçekleştirmişlerdir ve Nevada kumu üzerinde %22 göreceli sıkılıkta tamamen sıvılaşma gözlemlemişlerdir. Ayrıca içeriğindeki ince daneye göre değişim göstermek kaydıyla siltli kum zeminlerin %60 göreceli sıkılıkta bile tamamen statik sıvılaşabileceği ifade etmişlerdir. Bu bilgiler ışığın da siltlerin temiz kumların statik sıvılaşma potansiyelinin etkisini gözlemlemek amacıyla Sakarya bölgesinden alınan numune 200'nolu elekten yıkanarak silt numunesi elde edilmiş ve %6 ve %12 olmak üzere iki farklı oranda temiz kum ile karıştırılmıştır.

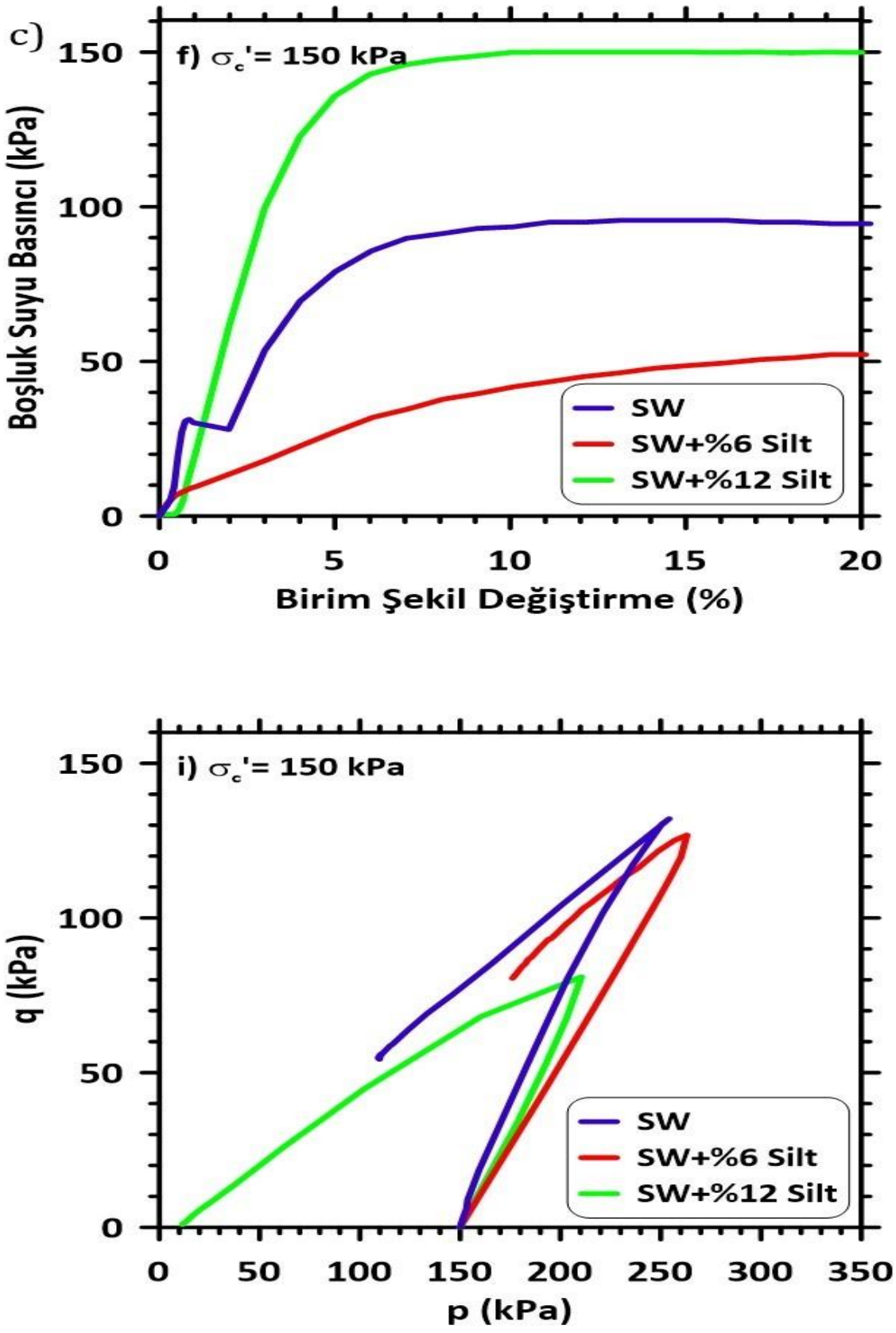
Bu çalışma kapsamında oluşturulan silt-temiz kum karışımları teori bölümünde verilen 2011'de yapılan çalışma ile benzerlik göstermiş olup karışımlarda boşluk oranı artışı gözlenmiştir. Boşluk oranı artışı kesme esnasında daha fazla aşırı boşluk suyu basıncı oluşmasına neden olarak %12 siltli numune üzerinde tamamen statik sıvılaşma gerçekleşmesine neden olmuştur.

Silt danelerinin temiz kumların statik sıvılaşma potansiyeline etkisin araştırmak amacıyla temiz kum ve siltli temiz kum karışımları %10 göreceli sıkılıkta yerleştirilmiş, 50,100 ve 150 kPa çevre basınçları altında konsolide edilerek drenajsız koşulda monotonik yükleme uygulanmıştır. Deney sonuçları Şekil 5.5'te verilmiştir.


a)
d) σ_c'= 50 kPa
Boşluk Suyu Basıncı (kPa)
50
0
0
5
10
15
20
Birim Şekil Değiştirme (%)
SW
SW+%6 Silt
SW+%12 Silt


g) σ_c'= 50 kPa
q (kPa)
50
0
0
50
100
150
p (kPa)
SW
SW+%6 Silt
SW+%12 Silt


b)
e) σc'= 100 kPa
Boşluk Suyu Basıncı (kPa)
Birim Şekil Değiştirme (%)
SW
SW+%6 Silt
SW+%12 Silt
h) σc'= 100 kPa
q (kPa)
p (kPa)
SW
SW+%6 Silt
SW+%12 Silt



Şekil 5.3. Siltli temiz kum numunelerinin temiz kum ile karşılaştırılması a) 50 kPa b) 100 kPa c) 150 kPa çevre basınçları altında

Şekil 5.3'te görüldüğü üzere %6 siltli numune hala genişleme eğilimindedir ve siltin davranışa etkisi küçük miktarlardadır numune hala temiz kuma yakın bir davranış göstermektedir. Oluşan aşırı boşluk suyu basıncında deney süresince bir sabitlenme görülmemiştir. 50 kPa çevre basıncında oluşan aşırı boşluk suyu basıncı temiz kumdan daha fazla iken bu değerler 100 kPa çevre basıncında neredeyse eşitlenmiş 150 kPa çevre basıncında ise %6 siltli numune temiz kumun gerisinde kalmıştır. Dayanımlarda buna bağlı olarak 50 kPa çevre basınında temiz kumun dayanımı daha fazlayken 100 kPa ve 150 kPa çevre basınçlarında %6 siltli numune ve temiz kum çok yakın dayanım seviyeleri göstermişlerdir. %12 silt içeriğine sahip numune üzerinde ise davranış ciddi şekilde değişerek tamamen sıvılaşma gerçekleşmiştir. Hızlı bir şekilde oluşan aşırı boşluk suyu basıncı nedeniyle efektif gerilme azalmış ve dayanımlar temiz kum veya %6 siltli numuneye göre gözle görülür seviyede azalmıştır. Aşırı boşluk suyu basınçları göreceli küçük bir miktar olan %5 gibi bir seviyede en yüksek seviyesine ulaşmış ve sabitlenmiştir. Buna bağlı olarak efektif gerilme sıfır veya çok sıfıra çok yakın değerlere kadar düşmüş ve dayanımlarda bunu takip ederek numune taşıma gücünü kaybetmiştir. Ayrıca tamamen statik sıvılaşma literatürde verildiği gibi sadece 100-125 kPa altındaki çevre basınçları için değil 150 kPa çevre basıncında dahi gerçekleşmiştir. Bunun nedeni numunenin %10 gibi çok düşük göreceli sıkılığa sahip olmasıdır. Monotonik yüklemeler altında doygun kum numuneleri fıçılaşma özelliği gösterirler. Tamamen statik sıvılaşma yaşanan numunelerde tekdüze bir formda içsel deformasyon oluşması nedeniyle membran üzerinde kırışıklıklar meydana gelir. Şekil 5.4'te tamamen statik sıvılaşma gerçekleşen bir numune ve sadece fıçılaşmış bir numune verilmiştir



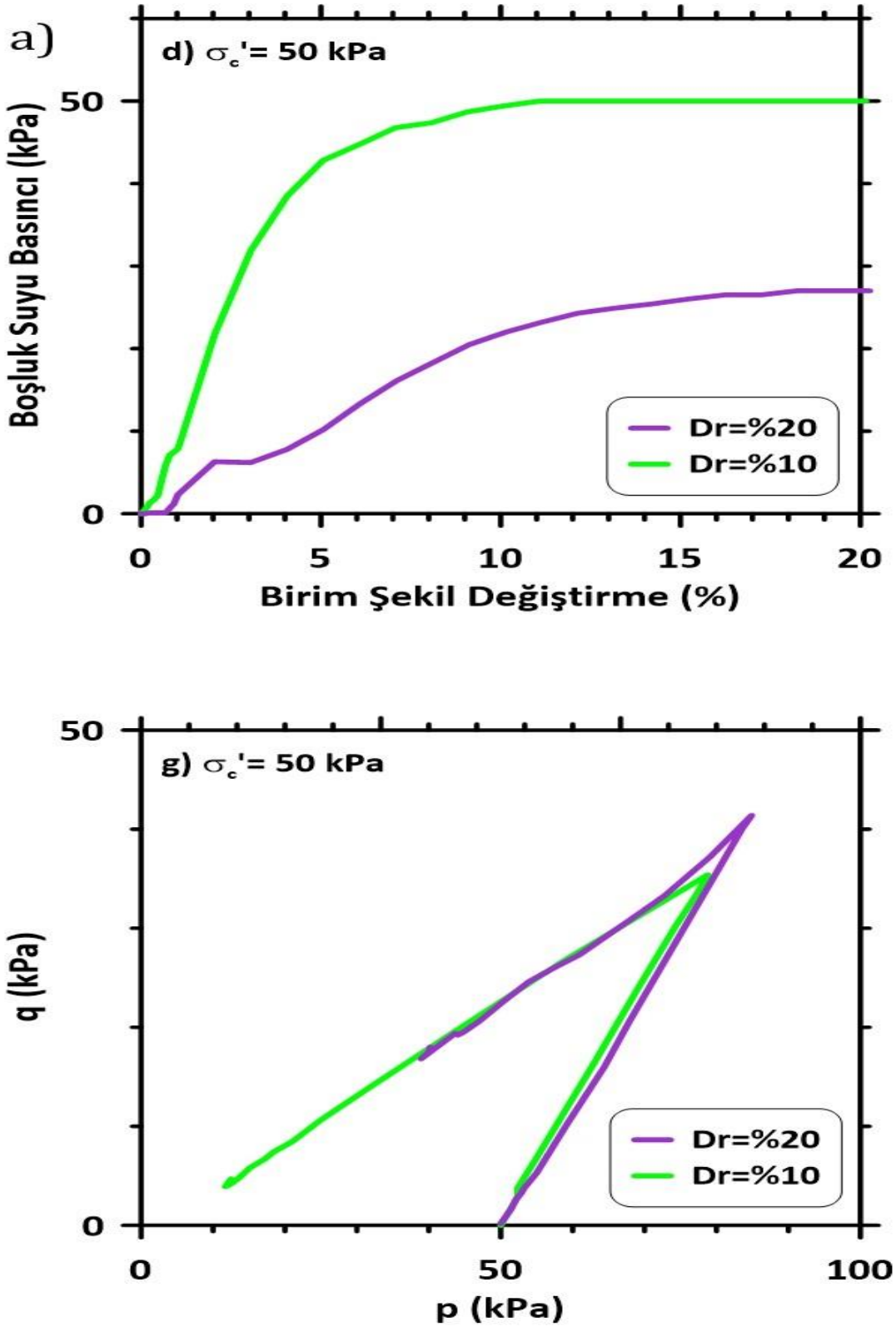
Şekil 5.4. Tamamen statik sıvılaşan ve sıvılaşma gerçekleşmeyen numunenin farkı

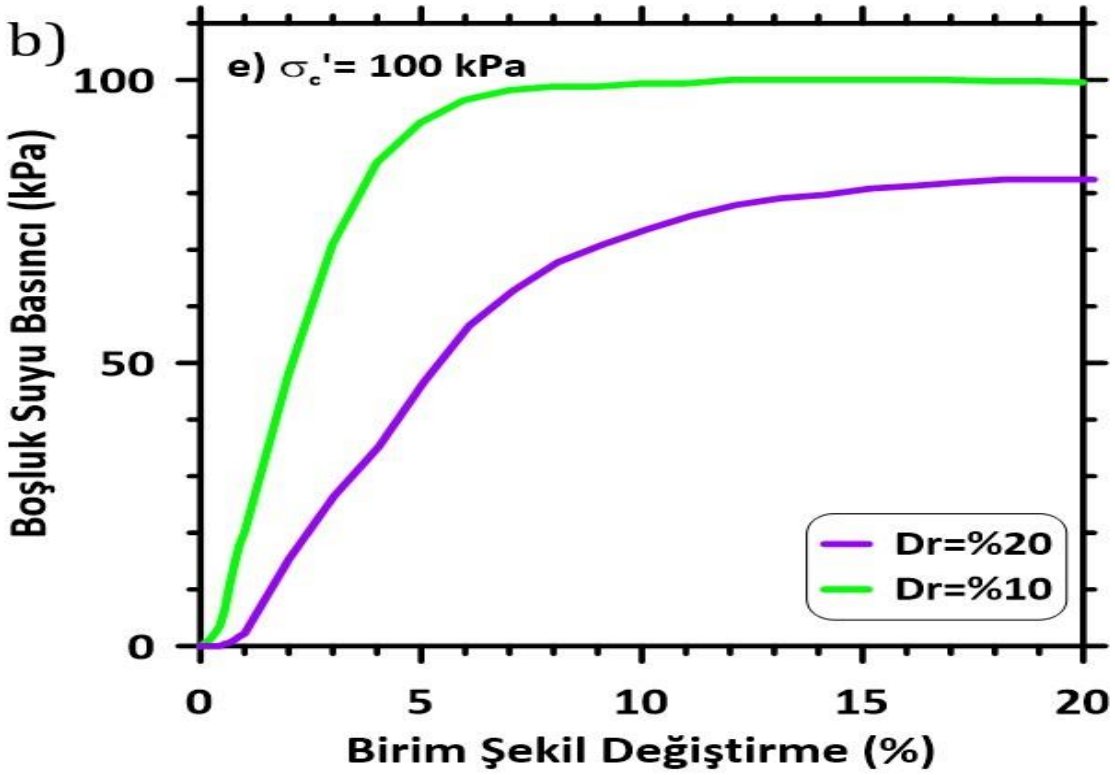
5.3 Siltli Temiz Kumlarda Göreceli Sıkılığın Etkisi

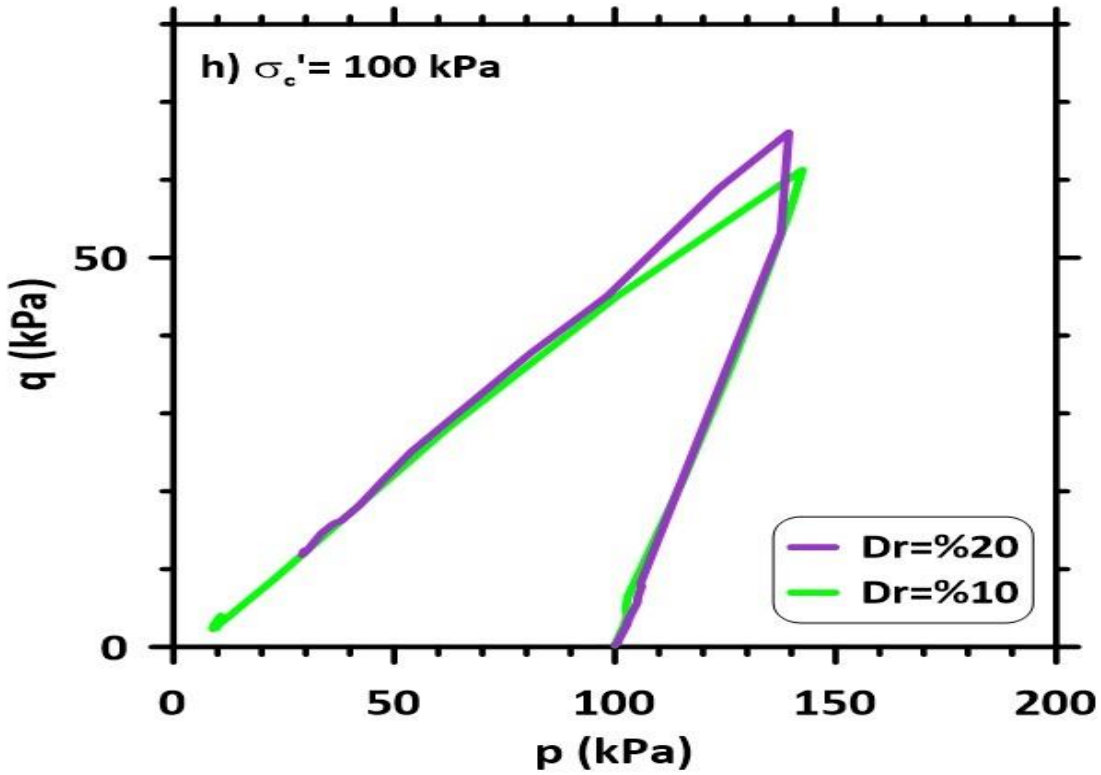
Statik sıvılaşmanın açısından en önemli faktörlerden biri kesinlikle göreceli sıkılıktır. Literatürde yapılan laboratuvar araştırmaları ve bildirilen tarihsel statik sıvılaşma vakalarının tamamı çok düşük göreceli sıkılığa sahip zeminler ve numuneler üzerinde meydana gelmiştir. Statik sıvılaşma çok gevşek suya doygun kumlarda gerçekleşen bir olaydır.

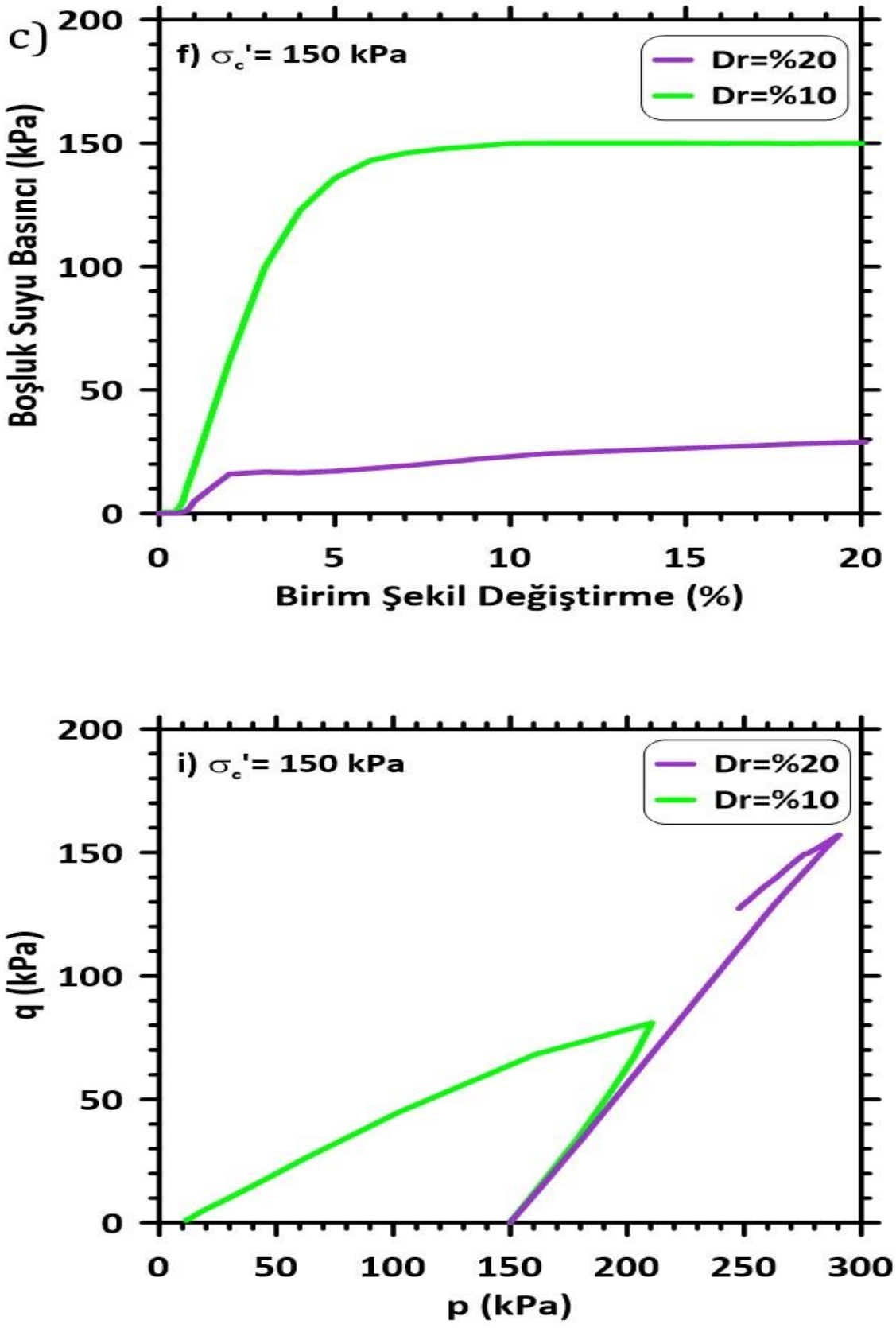
Tamamen statik sıvılaşma efektif gerilmenin sıfırlanması ve zeminin akıcı bir kıvamda davranış göstererek taşıma gücünü kaybetmesi olarak tanımlanır. Bu çalışmada tamamen statik sıvılaşma görülmüş %12 silt içeriğine sahip siltli temiz kum numunesi

üzerinde %10 ve %20 olmak üzere iki farklı çok düşük göreceli sıkılıkta drenajsız üç eksenli deneyler yapılmıştır. Deney sonuçları Şekil 5.5'te verilmiştir.




b)
e) σc'= 100 kPa
Boşluk Suyu Basıncı (kPa)
100
50
0
0
5
10
15
20
Birim Şekil Değiştirme (%)
Dr=%20
Dr=%10


h) σc'= 100 kPa
q (kPa)
50
0
0
50
100
150
200
p (kPa)
Dr=%20
Dr=%10



Şekil 5.5. Sıkılık farkının siltli temiz kum numuneleri üzerine etkisi a) 50 kPa b) 100 kPa c) 150 kPa çevre basınçları altında

Şekil 5.7'de görüldüğü üzere %10 göreceli sıkılıkta hazırlanan tüm numuneler üzerinde tamamen statik sıvılaşma gerçekleşirken, %20 göreceli sıkılıkta hazırlanan numuneler üzerinde ise Castro (1969)'nun vermiş olduğu kumların monotonik yükleme altındaki davranışını gösteren grafikteki A eğrisi olarak verilmiş ve geçici sıvılaşma olarak bilinen olay meydana gelmiştir. Göreceli sıkılık oranındaki artış nedeniyle %20 sıkılıktaki numunelerde daha yüksek seviyelerde dayanımlar görülmüştür. Ayrıca daha düşük aşırı boşluk suyu basıncı oluşmuş ve belirli bir seviyede sabitlenme görülmemiştir. 50 ve 100 kPa çevre basınçlarında numuneler benzer davranışlar göstermiştir fakat 150 kPa çevre basınındaki numunede ise hem göreceli sıkılık miktarındaki artış hem de çevre basıncındaki artış nedeniyle dayanımdaki artış ve aşırı boşluk suyu basıncındaki düşüş muazzam seviyede olmuştur. Buda daha önceki kısımlarda bahsedildiği gibi %10 sıkılık seviyesinin aşırı düşük olması nedeniyle tüm çevre basınçlarında sıvılaştığını fakat %20 sıkılıktaki numunenin tamamen statik sıvılaşması gerçekleştirmesi için 150 kPa çevre basıncının çok yüksek olduğunu göstermiştir. Bu şekilde %20 göreceli sıkılığa sahip bu numune literatürdeki diğer çalışmalar ile tutarlılık göstermiş bulunmaktadır.

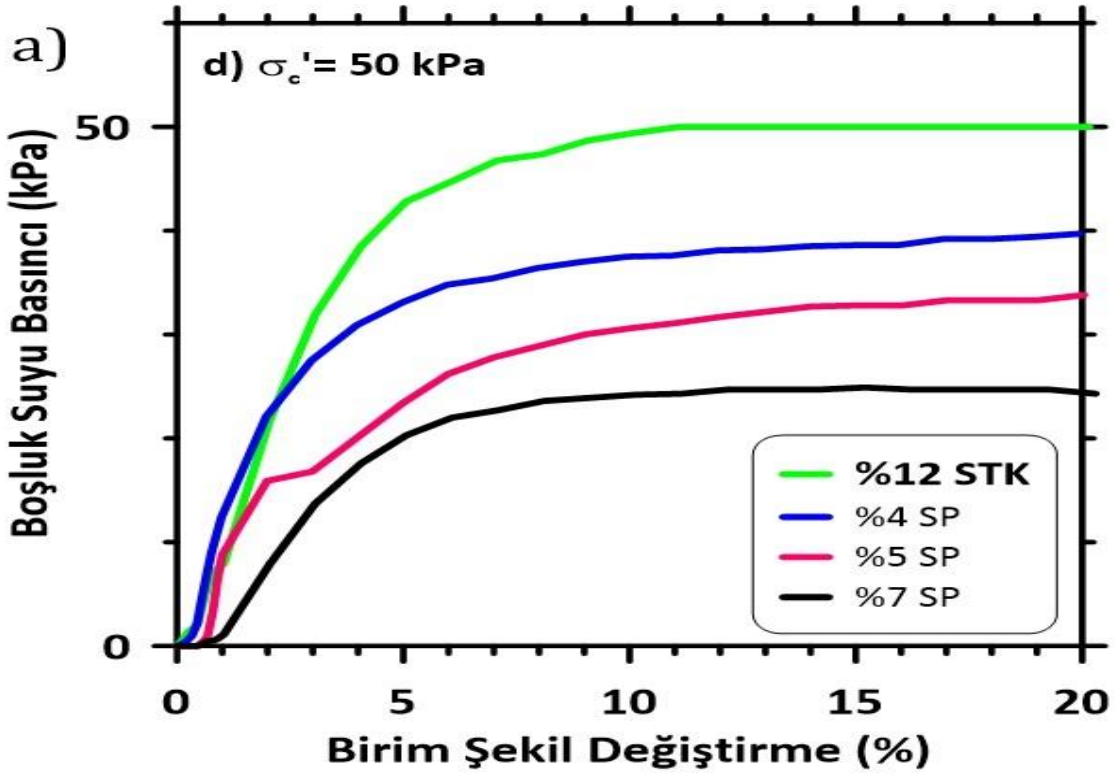
Şunu da belirtmek gerekir ki, bu çalışma kapsamında bütün numuneler %20 deformasyon seviyesine ulaştığında deneyler sonlandırılmıştır. Daha yüksek deformasyon seviyelerinde pekleşme gerçekleşerek numunelerin dayanım kazanması söz konusu olabilir.

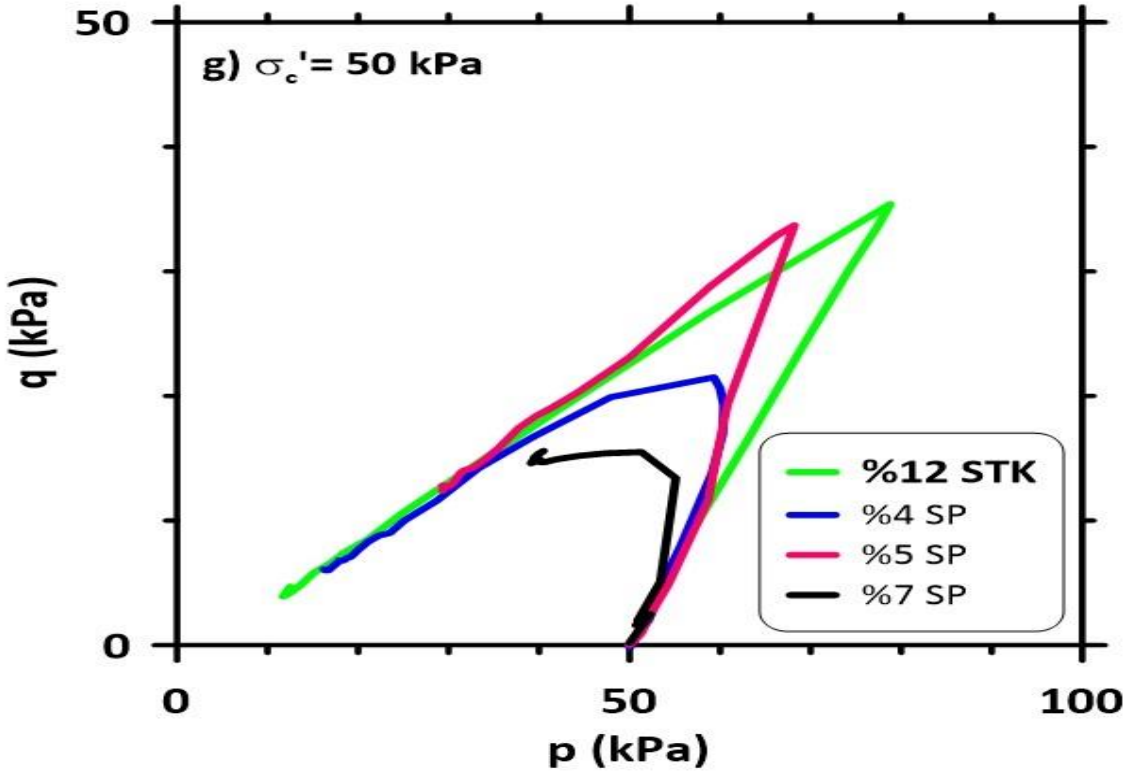
5.4 Sepiyolitin Siltli Temiz Kumların Statik Sıvılaşmasına Etkisi

Sepiyolit doğası gereği yüksek su emme kapasitesine sahip bir kil mineralidir. Bu çalışma kapsamında sepiyolit oluşan aşırı boşluk suyu basıncını azaltarak sıvılaşma potansiyelini azaltması amacıyla kullanılmıştır.

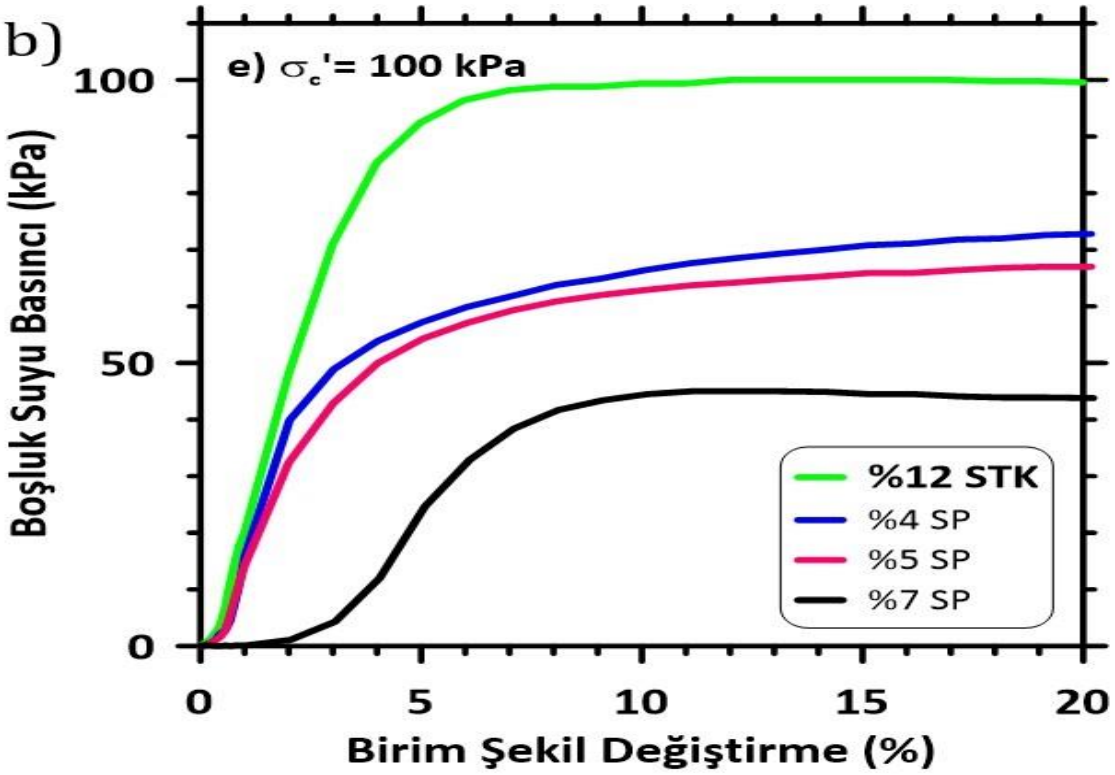
Tamamen statik sıvılaşma meydana gelen %12 silt içeriğine sahip siltli temiz kum numunesine ağırlığının %4, %5 ve %7'si kadar sepiyolit katkısı eklenerek drenajsız üç eksenli deneyler yapılmıştır. Daha önce de bahsedildiği gibi katkı oranı ilk olarak göreceli orta bir değer olan %4 ile başlatılmıştır ve ana parametre olarak görülen aşırı boşluk suyu

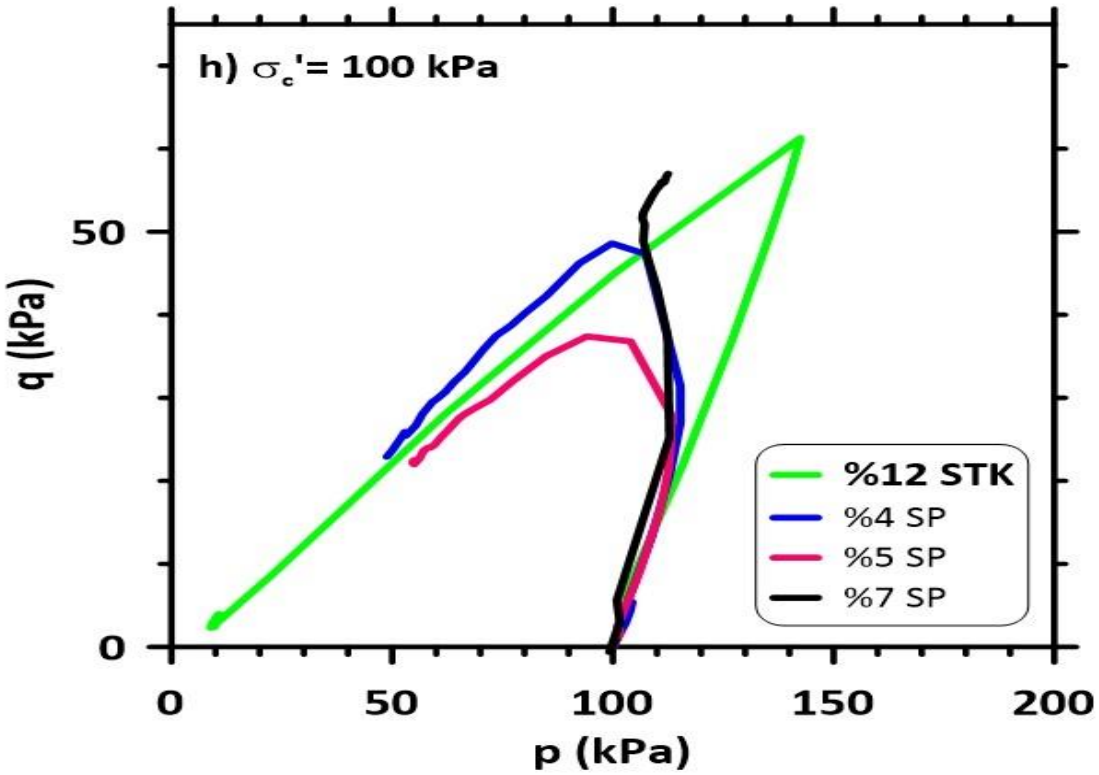
basıncında yaklaşık %20'lik bir azalma görülmüştür. Daha sonra katkı miktarında %1'lik bir artış yapılarak %5'e çıkarılmıştır fakat %4 ile çok yakın değerler elde edilmiş ve bir sonraki artış miktarına %2 olarak karar verilip katkı oranı %7'ye çıkarılmıştır. Şekil 5.8'de katkılı ve katkısız numunelerin deney sonuçları verilmiştir.

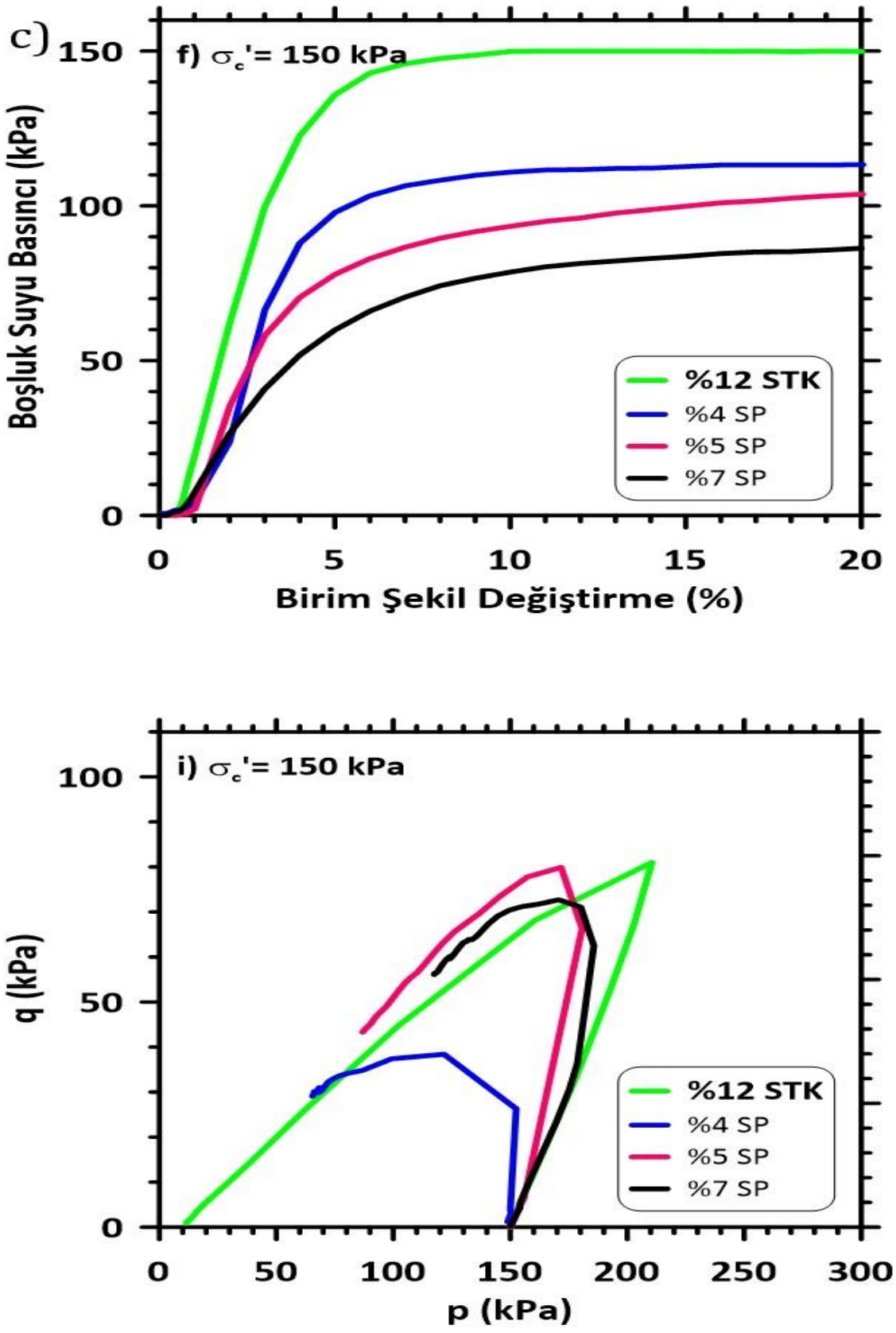

a)
d) σc'= 50 kPa
Boşluk Suyu Basıncı (kPa)
50
0
0
5
10
15
20
Birim Şekil Değiştirme (%)
%12 STK
%4 SP
%5 SP
%7 SP


g) σc'= 50 kPa
q (kPa)
50
0
0
50
100
p (kPa)
%12 STK
%4 SP
%5 SP
%7 SP

b)


e) σc'= 100 kPa
Boşluk Suyu Basıncı (kPa)
100
50
0
0
5
10
15
20
Birim Şekil Değiştirme (%)
%12 STK
%4 SP
%5 SP
%7 SP


h) σc'= 100 kPa
q (kPa)
50
0
0
50
100
150
200
p (kPa)
%12 STK
%4 SP
%5 SP
%7 SP



Şekil 5.6. Sepiyolit katkısının sıvılaşabilir siltli temiz kum karışımları üzerine etkisi a) 50 kPa b) 100 kPa c) 150 kPa çevre basınçları altında

Şekil 5.6'da görüldüğü üzere optimum katkı oranı ana parametre olan aşırı boşluk suyunda yarattığı %50 seviyelerindeki azalma ile %7 olarak tespit edilmiştir. Sepiyolit sadece oluşan aşırı boşluk suyu basıncının azalmasına neden olmamış, aynı zamanda en yüksek seviyesine çıkmasını da geciktirmiş bulunmaktadır. Sepiyolit danelerinin içsel çekim kuvvetinin çok yüksek olması boşluk oranlarının artmasına neden olmuş bu da numunelerin daha düşük dayanım göstermesine neden olmuştur. Katkı genel olarak dayanımda azalmaya sebep olsa dahi 100 kPa çevre basıncı altında %10 göreceli sıkılığa sahip çok gevşek olan numunede davranışı tamamen değiştirerek efektif gerilme artışı yaşamasına ve q-p grafiğinin sağa dönmesine sebep olmuştur. Katkı miktarının dayanıma etkisi net şekilde gözlemlenememiştir çünkü dayanımlar arasında genel bir trend bulunmamaktadır. Numunelerin hepsinin dane dağılımı veya yerleşiminin aynı olmaması nedeniyle bu durum meydana geldiği düşünülmektedir. Fakat aşırı boşluk suyu basıncında neden olduğu düşüş nedeniyle bütün numuneler üzerinde yüksek deformasyon seviyelerine ulaşıldığında en yüksek kalıcı kayma dayanımı yine %7 sepiyolitli numunelerde görülmüştür. Dayanım grafikleri Ekler bölümünde verilmiştir.

5.5 Başarısız Deneyler Serisi

Bu çalışmada deneysel sürecin ilk aşamaları esnasında birçok farklı yöntem kullanılmıştır ve numune üzerindeki etkileri bu başlık altında incelenecektir. Numune yerleştirme yönteminin statik sıvılaşma üzerinde önemli bir etkisi bulunmaktadır. Bir diğer önemli etki ise çevre basıncı ve sıkılıktır. Bu parametreler deney esnasında hassas bir dengededir ve ufak miktarlarda değişimler bile deney sonuçları üzerinde ciddi bir etkiye sahip olmaktadır.

5.5.1 Numune yerleştirme yönteminin etkisi

Bu çalışmada kullanılan bütün numuneler ıslak yerleştirme yöntemlerinden biri olan nemli tokmaklama yöntemi ile yerleştirilmiştir. Bu yöntem tarih boyunca farklı araştırmacılar tarafından kullanılsa da birçoğu tarafından saha şartları iyi bir şekilde

yansıtmadığını da belirtmişlerdir (Lade ve Yamamuro, 1997). Mahmoudi vd. (2019) yaptıkları çalışma ile numune yerleştirme yönteminin siltli kumların drenajsız koşullarda monotonik yükleme altındaki davranışına etkisini incelemişlerdir. Deney sonuçlarına göre ıslak yöntemle yerleştirilen numunelerde aşırı boşluk suyu basıncının kuru yöntemlerle yerleştirin numunelere göre daha fazla olduğu görülmüştür. Islak yöntemlerle yerleştirilen numunelerde geçici bir kohezyon etkisi görülür. Bu etki numune içerisinde peteksi yapılar oluşmasına ve aşırı boşluk suyu basıncında artışa sebep olur. Bu bilgiler ışığı altında ilk deneylerde numune yerleştirme yöntemi olarak kuru huni yöntemi kullanılmıştır. Kuru huni yönteminde numune bir huni yardımıyla alt kısmından kalıp içerisine dökülür daha sonra huni kalıp ekseninde nazikçe yükseltilerek istenilen göreceli sıkılıkta yerleştirilir. Kuru huni yöntemi numunenin bütün kısımlarında aynı özelliği göstermesi ve silt ile kum danelerinin ayrışmasını önlemesi gibi avantalara sahiptir. Fakat bu çalışmada kuru huni yöntemi ile yerleştirilen numunelerde kapilarite özelliği görülmüş, istenen miktarda su numune içerisine girse dahi su numunenin alt kısımlarına ulaşamaması nedeniyle numune doygun olmayan özellik göstermiştir. Tam doygun özellik göstermemesi nedeniyle fıçılaşmasına rağmen üzerinde göçme meydana gelen bir numunenin deney sonrası durumu Şekil 5.7'de verilmiştir.



Şekil 5.7. Tam doygun özellik göstermeyen bir numunenin kesme aşaması sonrası durumu

5.5.2 Doygunluk aşamasında gerçekleşen aşırı konsolidasyon durumu

Deneysel süreç esnasında gerçekleşen bir diğer hatalı yöntem ise doygunluk aşaması esnasında hücre basıncı ve ters basınç arasındaki farkı fazla ayarlamaktır. Bu durum numunenin her doygunluk aşamasında ufak miktarlarda konsolide olmasına ve sıkışmasına sebep olacaktır. Statik sıvılaşma gevşek zeminlerde meydana gelen bir durum olması nedeniyle kumların aşırı konsolidasyonu statik sıvılaşma potansiyelini azaltmaktadır. Bu çalışmada ters basınç ve çevre basıncı arasındaki fark 5 kPa olarak ayarlanarak numuneler doyurulmuştur. Çevre basıncı ve ters basınç arasındaki fark ne kadar fazla olursa numune içerisine su o kadar hızlı girerek doygunluk aşaması hızlanacaktır. Fakat bu çalışmada 10 ve 15 kPa fark kullanıldığı takdirde aşırı konsolidasyon meydana gelerek deney sonuçlarını olumsuz etkilemiştir.

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez kapsamında temiz kumların drenajsız koşullarda monotonik yüklemeler altında davranışı incelenmiştir. Temiz kumların statik sıvılaşma potansiyelini etkisini gözlemlemek amacıyla temiz kum farklı oranlarda silt ile karıştırılmıştır. Farklı çevre basınçları ve göreceli sıkılıklarda hazırlanan numuneler ile deneyler gerçekleştirilerek statik sıvılaşma kavramı farklı parametrelerin etkisinde incelenmiştir. Tamamen statik sıvılaşma gerçekleşen siltli temiz kum karışımlarına farklı oranlarda sepiyolit katkısı eklenerek sıvılaşma potansiyelini düşüren optimum katkı oranı araştırılmıştır. Aşırı boşluk suyu basıncındaki değişim ana parametre olmak üzere, dayanım ve katkının davranışa etkisi incelenmiştir. Sonuç ve öneriler aşağıda özetlenmiştir.

- ✓ CEN temiz kumu drenajsız monotonik yükleme altında tamamen statik sıvılaşma göstermemektedir. Statik sıvılaşma gösterebileceği düşük çevre basınçlarında genişleme eğilimindedir. Bu nedenle aşırı boşluk suyu basıncı belirli bir seviyeye kadar artış gösterip daha sonra azalmaktadır. Bu durum %0 gibi gerçek dışı bir göreceli sıkılık değerinde bile gözlenmiştir. CEN temiz kumu üzerinden tamamen statik sıvılaşma görülmemektedir.
- ✓ Genişleme eğilimi sebebiyle gevşek kumlarda sıkı kum davranışı gözlenmiştir. 50 kPa çevre basıncı altındaki numuneler sıkı kum gibi davranmış ve 150 kPa çevre basıncı altındaki numuneler ile benzerlik gözlenmiştir. Kumların drenajsız durumda statik sıvılaşmasını incelemek için en uygun çevre basıncının 100 kPa seviyeleri olduğu görülmüştür.
- ✓ Numune yerleştirme yöntemi olarak ıslak yöntemlerden olan nemli tokmaklama yöntemi yapay bir kohezyon yaratarak yüksek boşluklu numuneler oluşturmuştur ve kuru huni yöntemine göre statik sıvılaşma potansiyelinde artışa yol açmıştır.
- ✓ Kullanılan silt numunesi için; siltler yer çekimi etkisiyle değil kum daneleri arasına yerleşerek sıkılığı artırmak yerine içsel çekim kuvvetlerinin etkisiyle

bir arada kalmıştır. Bu yüksek boşluk oranına sahip yapılar oluşturarak statik sıvılaşma potansiyelini artırmıştır.

- ✓ Temiz kumların içerisindeki silt miktarı arttıkça statik sıvılaşma potansiyelinin arttığı görülmüştür. %6 siltli numuneler için davranış az miktarda değişse dahi %12 siltli numuneler tamamen statik sıvılaşarak silt miktarındaki değişimin sıvılaşma potansiyeli açısından önemli bir faktör olduğu görülmüştür.
- ✓ Statik sıvılaşma düşük çevre basınçlarında gerçekleşir. Çevre basıncı yükseldikçe numuneler daha çok sıkışmaktadır. Bu statik sıvılaşma potansiyelinin düşmesine neden olur.
- ✓ Statik sıvılaşma düşük göreceli sıkılığa sahip çok gevşek kum zeminlerde meydana gelir. %10 göreceli sıkılığa sahip tüm numuneler üzerinde tamamen statik sıvılaşma gerçekleşirken %20 göreceli sıkılıktaki hiçbir numune de tamamen statik sıvılaşma görülmemiş, kısıtlı statik sıvılaşma gerçekleşmiştir. %20 göreceli sıkılığa sahip 150 kPa çevre basıncı altındaki numunede ise aşırı boşluk suyu basıncında ciddi bir düşüş yaşanmış statik sıvılaşmaya karşı büyük bir direnç artışı yaşandığı belirlenmiştir.
- ✓ %4 ve %5 oranlarında sepiyolit yaklaşık %20-%25 civarlarında aşırı boşluk suyu basıncında azalmaya neden olurken optimum katkı oranı olarak belirlenen %7 sepiyolitli numunelerde aşırı boşluk suyu basıncında %50 oranında azalma görülmüştür.
- ✓ Sepiyolit katkısı hafif ve çok ince bir kil minerali olması nedeniyle tamamen sıvılaşmayı engellese dahi boşluk oranını artırmıştır ve numuneler de dayanım düşüşüne neden olmuştur.
- ✓ Genel olarak pik dayanımlarda düşüşü görülse dahi en yüksek kalıcı dayanımları boşluk suyu basıncında yarattığı etki sayesinde yine de %7 sepiyolitli numuneler vermiştir.

Bu deneysel çalışmanın ana konusunu oluşturan temiz kumların monotonik yüklemeler altındaki davranışına silt ve sepiyolitin etkisi incelendiğinde, silt içeriğinin statik sıvılaşma potansiyelini artırdığı ve sepiyolitin ise azalttığı tespit edilmiştir. Sepiyolit ucuz ve çevre dostu bir katkı olarak kum zeminlerin sıvılaşmasını engellemek amacıyla kullanılabilir. Sepiyolit kullanılmış kum zeminler üzerinde dinamik üç eksenli deneyleri

yapılarak katkının dinamik davranışa etkisi de gözlenmeli ve sadece boşluk suyu basıncı açısından değil, birim kayma deformasyonları ve sönüm oranı gibi parametrelerde incelenerek çalışmalar zenginleştirilmelidir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Anonim, 2022, Zeminde Sıvılaşma Nedir, https://www.movea.com.tr/zeminde-sivilasma-nedir/, erişim tarihi: 06.02.2022.

Alarcon-Guzman, A., Leonards, G. A., ve Chameau, J. L. (1988). Undrained monotonic and cyclic strength of sands. *Journal of Geotechnical Engineering*, *114*(10), 1089-1109.

Andresen, A., ve Bjerrum, L. (1968). Slides in subaqueous slopes in loose sand and silt. *Norwegian Geotechnical Institute Publ*.

ASTM D422 (2005). Standard test method for particle-size analysis of soils, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA

ASTM D854 (2005). Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer, American Society for Testing and Materials, West

ASTM D4767 (2011). Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA

Aytekin, M. (2018). Sepiyolit içeren çimento esaslı bağlayıcılarla üretilen harçların işlenebilirlik, dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin araştırılması. *Y. Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kilis*, *7*.

Bjerrum, L. (1971). Subaqueous slope failures in Norwegian fjords. *Norwegian Geotechnical Institute Publ*, (88).

Can, G., 1992. Dünya'da ve Türkiye'de Sepiyolitik Kil. MTA, Ankara.

Castro. (1969). Liquefaction of Sands. (Doktora Tezi) Harvard Üniversitesi, Cambridge Massachusetts.

Casagrande, A. [1975]. "Liquefaction and Cyclic Deformation of Sands- A critical Review," Proceedings, 5th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Buenos Aires, Argentina; also published as Harvard Soil Mechanics Series No. B8, January 1976, Cambridge, Mass

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Castro, G. (1975). Liquefaction and cyclic mobility of saturated sands. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, *101*(6), 551-569.

Castro, G., ve Poulos, S. J. (1977). Factors affecting liquefaction and cyclic mobility. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, *103*(6), 501-516.

Castro, G. (1987). On the behavior of soils during earthquakes–liquefaction. In *Developments in geotechnical engineering* (Vol. 42, pp. 169-204). Elsevier.

El Mohtar, C. S., Bobet, A., Santagata, M. C., Drnevich, V. P., ve Johnston, C. T. (2013). Liquefaction mitigation using bentonite suspensions. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, *139*(8), 1369-1380.

Etminan, E. (2016).Effects of Gradation, Fines Content and Silt Shape Characteristics on Static Liquefaction of Loose Sands. (Doktora Tezi)

Hanzawa, H., Itoh, Y., ve Suzuki, K. (1979). Shear characteristics of a quick sand in the Arabian Gulf. *Soils and Foundations*, *19*(4), 1-15

Holtz, R. D., Kovacs, W. D., ve Sheahan, T. C. (1981). An introduction to geotechnical engineering (Vol. 733). Englewood Cliffs: Prentice-Hall

Ishihara, K. (1993). Liquefaction and flow failure during earthquakes. *Geotechnique*, *43*(3), 351-451.

Konrad, J. M. (1993). Undrained response of loosely compacted sands during monotonic and cyclic compression tests. *Géotechnique*, *43*(1), 69-89.

Jefferies, M., ve Been, K. (2019). *Soil liquefaction: a critical state approach*. CRC press.

Kramer, S. L., ve Seed, H. B. (1988). Initiation of soil liquefaction under static loading conditions. *Journal of Geotechnical Engineering*, *114*(4), 412-430.

Kramer, S.L., 1996, Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice Hall, New Jersey, p. 348-422.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Kuerbis, R., Negussey, D., ve Vaid, Y. P. (1988). Effect of gradation and fines content on the undrained response of sand. *Geotechnical special publication*, (21), 330-345.

Lade, P. V. (1993). Initiation of static instability in the submarine Nerlerk berm. *Canadian Geotechnical Journal*, *30*(6), 895-904.

Lade, P. V., ve Yamamuro, J. A. (1997). Effects of nonplastic fines on static liquefaction of sands. *Canadian Geotechnical Journal*, *34*(6), 918-928.

Lade, P. V., Liggio, C. D., ve Yamamuro, J. A. (1998). Effects of non-plastic fines on minimum and maximum void ratios of sand. *Geotechnical testing journal*, *21*, 336-347.K.,

Lade, P. V., ve Yamamuro, J. A. (2011). Evaluation of static liquefaction potential of silty sand slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, *48*(2), 247-264.Mitchell, J. K., ve Arulanandan, K. (1977). Effects of sample preparation on sand liquefaction. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, *103*(2), 91-108.

Lambert, E., Chabut, B., Chardon-Noblat, S., Deronzier, A., Chottard, G., Bousseksou, A., ... & Latour, J. M. (1997). Synthesis, structural, magnetic, and redox properties of asymmetric diiron complexes with a single terminally bound phenolate ligand. Relevance to the purple acid phosphatase enzymes. *Journal of the American Chemical Society*, *119*(40), 9424-9437.

Middlebrooks, T. A. (1942). Fort peck slide. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, *107*(1), 723-742.

Mulilis, J. P., Seed, H. B., Chan, C. K., Mitchell, J. K., & Arulanandan, K. (1977). Effects of sample preparation on sand liquefaction. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, *103*(2), 91-108.

Peck, R. B., ve Kaun, W. V. (1948). Description of a flow slide in loose sand. In Proceedings of the 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rotterdam (Vol. 2, pp. 31-33).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Rahman, M. M., & Lo, S. R. (2014). Undrained behavior of sand-fines mixtures and their state parameter. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, *140*(7), 04014036.

Sabah, E., ve Çelik, M. S. (1999). Sepiyolit: Özellikleri ve Kullanım Alanları. 3. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, 14-15.

Sabbar, A. S., Chegenizadeh, A., ve Nikraz, H. (2017). Static liquefaction of very loose sand–slag–bentonite mixtures. *Soils and Foundations*, *57*(3), 341-356.

Skempton, A. W. (1964). Long-term stability of clay slopes. *Geotechnique*, *14*(2), 77-102.

Sladen, J. A., D'hollander, R. D., ve Krahn, J. (1985). The liquefaction of sands, a collapse surface approach. *Canadian geotechnical journal*, *22*(4), 564-578.

Vaid, Y. P., ve Chern, J. C. (1985, October). Cyclic and monotonic undrained response of saturated sands. In *Advances in the art of testing soils under cyclic conditions* (pp. 120-147). ASCE.

Troncoso, J., Ishihara, K., ve Verdugo, R. (1988). Aging effects on cyclic shear strength of tailings materials. In *Proc., Ninth World Conference on Earthquake Engineering* (Vol. 3, pp. 2-9).

Yamamuro, J. A., ve Lade, P. V. (1997). Static liquefaction of very loose sands. *Canadian Geotechnical Journal*, *34*(6), 905-917.

Youd, T. L. (1973). *Liquefaction, flow, and associated ground failure* (No. 688). US Geological Survey.

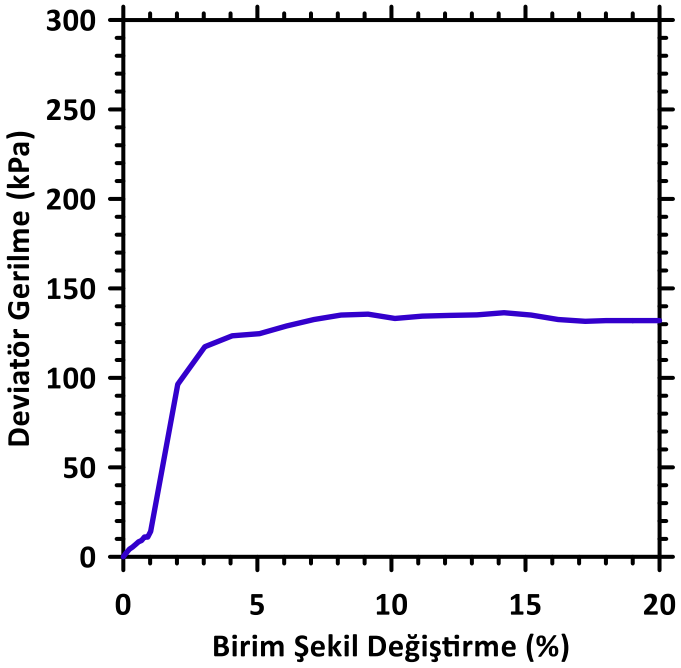
EK AÇIKLAMALAR

Sayfa

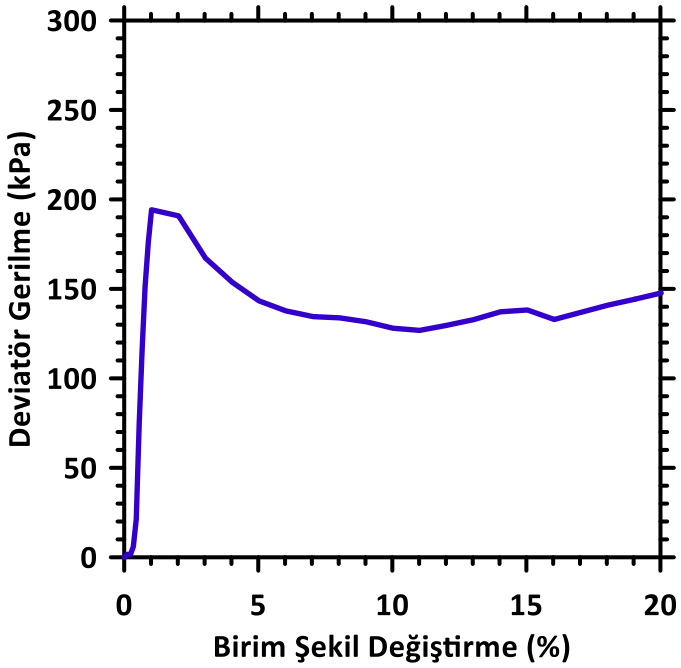
Ek Açıklama-A: Kullanılan Numunelerin Deviatör Gerilme-Şekil Değiştirme Grafikleri…….. 71

Ek Açıklama-B: Deneylerin Yapılışına Ait Fotoğraflar.....82

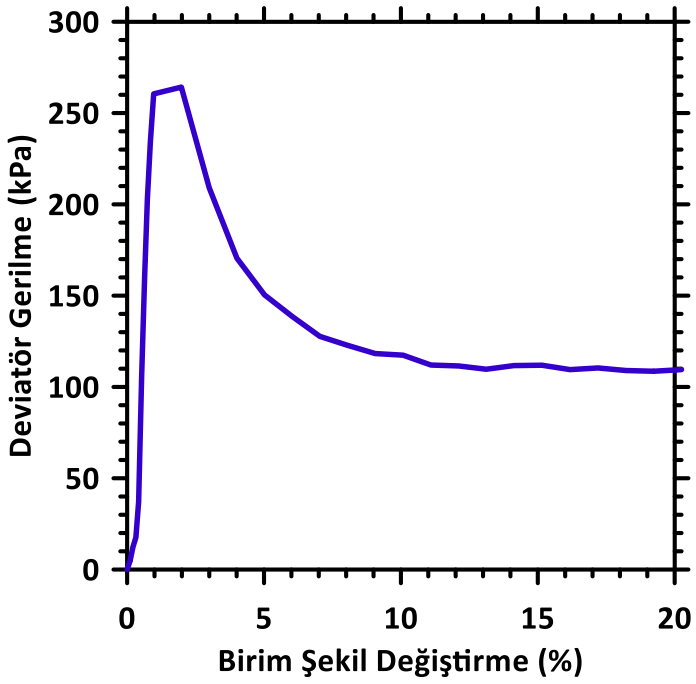
Ek Açıklama-A: Kullanılan Numunelerin Deviatör Gerilme- Şekil Değiştirme Grafikleri



a)

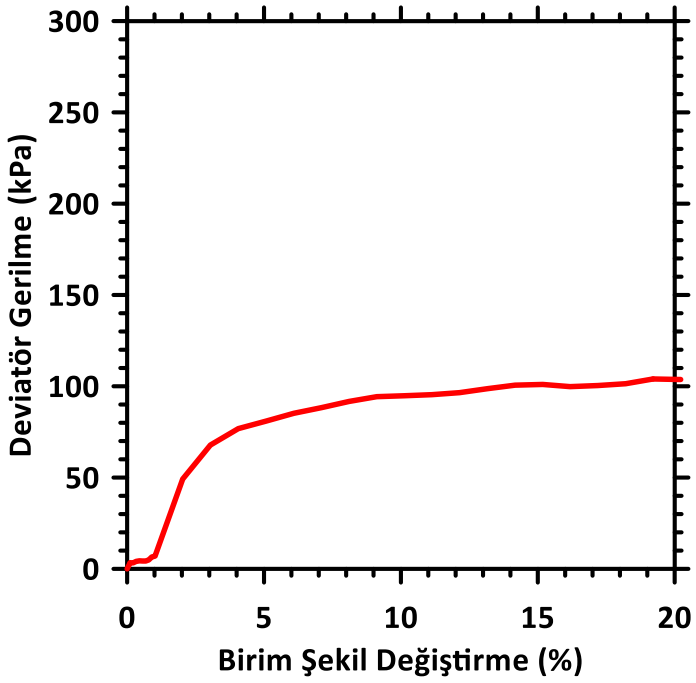


b)

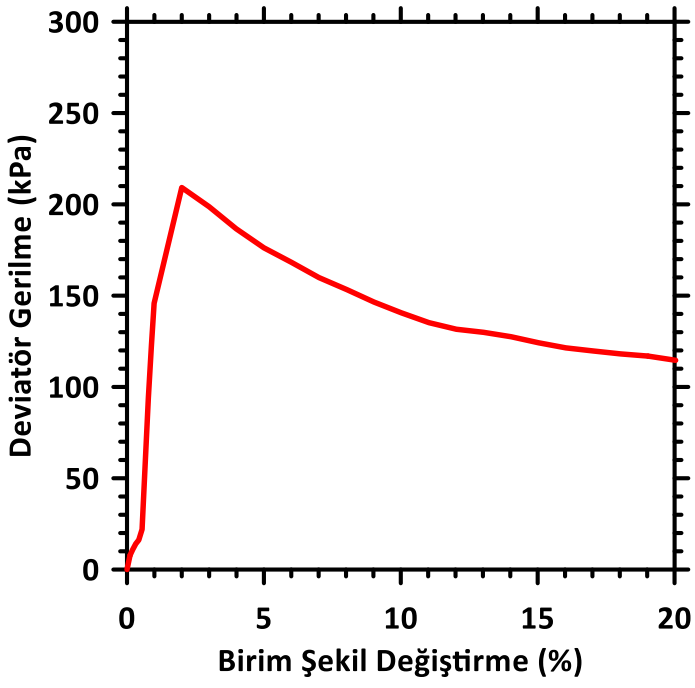


c)

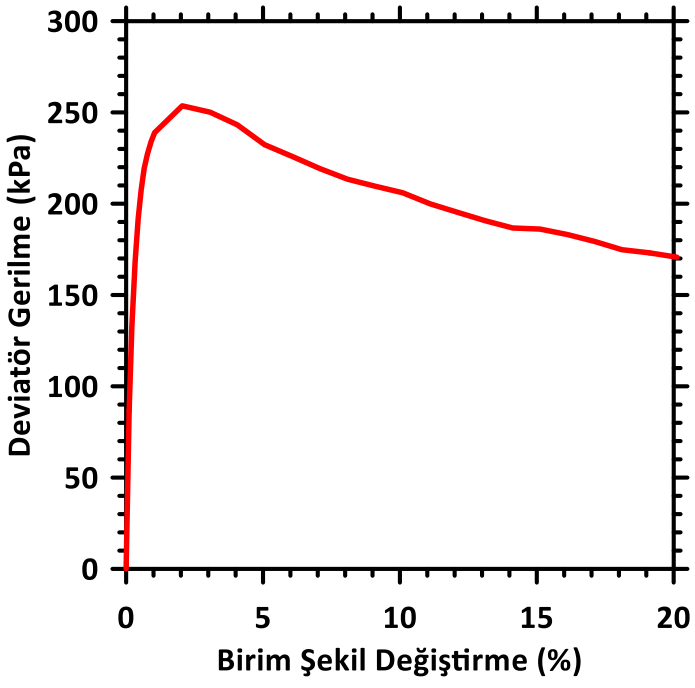
Şekil A.1. %10 göreceli sıkılıktaki temiz kum numunesinin deviatör gerilme – şekil değiştirme grafikleri a) 50 kPa b) 100 kPa c) 150 kPa çevre basınçları altında



a)

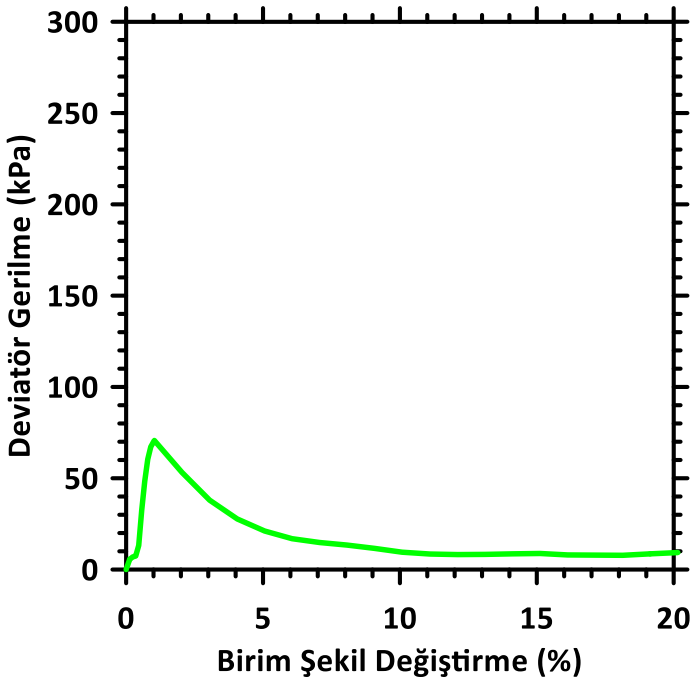


b)

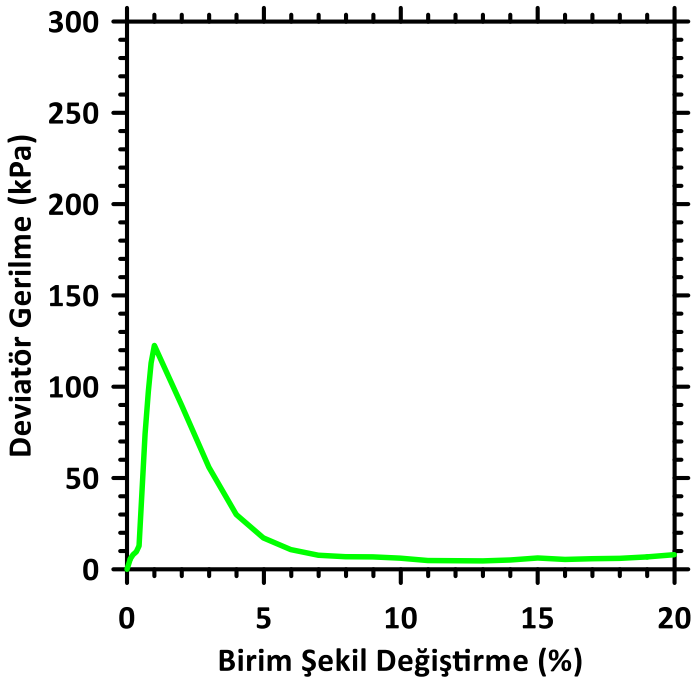


c)

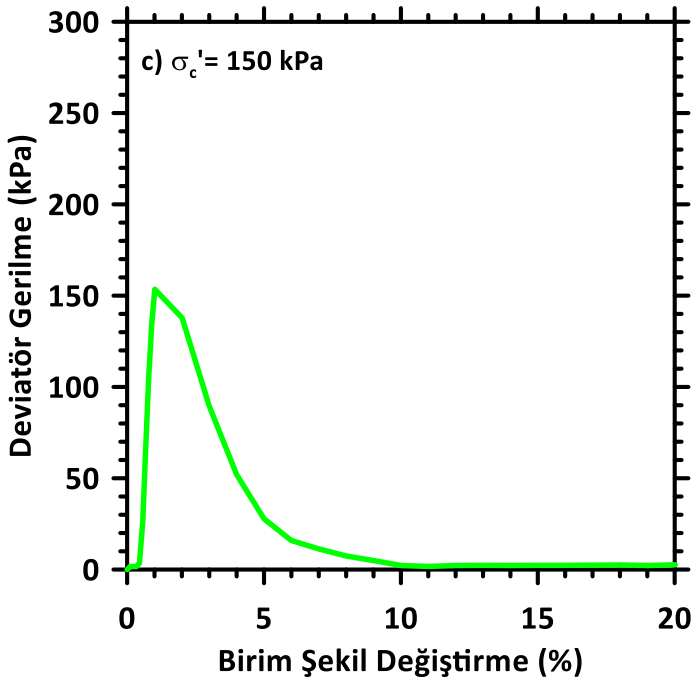
Şekil A.2. %10 göreceli sıkılıktaki %6 siltli temiz kum numunesinin deviatör gerilme – şekil değiştirme grafikleri a) 50 kPa b) 100 kPa c) 150 kPa çevre basınçları altında


Deviatör Gerilme (kPa)
300
250
200
150
100
50
0
0
5
10
15
20
Birim Şekil Değiştirme (%)

a)

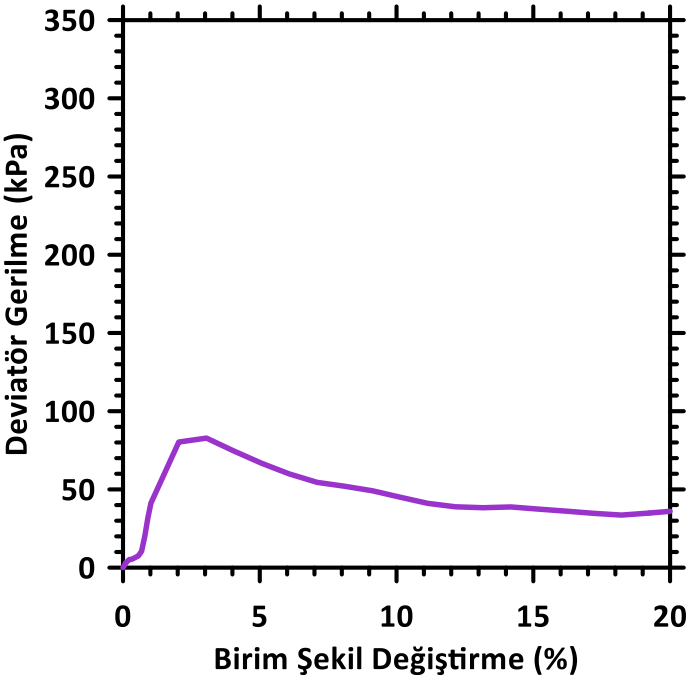

Deviatör Gerilme (kPa)
300
250
200
150
100
50
0
0
5
10
15
20
Birim Şekil Değiştirme (%)

b)

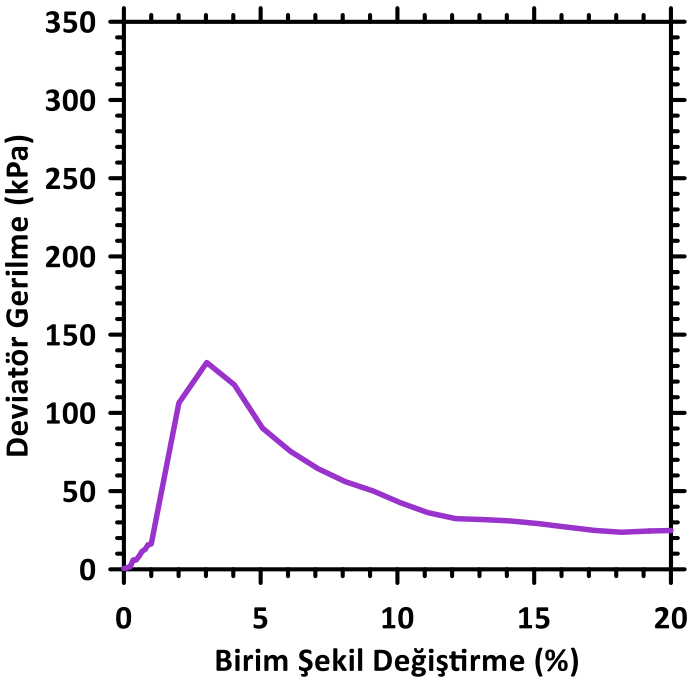


c)

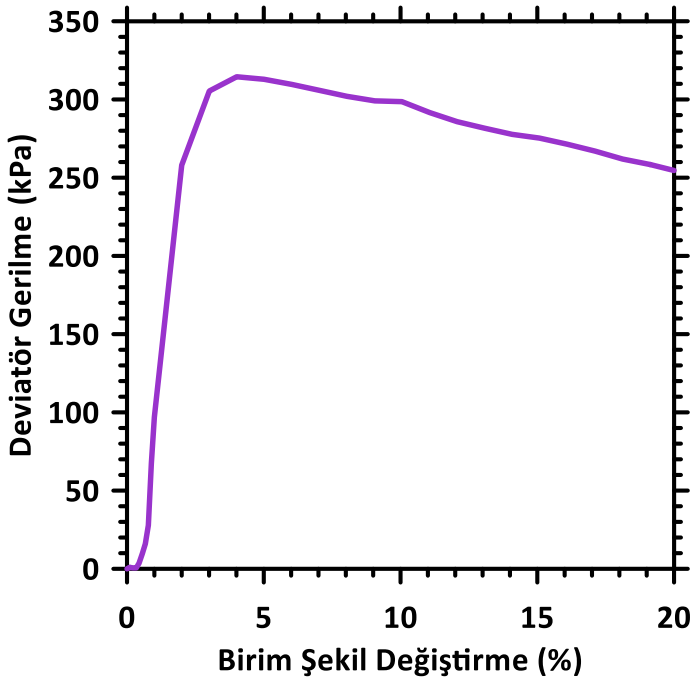
Şekil A.3. %10 göreceli sıkılıktaki %12 siltli temiz kum numunesinin deviatör gerilme – şekil değiştirme grafikleri a) 50 kPa b) 100 kPa c) 150 kPa çevre basınçları altında



a)

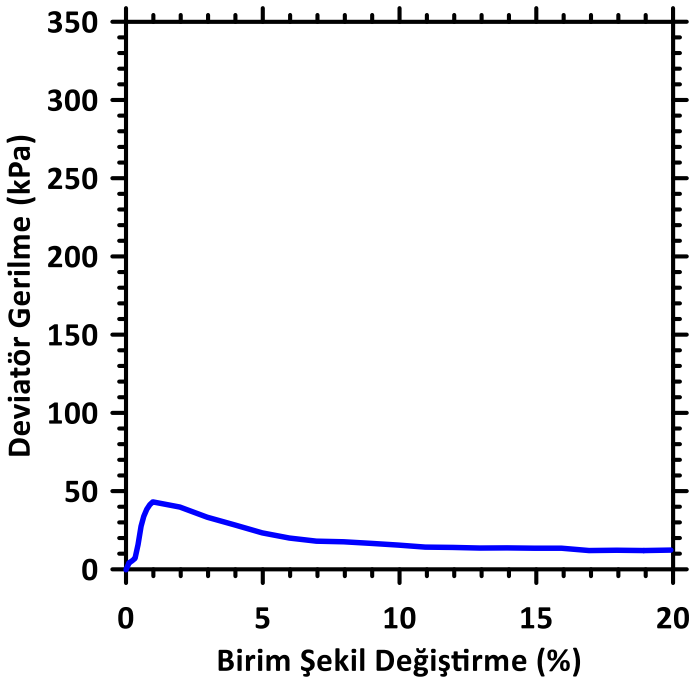


b)

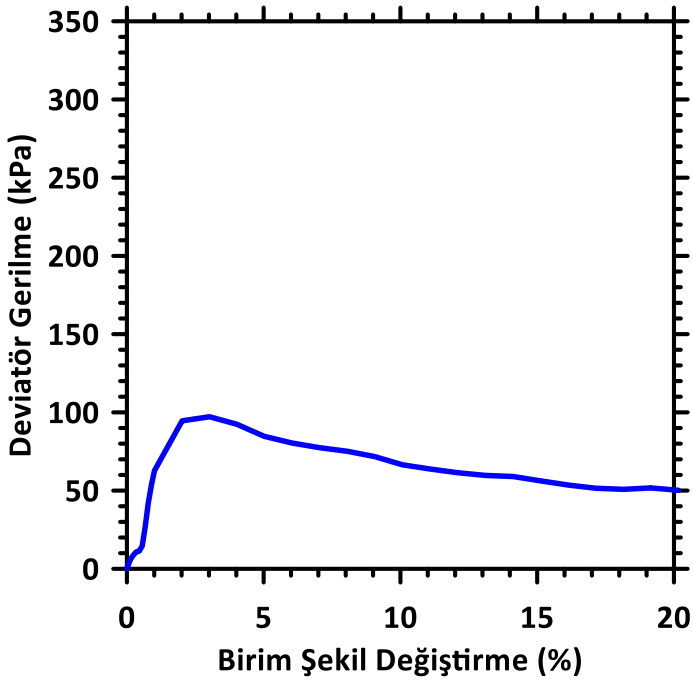


c)

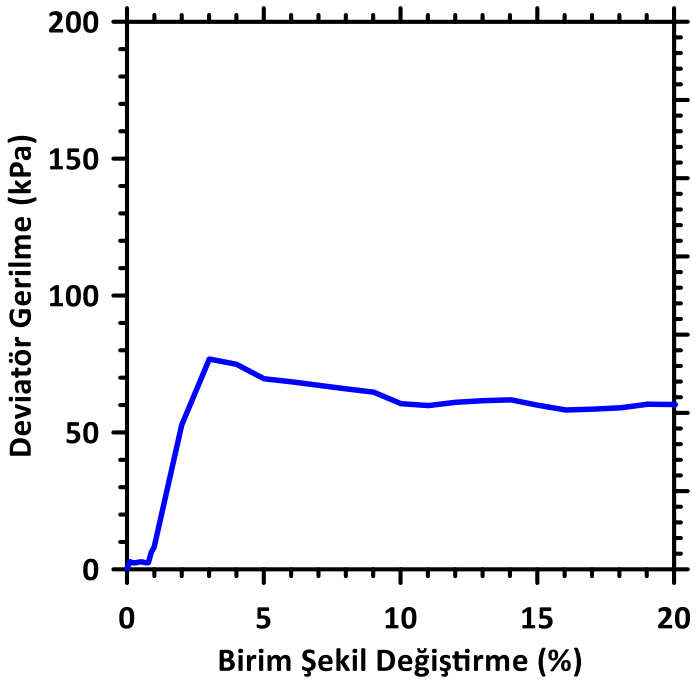
Şekil A.4. %20 göreceli sıkılıktaki %12 siltli temiz kum numunesinin deviatör gerilme – şekil değiştirme grafikleri a) 50 kPa b) 100 kPa c) 150 kPa çevre basınçları altında


Deviatör Gerilme (kPa)
350
300
250
200
150
100
50
0
0
5
10
15
20
Birim Şekil Değiştirme (%)

a)

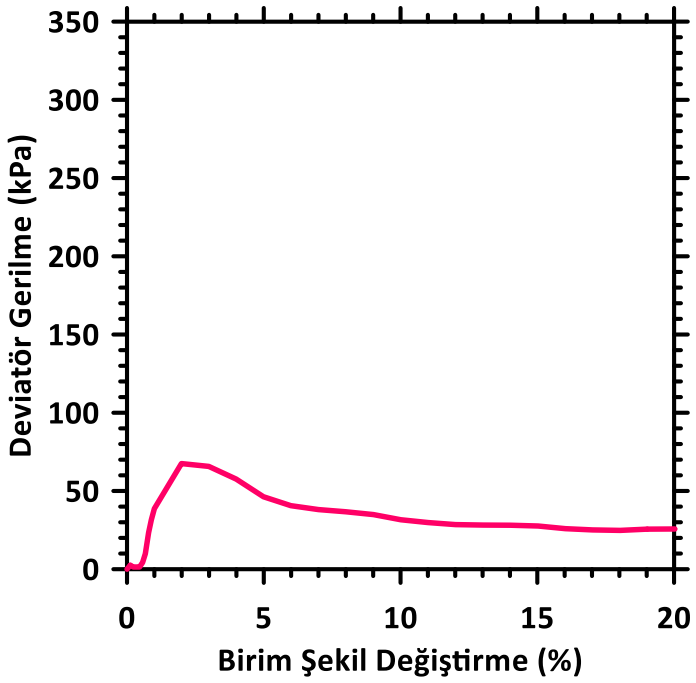

Deviatör Gerilme (kPa)
350
300
250
200
150
100
50
0
0
5
10
15
20
Birim Şekil Değiştirme (%)

b)



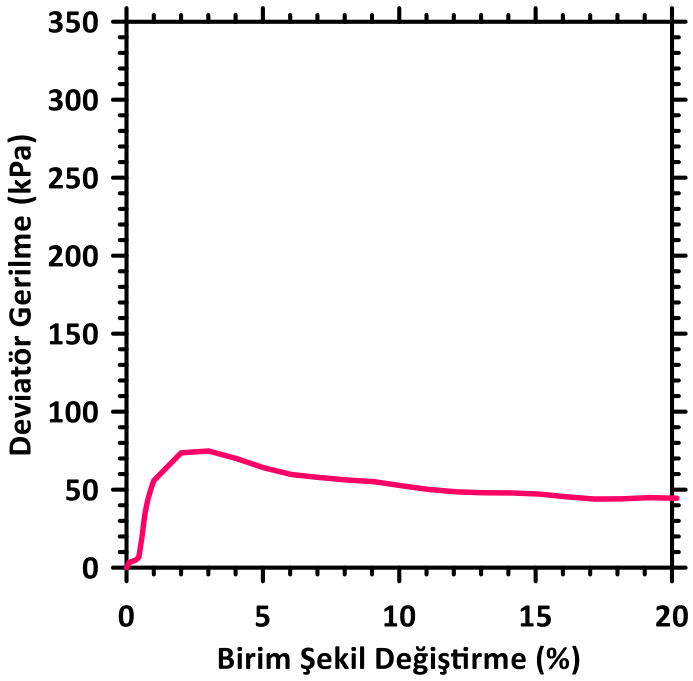
c)

Şekil A.5. %10 göreceli sıkılıktaki %4 sepiyolitli siltli temiz kum numunesinin deviatör gerilme – şekil değiştirme grafikleri a) 50 kPa b) 100 kPa c) 150 kPa çevre basınçları altında

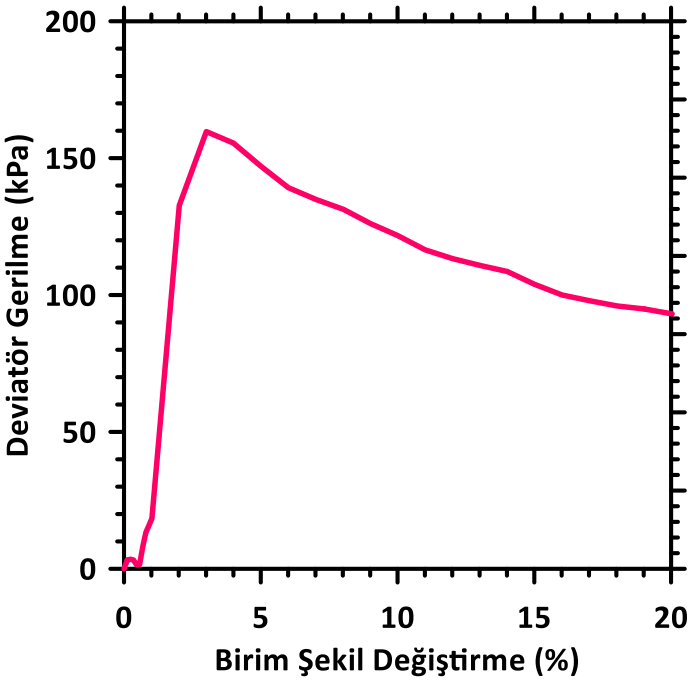


a)

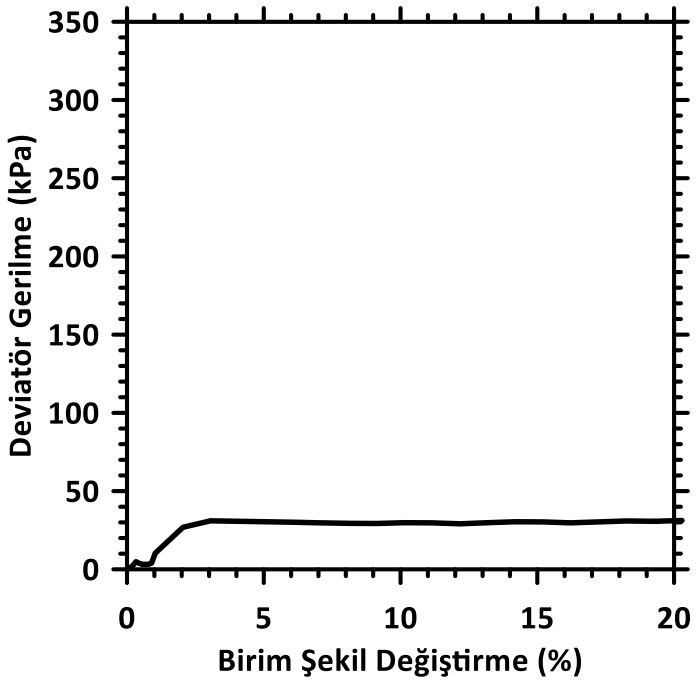
b)



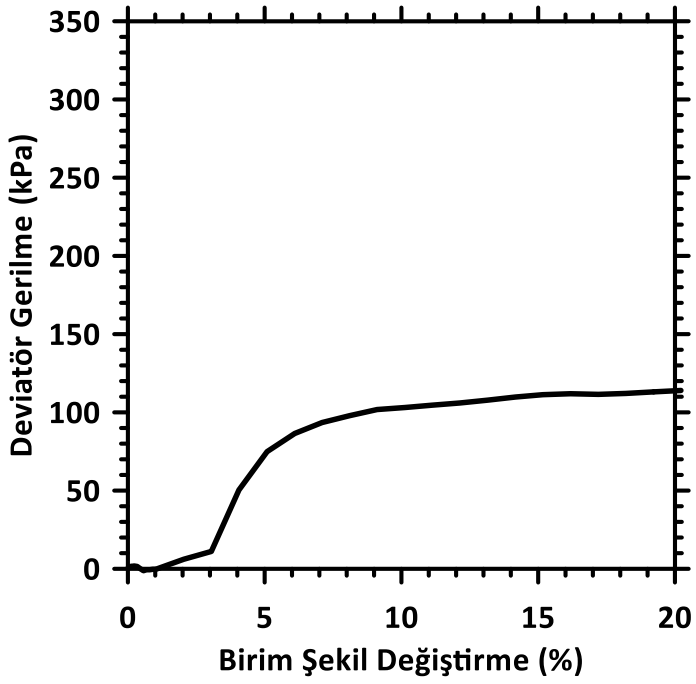
c)



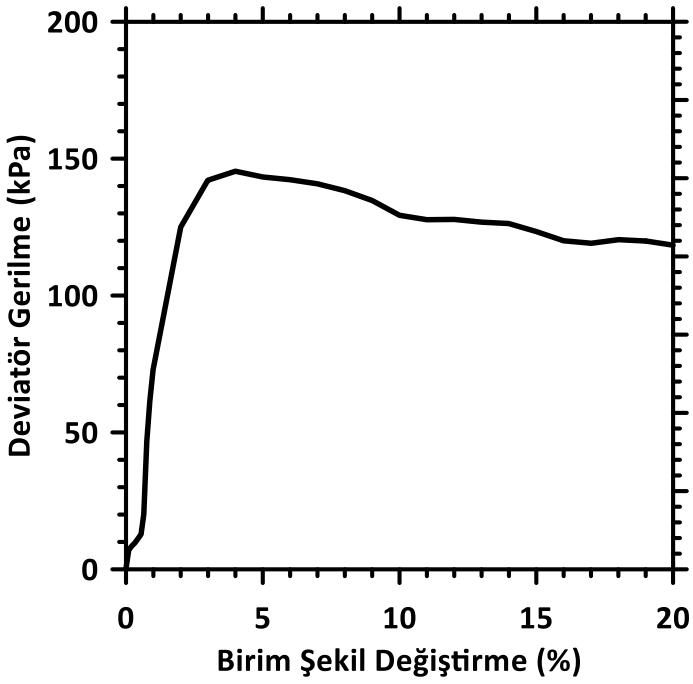
Şekil A.6. %10 göreceli sıkılıktaki %5 sepiyolitli siltli temiz kum numunesinin deviatör gerilme – şekil değiştirme grafikleri a) 50 kPa b) 100 kPa c) 150 kPa çevre basınçları altında


Deviatör Gerilme (kPa)
350
300
250
200
150
100
50
0
0
5
10
15
20
Birim Şekil Değiştirme (%)

a)


Deviatör Gerilme (kPa)
350
300
250
200
150
100
50
0
0
5
10
15
20
Birim Şekil Değiştirme (%)

b)



c)

Şekil A.7. %10 göreceli sıkılıktaki %7 sepiyolitli siltli temiz kum numunesinin deviatör gerilme – şekil değiştirme grafikleri a) 50 kPa b) 100 kPa c) 150 kPa çevre basınçları altında

Ek Açıklama-B: Deneylerin Yapılışına Ait Fotoğraflar



Şekil B.1. Nemli tokmaklama işlemi için hazırlanan %5 su içeriğine sahip numune



Şekil B.2. Deney için kullanılan yardımcı malzemeler



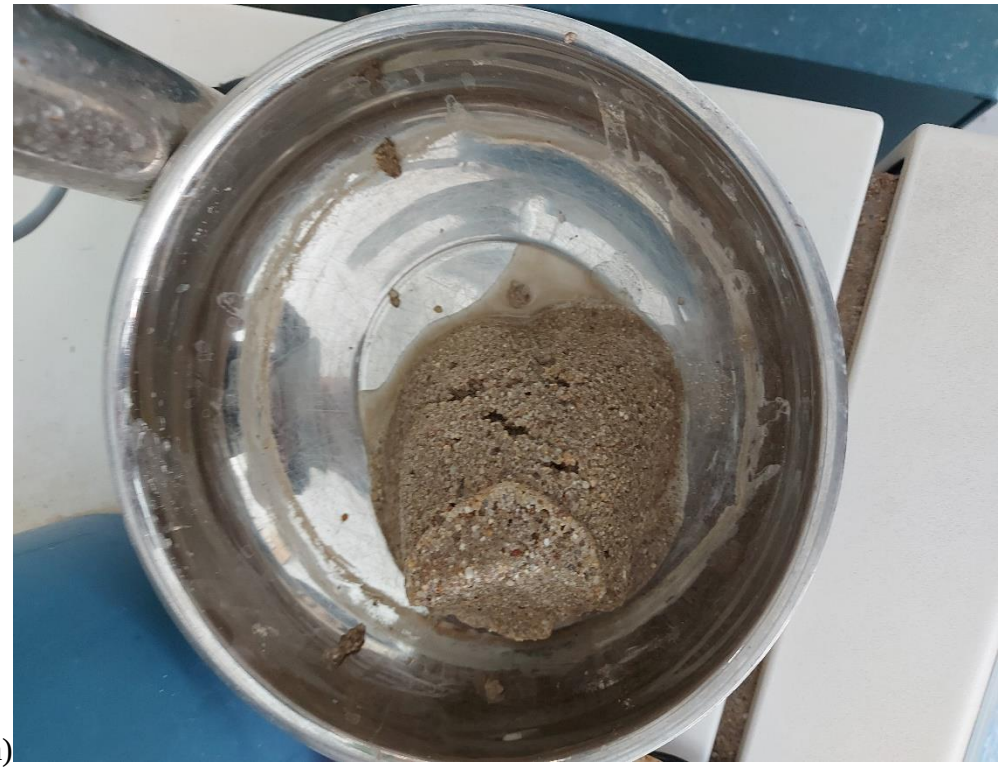
Şekil B.3. Numunenin doygunluk aşaması esnasındaki fotoğrafı



Şekil B.5. Tamamen sıvılaşan numunenin deney sonu fotoğrafı



Şekil B.6. Geçici sıvılaşma yaşanan numunenin deney sonu fotoğrafı

a) 

b) 

Şekil B.7. Deney sonu numuneler a) sıvılaşma gerçekleşen b) sıvılaşma gerçekleşmeyen