



TC  
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

ŞİŞEN ZEMİNLERİN PLASTİK ATIK MALZEMELER İLE  
STABİLİZASYONU

Yüksek Lisans Tezi

**Duaa BABAT**

Danışman  
**Doç. Dr. Gökhan DEMİR**

SAMSUN  
2022

TC  
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



ŞİŞEN ZEMİNLERİN PLASTİK ATIK MALZEMELER İLE  
STABİLİZASYONU

Yüksek Lisans Tezi

**Duaa BABAT**

Danışman  
**Doç. Dr. Gökhan DEMİR**

SAMSUN  
2022

## BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Hazırladığım Yüksek Lisans tezinin bütün aşamalarında bilimsel etiğe ve akademik kurallara riayet ettiğimi, çalışmada doğrudan veya dolaylı olarak kullandığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin Kaynaklar'da gösterilenlerden oluştuğunu, her unsurun enstitü yazım kılavuzuna uygun yazıldığını ve TÜBİTAK Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu Yönetmeliği'nin 3. bölüm 9. maddesinde belirtilen durumlara aykırı davranılmadığını taahhüt ve beyan ederim.

Etik Kurul Gerekli mi ?

Evet

Hayır

İmza  
28/04/2022  
Duaa BABAT

## TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

**Tez Başlığı :** ŞİŞEN ZEMİNLERİN PLASTİK ATIK MALZEMELER İLE STABİLİZASYONU.

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 14/12/2021 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : % 19

Tek kaynak oranı : % 3 çıkmıştır.

İmza  
28/04/2022  
Doç. Dr. Gökhan DEMİR

## ÖZET

### ŞİŞEN ZEMİNLERİN PLASTİK ATIK MALZEMELER İLE STABİLİZASYONU

Duaa BABAT

Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Yüksek Lisans, Ocak/2022

Danışman: Doç. Dr. Gökhan DEMİR

Ekonomik büyüme, değişen tüketim ve üretim modelleri nedeniyle tüm dünyada atık plastik üretiminde hızlı bir artış göstermektedir. Plastik ambalaj, alışveriş poşetleri, şişeler ve plastiğin ana bileşen olarak kullanıldığı ürünlerin artması nedeniyle ekonomik büyümenin düşük olduğu şehirler bile daha fazla plastik atık üretmeye başlamıştır. Bu durumdan dolayı çevreye verilen zararların artmasının yanı sıra insanların bunun farkında olmamaları durumu daha da kötüleştirmektedir. Çevre dostu olarak plastik atıkların geri dönüşümü sağlanmalı, toplanıp bertaraf edilmeli ve toplanan plastik atıklar faydalı, farklı bir enerji kaynağına dönüştürülmelidir.

Günümüzde, atıklar zeminlerin iyileştirilmesinde alternatif bir katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır ve problemlili zeminlerin iyileştirilmesinde daha ekonomik bir çözüm olabilmektedir. Bu çalışmanın amacı plastik atığın zemin iyileştirmesinde kullanımının incelenmesidir. İnceleme bölgesinden alınan kil numunelerine ağırlıkça %0.25, %0.50 ve %0.75 oranlarında plastik atık katılmıştır. Ardından numuneler üzerinde elek analizi deneyleri, kıvam limitleri deneyleri, standart proktor deneyleri, şişme deneyleri ve serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Deneylerden elde edilen sonuçlara göre, katkı oranı arttıkça karışımların şişme yüzdesinin azaldığı ve %0.5 plastik atık katıldığında şişme yüzdesinde %315.42 oranında düşüş gerçekleştiği tespit edilmiştir. Optimum su muhtevasında hazırlanan doğal kil numunesi üzerinde yapılan şişme deneyleri sonucunda, kilin şişme basıncı değeri 693,24 kPa olarak belirlenmiştir. Katkı oranı arttıkça şişme basıncının azaldığı ve %0.5 plastik atık katıldığında bu değer 402,07 kPa değerine düşerek %72.42 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Yapılan mukavemet deneyleri sonucunda, %0.5 plastik atık katkısı ile kilin serbest basınç mukavemetinin %105.67 arttığı tespit edilmiştir.

Tez sonuçları göz önüne alınarak, kullanılan katkı maddesi olan plastik atığının problemlili zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılması özellikle düşük mukavemetli ve şişme potansiyeline sahip zeminlerde fayda sağlayacağı belirlenmiştir.

**Anahtar Sözcükler:** Şişen Zeminler, Şişen Zemin Stabilizasyonu, Şişme Basıncı, Şişme Yüzdesi, Plastik Atık.

## ABSTRACT

### STABILIZATION OF SWELLING SOILS BY WASTE PLASTIC MATERIALS

Duaa BABAT

Ondokuz Mayıs University

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Master, January/2022

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Gökhan DEMİR

Due to economic growth, changing consumption and production patterns, there is a rapid increase in waste plastic production all over the world. Even cities with low economic growth have started to generate more plastic waste, due to the rise of plastic packaging, shopping bags, bottles and products that use plastic as the main component. Due to this situation, besides the increase in the damage to the environment, the fact that people are not aware of it makes the situation worse. Plastic waste should be recycled in an environmentally friendly manner, collected and disposed of, and the collected plastic waste should be transformed into a useful and different energy source.

Today, wastes are used as an alternative additive material in the improvement of soils and can be a more economical solution for the improvement of problematic soils. The aim of this study is to examine the use of plastic waste in soil improvement. Plastic waste was added to the clay samples taken from the study area at the rates of 0.25%, 0.50% and 0.75% by weight. Then, sieve analysis tests, consistency limits tests, standard proctor tests, swelling tests and unconfined pressure tests were performed on the samples.

According to the results obtained from the experiments, it was determined that as the additive ratio increased, the swelling percentage of the mixtures decreased and when 0.5% plastic waste was added, the swelling percentage decreased by 315.42%. As a result of the swelling tests performed on the natural clay sample prepared at optimum water content, the swelling pressure value of the clay was determined as 693.24 kPa. It was determined that as the additive ratio increased, the swelling pressure decreased and when 0.5% plastic waste was added, this value decreased to 402.07 kPa and decreased by 72.42%. As a result of the strength tests, it was determined that the unconfined compressive strength of the clay increased by 105.67% with 0.5% plastic waste additive.

Considering the results of the thesis, it has been determined that the use of plastic waste, which is the additive used, in the improvement of problematic soils will be beneficial especially in soils with low strength and swelling potential.

**Keywords:** Swelling Soils, Soil Stabilization, Swelling Pressure, Swelling Percentage, Plastic Waste.

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimimde ders aşamasından tez aşamama kadar bana yardımcı olan, desteğini esirgemeyen ve çalışma azmimi artıran değerli hocam Doç. Dr. Gökhan DEMİR'e teşekkür eder ve saygı ve minnet duyarım.

Tüm eğitim hayatım boyunca bana hoşgörülü, merhametli ve sabırlı davranan ve her zaman yanımda olan anneme, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen babama, ablama ve kız kardeşlerime sevgilerimi sunar minnettarlığımı bildiririm. Ayrıca bu süreçte desteğini, güvenini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili eşim Adeeb BABAT'a çok teşekkür ederim.

Duaa BABAT

## İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL VE ONAYI .....	i
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI.....	ii
TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI.....	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
TABLolar DİZİNİ.....	xiv
<b>1. GENEL BİLGİLER.....</b>	<b>1</b>
1.1. Giriş.....	1
1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı .....	2
1.3. Kil Mineralleri.....	3
1.3.1. Kil Minerallerinin Zeminlerin Mühendislik Özelliklerine Etkisi .....	10
1.4. Şişen Zeminler .....	12
1.4.1. Şişen Zeminlerin Belirlenmesi.....	13
1.4.1.1. Mineralojik Belirleme .....	13
1.4.1.2. USBR Sınıflandırma Sistemi .....	14
1.4.1.3. Aktivite Yöntemi.....	14
1.4.1.4. PVC Yöntemi .....	16
1.4.1.5. Kıvam Limitleri ile Belirleme .....	17
1.4.1.6. Endeks Özellikleri ile Belirleme .....	18
1.4.1.7. Laboratuvar Deneyleri ile Belirleme.....	18
1.4.1.7.1. Ödometre Yöntemi ile Belirleme .....	18
1.4.1.7.2. Serbest Şişme Deneyi ile Belirleme .....	20
1.5. Zemin Stabilizasyonu.....	21
1.5.1. Şişen Zeminlerin Stabilizasyon Teknikleri .....	25
1.5.1.1. Mekanik Stabilizasyon .....	26
1.5.1.1.1. Şişen Zemin Kaldırma ve Yer Değiştirme.....	26
1.5.1.1.2. Kompaksiyonun Kontrol Edilmesi.....	26
1.5.1.1.3. Ön Islatma .....	26
1.5.1.1.4. Su Muhtevası Kontrolü .....	27
1.5.1.2. Kimyasal Stabilizasyon .....	27
1.6. Literatür Özeti .....	28
<b>2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....</b>	<b>41</b>
2.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemelerin Özellikleri.....	41
2.1.1. Şişen Kil Zemin .....	41
2.1.1.1. Zeminin Sınıflandırılması .....	43
2.1.1.2. Kıvam Limitleri.....	45

2.1.1.3. Kompaksiyon Özellikleri .....	47
2.1.2. Plastik Atık.....	49
2.2. Katkılı Numunelerin Hazırlanması .....	50
2.2.1. Zemin Karışımlarının Şişme Parametrelerinin Belirlenmesi .....	51
2.2.2. Zemin Karışımlarının Serbest Basınç Mukavemetlerinin Belirlenmesi .....	54
<b>3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....</b>	<b>56</b>
3.1. Katkı Malzemelerinin Şişme Parametrelerine Etkisi .....	56
3.2. Katkı Malzemelerinin Dayanım Üzerindeki Etkisi.....	59
<b>4. SONUÇLAR.....</b>	<b>64</b>
<b>5. ÖNERİLER.....</b>	<b>66</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>67</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>71</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>73</b>

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$\sigma$	: Gerilme
$\epsilon$	: Deformasyon
$\omega$	: Su muhtevası
$\omega_{opt}$	: Optimum su muhtevası
$\epsilon_v$	: Eksenel Birim Şekil Değiştirme
$\gamma_k$	: Kuru birim hacim ağırlığı
$\gamma_{kmak}$	: Maksimum kuru birim hacim ağırlığı
<b>H</b>	: Örnek kalınlığı
<b>S</b>	: Şişme yüzdesi
<b>H<sub>0</sub></b>	: Örneğin başlangıç yüksekliği
<b>H<sub>1</sub></b>	: Örneğin şişme sonrasındaki yüksekliği
<b>M<sub>w</sub></b>	: Su kütlesi
<b>M<sub>s</sub></b>	: Kuru zemin kütlesi
<b>q<sub>u</sub></b>	: Serbest basınç dayanımı
<b>e</b>	: Boşluk oranı
<b>°C</b>	: Santigrat derece
<b>c</b>	: Kohezyon
$\phi$	: İçsel sürtünme açısı
<b>C<sub>c</sub></b>	: Sıkışma indisi
<b>C<sub>s</sub></b>	: Kabarma katsayısı
<b>M<sub>v</sub></b>	: Hacimsel sıkışma katsayısı
<b>kPa</b>	: Kilopascal
<b>mm</b>	: Milimetre

### Kısaltmalar

<b>LL</b>	: Likit limit
<b>PL</b>	: Plastik limit
<b>PI</b>	: Plastisite indisi
<b>PA</b>	: Plastik Atık
<b>CH</b>	: Yüksek plastisiteli kil
<b>CL</b>	: Düşük plastisiteli inorganik kil
<b>ML</b>	: İnorganik silt, az plastik siltli veya killi ince kumlar
<b>MDD</b>	: Maksimum kuru yoğunluk

<b>OWC</b>	: Optimum su muhtevası
<b>CBR</b>	: Kaliforniya Taşıma Oranı
<b>TSE</b>	: Türk Standartları Enstitüsü
<b>USCS</b>	: Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi
<b>TS 1900-1</b>	: İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri – Fiziksel Özelliklerin Tayini
<b>TS 1900-2</b>	: İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri – Mekanik Özelliklerin Tayini
<b>ASTM D4546</b>	: Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading
<b>KDK</b>	: Katyon Değişirme Kapasitesi
<b>HDPE</b>	: Katyon Değişirme Kapasitesi
<b>GCL</b>	: Geosentetik kil örtü

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Tetrahedral silis levhasının üç boyutlu modellemesi (Sivakugan, 2001). ....	4
Şekil 1.2. Oktahedral levhanın üç boyutlu modellemesi (Sivakugan, 2001).....	5
Şekil 1.3. Kaolinitin şematik taslağı (USCS, 2001a).....	6
Şekil 1.4. Kaolinitin şematik görünümü (Başer, 2009).....	6
Şekil 1.5. İllitin şematik taslağı (USCS, 2001b).....	7
Şekil 1.6. Kaolinitin şematik görünümü (Başer, 2009).....	7
Şekil 1.7. Montmorillonitin şematik taslağı (USCS, 2001c).....	8
Şekil 1.8. Montmorillonitin şematik görünümü (Başer, 2009).....	9
Şekil 1.9. Kloritin şematik taslağı (USCS, 2001d).....	10
Şekil 1.10. Seed ve diğerleri (1962) tarafından önerilen sınıflandırma sistemi.....	15
Şekil 1.11. Van Der Merve (1964) tarafından önerilen sınıflandırma abağı (Genç, 2009) .....	16
Şekil 1.12. Şişme indisi-potansiyel hacim değişimi ilişkisi (Lambe, 1960).....	17
Şekil 1.13. Deformasyon ve düşey gerilmesi eğrisi metot A (ASTM D4546, 2014).....	19
Şekil 1.14. Deformasyon ve düşey gerilmesi eğrisi metot B (ASTM D4546, 2014).....	19
Şekil 1.15. Zeminin deformasyon ve düşey gerilmesi eğrisi metot C (ASTM D4546, 2014).....	20
Şekil 1.16. Şişen zeminlerin kireçle iyileştirilmesi (Demir ve Kılıç, 2010).....	28
Şekil 2.1. Etüvde kurutulmuş doğal kil zemin.....	41
Şekil 2.2. Zemin numunesinin alındığı saha görüntüsü.....	41
Şekil 2.3. Zemin numunesinin alındığı alana ait yer bulduru haritası.....	42
Şekil 2.4. Elek analizinde kullanılan elekler.....	43
Şekil 2.5. Hidrometre deneyi.....	44
Şekil 2.6. Doğal zemine ait tane boyutu dağılımı eğrisi.....	44
Şekil 2.7. Likit limit ve plastik limit deney numunelerinin hazırlanması ve yapılışı .....	46
Şekil 2.8. Likit limitin belirlenmesi.....	46
Şekil 2.9. Plastisite grafiği.....	47
Şekil 2.10. Proktor deney numunelerinin hazırlanması ve deneyin yapılışı.....	48
Şekil 2.11. Doğal zemin örneğine ait kuru birim hacim ağırlık ( $\gamma_k$ ) – su içeriği (w) grafığı.....	49
Şekil 2.12. Deneyde kullanılan plastik atık.....	49
Şekil 2.13. Kil zemine plastik eklenmesi ve plastik kil zemine karıştırılması.....	51
Şekil 2.14. Şişme deney numunelerinin hazırlanması ve deneyin yapılışı.....	54
Şekil 2.15. serbest (tek eksenli) basınç deney numunelerinin hazırlanması ve deneyin yapılışı.....	55
Şekil 3.1. Örneklerin şişme basıncı değerlerindeki değişimlere ait grafik.....	57
Şekil 3.2. Örneklerin şişme yüzdesi değerlerindeki değişimlere ait grafik.....	58
Şekil 3.3. Örneklerin zamana bağlı şişme yüzdeleri.....	59
Şekil 3.4. Serbest basınç deney sonucu kırılan numuneler.....	60
Şekil 3.5. Örneklerin serbest basınç mukavemet değerlerindeki değişimlere ait grafik .....	61
Şekil 3.6. Serbest basınç deney sonucu birim şekil değiştirme-eksenel gerilme grafiği (%0 plastik katkı).....	61
Şekil 3.7. Serbest basınç deney sonucu birim şekil değiştirme-eksenel gerilme grafiği (%0.25 plastik katkı).....	62
Şekil 3.8. Serbest basınç deney sonucu birim şekil değiştirme-eksenel gerilme grafiği (%0.5 plastik katkı).....	62

Şekil 3.9. Serbest basınç deney sonucu birim şekil değiştirme-eksenel gerilme grafiği (%0.75 plastik katkıli).....	63
Ek A.1. % 100 CH numunesinin serbest basınç deneyi grafiği .....	71
Ek A.2. %99.75 CH - %0.25 PA numunesinin serbest basınç deneyi grafiği. ....	71
Ek A.3. %99.50 CH - %0.50 PA numunesinin serbest basınç deneyi grafiği. ....	72
Ek A.4. %99.25 CH - %0.75 PA numunesinin serbest basınç deneyi grafiği. ....	72



## TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1. Kil minerallerinin sınıflandırılması (Konta, 1995).....	5
Tablo 1.2. Etkili endeks özellikleri ile şişme derecesinin belirlenmesi (Holtz ve Gibbs, 1956) .....	14
Tablo 1.3. Killerin aktivite değerlerine göre sınıflandırılması (Skempton, 1953) (Öztürk, 2012).....	15
Tablo 1.4. PVC oranlarına göre şişme kriterleri (Genç, 2009) .....	16
Tablo 1.5. Zeminlerin likit limit ve plastisite indisine göre şişme derecesi (Chen, 1988) .....	17
Tablo 1.6. Plastisite indisine göre şişen zeminlerin sınıflandırılması (Chen, 1988)..	18
Tablo 1.7. Stabilizasyon yöntemleri.....	23
Tablo 2.1. MIT sınıflandırması .....	45
Tablo 2.2. Doğal zeminin MIT zemin sınıflandırma sistemlerine göre içerdiği zemin sınıflarının yüzdeleri .....	45
Tablo 2.3. Doğal zeminin kıvam limitleri.....	45
Tablo 2.4. Deneylerde kullanılan plastik atık teknik özellikleri .....	50
Tablo 2.5. Çalışmada kullanılmak üzere hazırlanan karışımların oranları .....	51
Tablo 2.6. Kil ve Plastik atık karışımlarının şişme basınçları .....	53
Tablo 2.7. Kil ve Plastik atık karışımlarının şişme yüzdeleri .....	53
Tablo 2.8. Kil ve Plastik atık karışımlarının serbest basınç deney sonuçları.....	55
Tablo 3.1. Katkı malzemelerinin zeminin şişme yüzdesi ve şişme basıncı değerlerine etkisi .....	56
Tablo 3.2. Katkısız kile göre katkılı örneklerin şişme basıncı değerlerinde meydana gelen % değişimler.....	57
Tablo 3.3. Katkısız kile göre katkılı örneklerin şişme yüzdesi değerlerinde meydana gelen % değişimler.....	58
Tablo 3.4. Katkısız kile göre katkılı örneklerin serbest basınç değerlerinde meydana gelen % değişimler.....	60

# 1. GENEL BİLGİLER

## 1.1. Giriş

Ülkemizde ve dünyada geoteknik mühendisliği uygulamalarında problemlili zeminlere sıklıkla karşılaşılmaktadır. Uygun geoteknik koşullara sahip inşaat alanları giderek azalması, artan nüfusa, teknolojinin gelişmesine ve gelişen hayat şartlarına bağlı olarak artan yapılaşma ihtiyacı, problemlili zeminlerde ıslah çalışmaları önem kazanmıştır. Problemlili zeminlerdeki yapıların inşaatı sırasında ve sonrasında karşılaşılan çeşitli sorunlar ülkemizde ve dünyada geoteknik mühendislerinin ilgi alanına giren en yaygın konulardır.

Mühendisler taşıma gücü problemlili, toplam ve farklı oturmalar, sıvılaşma, erozyon ve su sızıntıları gibi artan geoteknik sorunlarla karşılaşmaktadırlar. Bu sorunların çözümünde kullanılan bazı yöntemler şunlardır:

1. problemlili alanlardan kaçınmak
2. üstyapıyı zemin koşullarına uygun şekilde inşa etmek
3. problemlili zemini kaldırarak yerine uygun geoteknik özelliklere sahip zemin yerleştirmek
4. mevcut zemin özelliklerini ve geoteknik koşulları iyileştirmek (Hausmann, 1990).

Geoteknik sorunları özellikle de problemlili zeminler üzerinde inşa edilmesi gereken yapıların bulunduğu durumları çözmek amacı ile yapılan zemin iyileştirmesi birçok ülkede oldukça yaygındır. Ekipman, malzeme ve tasarım yöntemlerindeki yeni gelişmeler, zemin iyileştirme yöntemlerini daha etkili, verimli ve ekonomik hale getirmiştir.

Yüksek plastisiteli kil zeminler su ile karşılaştıkları durumda belirgin bir şekilde şişer ve kurduğunda ise büzülme meydana gelmesi zeminlerin üzerinde bulunan yapıların taşıma gücünü olumsuz etkilemektedir. Zeminin bu şişme ve büzülme davranışından dolayı, üzerinde kurulu farklı inşaat mühendisliği yapılarında hasarlar meydana gelir. Dolayısıyla, bu kaynaklanan hasarların önlenmesi için stabilizasyon çok

önemlidir. Stabilizasyon zeminin katkılı ya da katkısız mühendislik özelliklerini iyileştirme işlemidir.

Problemlili zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılan yöntemlerden biri de katkı malzemeleri kullanmaktır. En son yıllarda zemin iyileştirmesinde kullanılabilir farklı atık malzemeler üzerinde çalışılmış ve uygulamalar yapılmıştır. Dünyada ve ülkemizde atık malzeme olarak ortaya çıkan maddelerin büyük bir kısmı geri dönüştürülebilir malzemelerdir. Bu atık malzemelerin farklı mühendislik uygulamalarında kullanılması hem ekonomik çözümler sunmuş hem de depolama masrafları, çevre problemleri gibi olumsuz etkilerin azaltılmasında etkili olmuştur. Bu uygulamardan birisi de atık malzemelerle zemin iyileştirmesidir.

## **1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı**

Yüksek plastisiteli killerin su muhtevası arttığı zaman taşıma gücü azalmakta ve oturma potansiyeli artmaktadır. Bu tür zeminlerin iyileştirilmesi konusunda literatürde birçok çalışma vardır. Bunlardan bazıları kireç, çimento ve uçucu kül kullanarak zeminin iyileştirilmesidir. Fakat bu uygulamalar genellikle yüksek plastisiteli kilin taşıma gücünü arttırıp oturma potansiyelini azaltırken geçirimsizliğini arttırmaktadır. Geçirimsizliğin önemli olduğu durumlarda, esas görevi olan fonksiyonlarını yerine getirememektedir.

Yapılan tez çalışmasında yüksek plastisiteli kil zeminlerinin plastik atık katkısı ile zeminin mukavemet ve şişme özelliklerine etkisi incelenmiştir. Tezin amaçları aşağıda sıralanmıştır:

- Yüksek plastisiteli killi zeminlerde, zeminin iyileştirilmesi için plastik atık katkısının optimum oranlarının belirlenmesi,
- Plastik atık katkısı kullanılarak elde edilen yüksek plastisiteli kil numunelerin şişme özelliklerini incelemek,
- Yüksek plastisiteli kil zeminlerde plastik atık katkısının zeminin mukavemet özelliklerini iyileştiren optimum katkı oranını belirlemek.

Yapılan bu çalışmada, deney numuneleri yüksek plastisiteli kil zemine sırasıyla %0, %0.25, %0.5 ve %0.75 oranlarında plastik atık eklenerek hazırlanmıştır. Yüksek plastisiteli kil zemine elek analizi ve kıvam limit deneyleri yapılarak zemin parametrelerini belirlenmiştir. Elek analizi ve kıvam deneylerinin ardından deney

numunelerinin standart proktor deneyi gerçekleştirilerek optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı değerleri saptanmıştır. Maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevasında hazırlanan yalın CH numunesine ek olarak ağırlıkça %0, %0.25, %0.5 ve %0.75 oranlarında plastik atık katkılı numunelerin şişme parametrelerine etkisi belirlemek için şişme deneyleri yapılmıştır. Çalışmanın son aşamasında ise katkısız kil zemin ve kil-plastik atık numuneleri aynı şartlarda hazırlanarak serbest basınç deneyleri uygulanarak plastik atıklarının yüksek plastisiteli kilin geoteknik özelliklerine etkisi araştırılmıştır.

### **1.3. Kil Mineralleri**

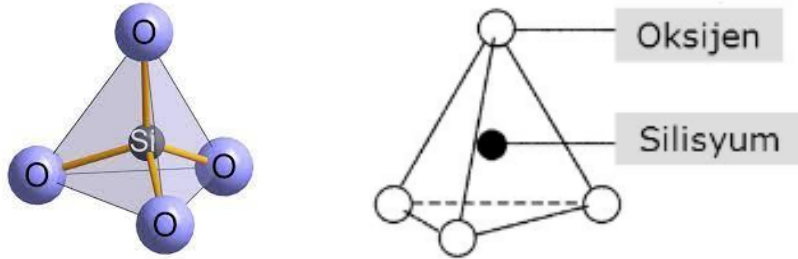
Killer, kayaçların kimyasal ayrışmalarıyla oluşmuş, hidratlı alüminyum ve magnezyum silikatlardan oluşan doğal bir ikincil minerallerdir. Kristalimsi yapıya sahip olan killer yalnızca elektron mikroskobu ile görülebilirler (Holtz and Kovacs 1981). Kil mineralleri aktif elektrokimyasal olan partiküller içerdiğinden zeminde az miktarda bulunsalar dahi zeminin mühendislik özellikleri üzerinde etkili olurlar. Kil minerallerinin çoğu asitte çözünmez, hidrofildir ve ıslakken elastiktir (Cernica 1995).

Doğal olarak bol miktarda ve oldukça reaktif jeomalzemeler olarak kil mineralleri, tarih öncesi çağlardan beri çeşitli amaçlar için kullanılmaktadır. Endüstri, inşaat ve kozmetik sanayinde katkı maddesi olarak kullanıldığı gibi, sağlık sektöründe çeşitli hastalıkların tedavi edilmesinde de kullanılmaktadır. Ayrıca, seramik, tuğla ve ilaç gibi birçok sektörün ana hammaddesi olarak da kullanılmaktadır. Günümüzde, kil mineralleri, emülsiyon stabilizatörleri, deterjanlar, seramikler, tıbbi malzeme, ağartma, gıda katkı maddeleri vb. çeşitli endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır ve son yıllarda nanoteknolojideki ilerlemeler ile büyük ölçüde motive olan insanoğlunun kil minerallerine ilgisi de artmıştır. Kimyasal olarak homojenlik ve doğal katmanlı silikatların coğrafi dağılımındaki farklılık nedeniyle, artan talebi karşılamak için çeşitli doğal olmayan alternatifler geliştirilmiştir. Buna ek olarak, kil mineralleri birçok yenilikçi uygulamada organik olarak modifiye edilmiş ve kil mineral ailesine daha fazla çeşit eklenmiştir.

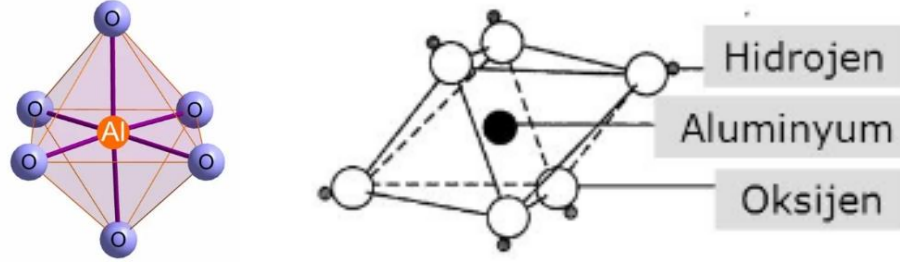
Kil mineralleri, fillosilikat mineral ailesinin daha büyük bir bölümünü oluşturan çeşitli sulu bir tabaka alümin silikat grubudur. Bunlar yerbilimciler tarafından dane büyüklüğü 2 mm olan sulu tabaka alümin silikatlar olarak tanımlanırken, mühendisler kili

4 mm'den küçük herhangi bir mineral parçacığı olarak tanımlarlar. Küçük boyutları ve yüzey alanının hacme oranı kil minerallerine bir dizi benzersiz özellik kazandırır. Bu özellikler yüksek kation değişim kapasiteleri, katalitik özellikler ve nemliyen plastik davranışlarıdır. Kil mineralleri ince daneli çöktillerin ve kayaçların (şeyller, kil taşları, killi silt taşı, killi pozlar ve argillitler) ana bileşenidir. Toprak, göl, nehir ağzı, delta ve dünya yüzeyinin çoğunu kaplayan okyanus sedimanlarının önemli bir bileşenidir. Ayrıca, dünya'nın kara yüzeyinin yaklaşık %75'ini kaplayan neredeyse tüm tortul kayalarda bulunurlar. Toprakta veya ayrışma sonucu oluşan killer esas olarak iklimi, drenajı ve kaya tipini yansıtır.

Kil minerallerinin davranışlarını ve dikkat çekici özelliklerini anlamının yolu, tetrahedral ve oktahedral tabakaların nasıl birleştiğini ve birleşme yollarını nasıl yapılandırdıklarını anlamaktır. Kil mineralleri silikat tetrahedra tabakalarından ( $\text{SiO}_4$ ) ve oktahedra (Al, Mg ve Fe içeren) oluşan katmanlı maddelerdir. Doğal kil minerallerinde bir veya birkaç tabakadan oluşan katmanlı yapısal birimlerin 30 nm ile birkaç mikron arasında değişen yanal boyutlarda uzunluk/kalınlık oranı 1000'den fazladır. Kil mineralleri, silika tetrahedral ve alümina veya magnezyum oktahedral tabakası olmak üzere genellikle iki tabaka halinde bulunmaktadır. Silika tetrahedral tabaka tek bir silika atomunun çevresinde 4 oksijen atomunun birleşmesi ile oluşurken oktahedral tabaka ise alüminyum veya magnezyum kationlarına, 6 adet oksijenin veya hidroksil grubun bağlanması ile oluşmaktadır. Bu tabakadaki kationlar yerdeğiştirebilme özelliğinden dolayı farklı yapıya sahip olup, çeşitli isimler ile tanımlanmaktadır (Holtz ve Kovacs, 1981). Şekil 1.1'de tetrahedral bir silis tabakasının üç boyutlu modellemesi, Şekil 1.2'de ise oktahedral tabakanın 3 boyutlu modellemesi verilmiştir.



Şekil 1.1. Tetrahedral silis levhasının üç boyutlu modellemesi (Sivakugan, 2001).



Şekil 1.2. Oktahedral levhanın üç boyutlu modellemesi (Sivakugan, 2001).

Konta (1995), kil minerallerini temel yapısal değişim ve birbirleri arasındaki yer değişimleri dikkate alarak yedi gruba ayırmıştır (Tablo 1.1).

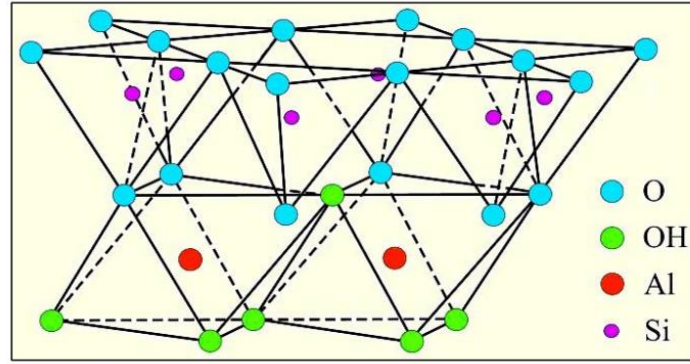
Tablo 1.1. Kil minerallerinin sınıflandırılması (Konta, 1995).

Grup İsmi	Mineraloji	İdeal Formülü
Kaolinit	Kaolinit	$Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$
Serpantinit	Halloysit	$Mg_6[Si_4O_{10}](OH)_8$
Mika	İllit	$K_{<2}Al_3[(Si_{>6}Al_{<2})O_{20}](OH)_{4n}H_2O$
Vermikülit	Trioktahedral vermiküli	$(Mg,Fe^{2+})[Si_{>}Al_8O_{20}](OH)_{4n}H_2O$
Simektit	Montmorillonit	$M^{+x+y}(Al,Fe^{2+})_{4-y}[(Si_xAl_x)O_{20}](OH)_{4n}H_2O$
	Beidellit	$M_xAl_4[(Si_{8-x}Al_x)O_{20}](OH)_{4n}H_2O$
	Notronit	$(M^{+x}Fe^{3+})_{4-y}[(Si_{8-x}Al_x)O_{20}](OH)_{4n}H_2O$
	Saponit	$(M^{+x}Mg_6)[(Si_{8-x}Al_x)O_{20}](OH)_{4n}H_2O$
Profillit	Profillit	$Al_4[Si_8O_{20}](OH)_4$
Talk	Talk	$Mg_6[Si_8O_{20}](OH)_4$
Klorit	Donbassit	$Al_4[Si_8O_{20}](OH)_4Al_4(OH)_{12}$
Paligorskit	Paligorskit	$Mg_5[Si_8O_{20}](OH)_2(OH_2)_4H_2O$
Sepiyolit	Sepiyolit	$Mg_8[Si_{12}O_{30}](OH)_4(OH_2)_4nH_2O$

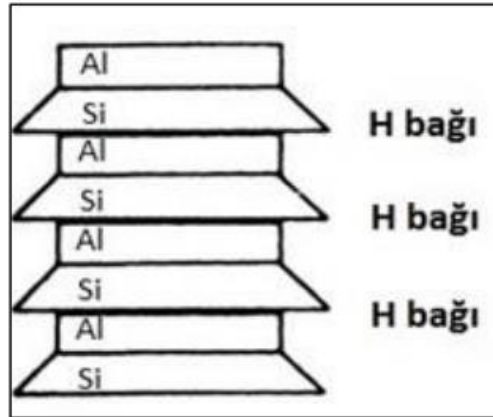
Kaolinit mineralleri, 1:1 silika alümina minerali olarak tanımlanır. Temel olarak bir tetrahedral (silika) ve bir oktahedral (alümina ya da gipsit) tabakasının yinelenen katlarından meydana gelir (Şekil 1.3). Bir katmanın iki tabakanın birer tanesinden meydana gelmiş olmasından dolayı kaolinit 1:1 kil minerali şeklinde ifade edilir (Şekil 1.4). Bir katmanın kalınlığı yaklaşık olarak 0,72 nm olup uzanımı diğer iki yönde devam

etmektedir. Kaolinit için yapısal formül  $Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$  'dir ve teorik kimyasal bileşimi  $SiO_2$ , %46.54;  $Al_2O_3$ , %39.50 ve  $H_2O$ , %13.96'dır (Holtz and Kovacs 1981).

Tabakaları bir arada tutan bağ Hidrojen Bağları ve Van Der Waals kuvvetleridir. Bağ oldukça güçlüdür dolayısıyla hidrasyonu önler bu nedenle de kil ıslandığında tabakalar arasında şişme görülmez. Kristallerin arasına katyonların ve su moleküllerinin girebilmesi çok zordur. Bunun sonucu olarak katyon değişim kapasitesi diğer kil minerallerine kıyasla düşüktür (3-15 meq/100 gr). Kaolinitin kristalleri montmorillonite göre daha büyüktür. Diğer kil minerallerine göre kohezyon, plastiklik, şişme ve büzülme özellikleri kaolinitin çok zayıf olmakla birlikte kaolinit ıslandığında plastisitesi orta dereceli olup, içsel sürtünme açısı diğer kil minerallerinden daha büyük olur. Özgül ağırlığı  $2,60-2,68 \text{ gr/cm}^3$ , özgül yüzeyi  $10 \text{ m}^2/\text{gr}$  civarındadır.

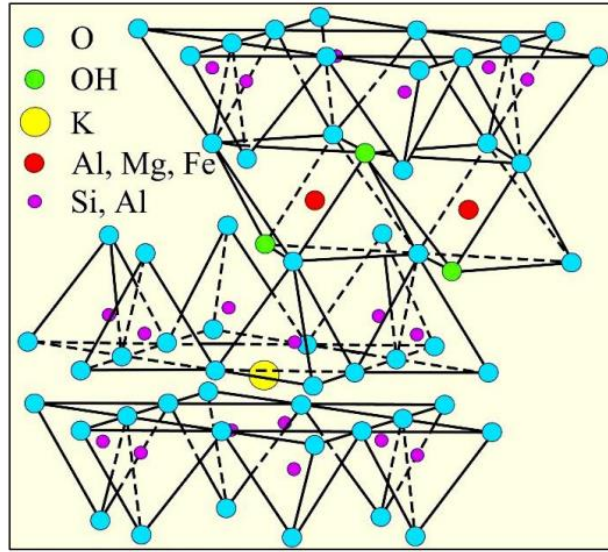


Şekil 1.3. Kaolinitin şematik taslağı (USCS, 2001a).

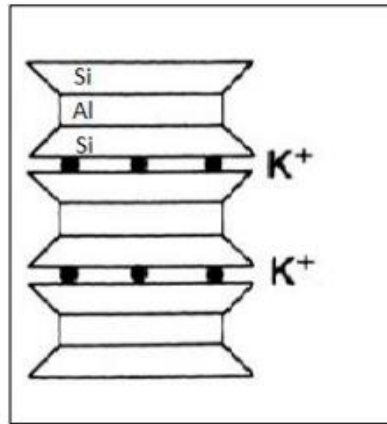


Şekil 1.4. Kaolinitin şematik görünümü (Başer, 2009).

İllit mineralleri, İllitin temel yapısı iki tabakalı silika tetrahedronlar ile birlikte alümina oktahedronlar tabakasından oluşur. Bu nedenle illitin kristal yapısı 2:1 olarak gösterilir (Şekil 1.6). Oktahedral tabakada Mg (Magnezyum) ve Fe (Demir) ile Al'un (Alüminyum) kısmi yer değiştirmesi; tetrahedral tabakada ise Al ile Si'in (Silis) kısmi yer değiştirmesi görülür (Şekil 1.5). Bu birleştirilen tabakalar, arasında tutulan K (Potasyum) iyonlarına bağlı olarak, (değiştirilemeyen) çok zayıf bağlarla bağlanmıştır (Başer, 2009). İllitin içsel sürtünme açısı montorillonitten fazla, şişme kapasitesi azdır. Özgül ağırlığı 2,64 - 3,0 gr/cm<sup>3</sup> arasında olup, özgül yüzeyi 80 m<sup>2</sup>/gr civarındadır.



Şekil 1.5. İllitin şematik taslağı (USCS, 2001b).

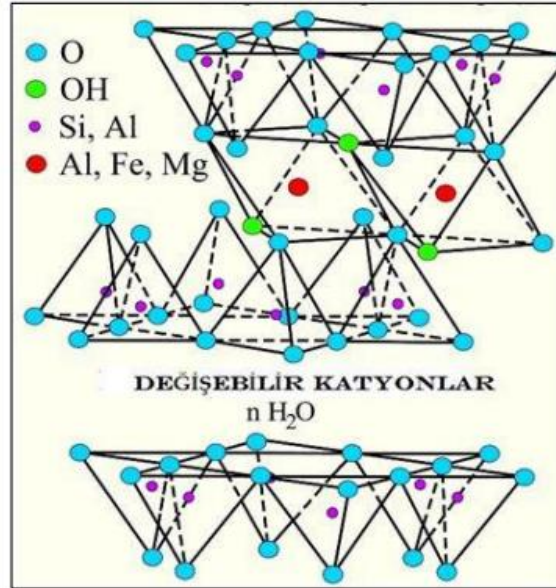


Şekil 1.6. Kaolinitin şematik görünümü (Başer, 2009).

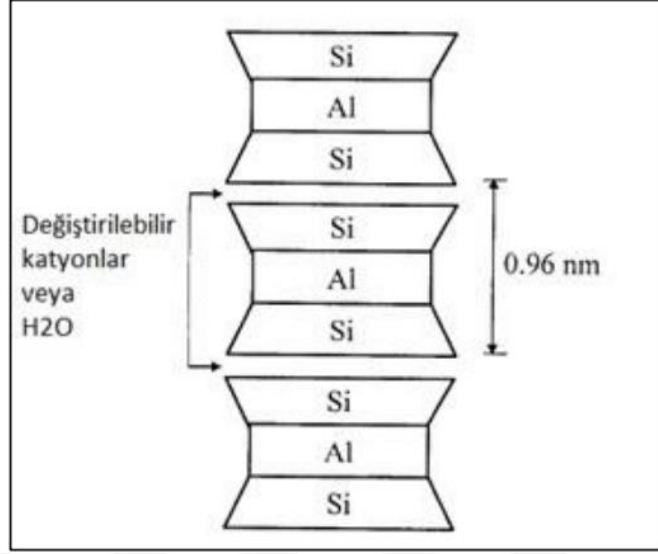
Montmorillonit mineralleri, Montorillonit minerali 2 tetrahedral tabakanın arasına 1 oktahedral tabakanın sıkışması ile oluşur. Bu nedenle kristalleri 2:1 olarak gösterilir (Şekil 1.8). Bu tabakalar arasındaki bağ çok zayıf bir bağ olması ve oktahedral levhada (-) negatif yük boşluğu olması sebebiyle su, rahatlıkla tabakalar arasına girer ve tabakaları birbirinden ayırarak zeminde hacim değişikliğine sebep olur. (Şekil 1.7)'de montmorillonitin şematik taslağı görülmektedir.

Şişme potansiyeli en fazla olan kil minerali montmorillonit olup sebebi mineralojik yapısındaki önemli farklılıklardan kaynaklanmaktadır. Özgül spesifik yüzeyi diğer kil minerallerinden çok daha fazla olan montmorillonitin su tutma potansiyeli, hacim değiştirme ve plastisite özelliği yüksek olup doğada plaka şeklinde bulunur (Z. Angın, A. Angın, 2005).

Montmorillonit negatif yükü dolu geniş iç yüzeylere sahiptir. Bu nedenle kation değişim kapasitesi yüksek olup yaklaşık 80-150 meq/100 gr'dır. Montmorillonit suya maruz kaldığından düşük içsel sürtünmeye ve yüksek plastisiteye sahip olur. Kurduğunda ise çok fazla çatlama büzülme meydana gelir. Özgül ağırlıkları 2,2- 2,3 gr/cm<sup>3</sup> olup, özgül yüzeyleri 800 m<sup>2</sup> /gr civarında değişmektedir.



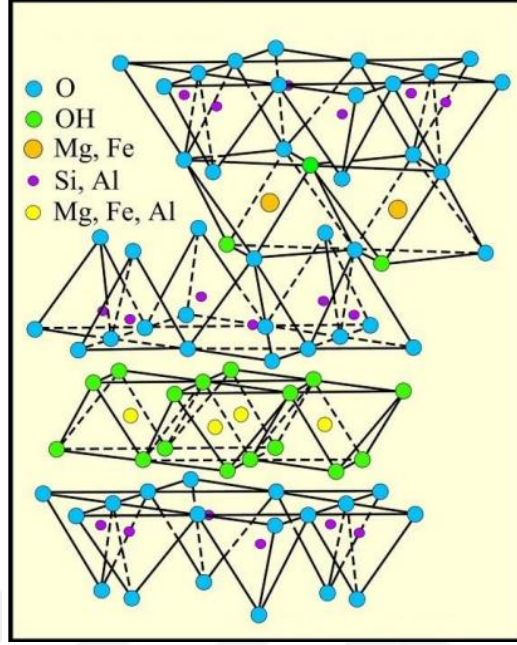
Şekil 1.7. Montmorillonitin şematik taslağı (USCS, 2001c).



Şekil 1.8. Montmorillonitin şematik görünümü (Başer, 2009).

Klorit mineralleri ise kimyasal formülü  $(Mg,Fe;Al)_6(Al,Si)_4O_{10}(OH)_8$  olup, klorit grubu kil mineralleri mafik açıdan zengin, düşük dereceli yeşil şist fasiyesindeki metamorfik kayalardan, genel olarak deniz tortullarında çökelti kayalarından simektit ve K iyonlarının reaksiyonu sonucu oluşur. (Lambe 1960). Klorit taneleri dört katlı (2:1:1) yapısal tabakaya sahiptir (Şekil 1.9). Kloritlerin kristal yapısını mika ve brusit tabakaları meydana getirir (Yalçın, 1997).

Kloritin kristal yapısında mika benzeri negatif yüklü düzenli katmanlar ile brusit benzeri pozitif yüklü (oktahedral) tabakalar bulunur. Klorit grubu brunsvigit, nimit, diabantit, pennantit, brunsvigit gibi mineralleri içerir.



Şekil 1.9. Kloritin şematik taslağı (USCS, 2001d).

### 1.3.1. Kil Minerallerinin Zeminlerin Mühendislik Özelliklerine Etkisi

Zeminlerin içeriğinde bulunan kil mineralleri zeminlerin oturma, sıkışma, dayanım, şişme ve geçirimsizlik gibi birçok özelliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Zeminlerde yükleme sonucunda deformasyonlar meydana gelmektedir ve oluşan toplam deformasyon oturma olarak ifade edilmektedir. Artan yük ile beraber hareket yönü aşağı ya da yükün ortadan kalkması halinde yukarı yönde hareket oluşabilmektedir. Mühendislik projelerinde mühendisin en çok önem verdiği nokta oturmanın miktarı ve ne kadar sürede tamamlanacağıdır. Oturmanın ani ve hızlı olduğu durumlarda gerçekleşen aşırı oturmalar mühendislik yapılarına maddi ve manevi büyük hasarlara yol açabilir. Zeminlerde yüklemeye bağlı olarak gerçekleşen toplam oturma (St), ani oturma (distorsiyon oturma) (Si), konsolidasyon oturması (zamana bağlı) (Sc) ve ikincil oturma (zamana bağlı) (Ss) olmak üzere üç bileşenden oluşmaktadır. Elastik olsun ya da olmasın ani oturma diğer bir ifadeyle distorsiyon oturması elastik teoriden hesaplanmaktadır. Konsolidasyon oturması ise zamana bağlı gerçekleşmekte olup, geçirimsizlik katsayısı düşük, ince daneli suya doygun zeminlerde gerçekleşen bir durumdur. Boşluk suyunun drenaj oranı ise konsolidasyon oturmasının süresini belirlemektedir. İkincil oturmada zamana bağlı olarak gelişen diğer bileşen olup, sabit efektif gerilmede oluşur ve

oluşumunda boşluk suyu basıncında değişim oluşmamaktadır (Holtz ve Kovacs, 1981; Kayabalı, 2002). Zeminlerde bu oturma bileşenlerinden biri, ikisi ya da üçü birlikte gözlenebilmektedir (Fang,1990).

Zemin içerisindeki kil oranının artmasıyla birlikte, zeminde meydana gelen oturma tipi birincil oturmadan ziyade zeminin geçirimsizliği ile ilişkili olarak zamana bağlı şekilde gelişen ve devam eden konsolidasyon oturması gerçekleşmektedir. Konsolidasyon oturması ince daneli killi zeminlerde gözlenen karakteristik oturma tipidir. Yeryüzünde herhangi bir zemin üzerine inşa edilen baraj, tünel, bina gibi mühendislik yapıları, zeminin mevcut gerilme durumunda önemli değişimlere neden olmakta, yükün zeminde meydana getirdiği gerilme artışı ile beraber killi zeminde oturmalar gerçekleşmektedir. Ancak, bu oturmaların gerçekleşebilmesi, danelerin sıkışması ihmal edilirse, zemin danelerinin birbirlerine yaklaşması ile mümkündür. Zemin danelerinin birbirine yaklaşması yani daneler arasındaki boşlukların azalabilmesi ise daneler arasındaki bu boşluklardaki hava, su veya her ikisinin zemini terk etmesi ile mümkündür ve bu olay zeminin geçirimsizliği ile doğrudan ilişkilidir. Çok düşük geçirimsizliğe sahip killi zeminlerde gözeneklerden suyun veya havanın dışarı atılması iri daneli zeminlere kıyasla uzun süre gerektiren bir olaydır. İri daneli zeminler yüksek geçirimsizlik değerlerine sahip olduklarından, zemine etkiyen gerilmenin artmasıyla birlikte gözeneklerdeki su ve hava hemen zeminden dışarı atılmakta ve zemini daneleri birbirine yaklaşmakta ve boşluk oranı ise azalmaktadır. Böylece, zeminde zamana bağlı olmayan birincil oturmalar gerçekleşmektedir. Ancak, killi zeminlerde geçirimsizlik çok düşük olduğundan, gerilme artışı ile birlikte gözeneklerdeki su zeminden dışarı atılmamakta, önce daneler arasında boşluk suyu basıncı oluşmakta, geçirimsizlik değerine bağlı olarak suyun dışarıya atılması zamana bağlı olarak gelişmekte ve böylece boşluk suyu basıncı sönümlenmekte ve zeminde zamana bağlı olarak gerçekleşen konsolidasyon oturması gerçekleşmektedir. Zeminin geçirimsizliğine bağlı olarak konsolidasyon günler, aylar hatta yıllar boyunca sürebilmektedir ve zemin bileşenlerinin yeni pozisyonları partiküllerin rijitliğine bağlı olarak gelişmektedir (Kayabalı, 2002).

Zeminin diğer bir önemli özelliği ise zeminin içindeki boşluklar boyunca suyun zemin içinden geçebilmesi özelliği olarak tanımlanan (Scheidegger, 1974) geçirimsizliktir. Zemin içerisindeki bu akışı boşluğun büyüklüğü, şekli ve geometrisi etkiler ve bu

danelerarası boşluğun özellikleri, dane çapı, şekli ve dizilimi gibi özellikleri ile ilişkilidir. Genel olarak iri daneli (kum ve çakıl) zeminler, kil gibi ince daneli zeminlere göre daha yüksek geçirimsizlik değerlerine sahiptir (Cernica, 1995). Bu özellik bağıl birim hacim ağırlığının zeminlerin geçirimsizliğinin tahmininde kullanılmasını olanak sağlamaktadır (Juang ve Holtz, 1986).

Zemin içeriğinde kilin varlığı sonucunda gerçekleşebilen diğer önemli bir özellik, zeminin bulunduğu ortamdaki su içeriği ve gerilme koşullarının değişmesi sonucunda ortaya çıkan hacim artışı olarak tanımlanan şişmedir. Şişme potansiyeli ise zeminlerin şişme yeteneğini ifade eden bir kavramdır ve zeminlerin hem şişme yüzdesini hem de şişme basıncını kapsayan bir terim olarak kabul edilmektedir (Sridharan vd., 1986; Shuai, 1996). Şişme yüzdesi, su ile teması sonucunda hacminde meydana gelen artışın, başlangıç hacmine göre yüzdesidir. Şişme basıncı ise kilin su veya elektrolit absorbe etmesine izin verilmesi halinde, kil-su sistemini istenen boşluk oranında tutmak için gerekli basınç olarak tanımlanmaktadır (Sridharan ve Choudhury, 2002). Su içeriğindeki artış ile şişen killi zeminler kurudukları zaman büzülme gösterirler ve hacimlerinde azalmalar meydana gelir. Şişme ve büzülme ile meydana gelen hacimsel değişiklikler yapıların hasar görmesine neden olabilmektedir. Bir zeminde şişmenin meydana gelebilmesi zeminin içerdiği kil minerallerinin türüne, miktarına, kilin spesifik yüzeyine, zeminin yapısına, boşlukları dolduran suyun kimyasal özelliklerine ve killerin değişebilir katyon kapasitesi gibi birden fazla faktöre bağlıdır (Genç, 2008). Şişen özellikteki killi zeminler jeoteknik uygulamalarda oldukça problemlili zemin tiplerindedir ve bu tip zeminlerin varlığı yapılarda ciddi hasarlara neden olabilmektedir.

#### **1.4. Şişen Zeminler**

Şişen (genleşen) zeminler yarı kurak ve kurak iklimlere sahip bölgelerde oluşmuş, suyla temas ettiklerinde meydana gelen hacim değişimlerinden dolayı üzerindeki hafif yapılara ve kazı desteklerine yüksek şişme basınçları ile hasar veren, özellikle smektit kökenli killerdir (Sridharan vd, 1986). Zeminlerin şişme özelliği, içeriğindeki su miktarına göre değişiklik göstermektedir. Yağmur suları ve yer altı su seviyesindeki değişim dış etmenler zeminin su içeriğini arttırmaktadır. Artan su içeriğiyle doğru orantılı olarak zeminin hacminde de artış meydana gelmektedir. Şişmeyi engellemek için uygulanması gereken basınca ise “şişme basıncı” denilmektedir. Eğer zemin tabakası üzerine inşa

edilen yapıların basıncı, şişme basıncından düşük olursa zeminde kabarmalar meydana gelerek yapılarda zamanla ciddi hasarlar oluşturmaktadır. Bu nedenle bir yapı projelendirmeden önce inşa alanını kaplayan zeminin davranışı ve şişme duyarlılığı çok dikkatli analiz edilmeli ve gerekli önlemler alınmalıdır.

Yüksek şişme özelliğine sahip olan her kil mineralinin şişme potansiyeli aynı düşünülmemelidir. Kaolinit kili güçlü hidrojen bağları sayesinde bir arada kalıp hemen hemen hiç şişmez iken illit, daha zayıf potasyum bağları ile bağlıdır ve az miktarda şişmektedir. Zayıf Van Der Merve bağları ile birbirine bağlanan montmorillonit killerinde bağlar arasına giren su, bağları kolayca birbirinden ayırarak şişme davranışına sebep olmaktadır. Zemin içerisinde %10 oranında montmorillonit kilinin bulunması bile zeminin şişme davranışı sergileyeceğini göstermektedir.

Son yıllarda, şişen zemin davranışının, şişme mekanizmasının belirlenmesi ve mühendislik uygulamalarında kullanılacak yöntemler geliştirilmesi amacıyla önemli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaların sonucunda, zeminlerin şişme davranışına etki eden bir çok faktör bulunduğu tespit edilmiştir. Bu faktörler zeminin kil içeriği, mineralojisi, katyon değiştirme kapasitesi (KDK), aktivitesi, tabii su muhtevası, kuru birim hacim ağırlığı, kıvam limitleri, numunenin örselenmemiş veya sıkıştırılarak hazırlanmış numune olması olarak sıralanabilir (Chen, 1973).

#### **1.4.1. Şişen Zeminlerin Belirlenmesi**

Şişen zeminlerin belirlenmesi amacıyla çok sayıda değerlendirme ve deney yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemler iki temel grupta toplanabilir. İlk grup Ampirik Yöntemler olup, birim hacim ağırlığı, kolloid içeriği, atterberg limitleri vb. parametreler ile karşılaştırmalar yapılarak niteliksel yöntemlerle zeminin şişme potansiyeli düşük, orta, yüksek veya çok yüksek gibi ifadelerle değerlendirilir. İkinci Grup Ödometrik Yöntemler olup, ödometre yardımıyla zeminin tek eksenli şişme değerleri niceliksel olarak belirlenir.

##### **1.4.1.1. Mineralojik Belirleme**

Bir zeminin şişme kapasitesi o zemindeki kil minerallerinin miktarı ve türü ile doğrudan ilgilidir. Kil minerallerinin katyon değiştirme kapasiteleri, üzerlerindeki negatif yükler ve tabakalarının arasındaki bağlarının şiddeti vb. özellikler şişme potansiyeli hakkında önemli ipuçları verir. Bu kil mineralinin çeşidini belirlemek amacıyla da birçok

yöntem kullanılmasına karşılık en çok kullanılanı X Işını Yayını (X-Ray Diffraction) metodudur. Diğer kullanılanlar ise; Elektron Mikroskop, Kimyasal Analiz, Farklı Isı Analizi ve Boya Adsorbsiyonu gibi metotlardır.

#### 1.4.1.2. USBR Sınıflandırma Sistemi

Zeminlerin farklı özellikleri dikkate alınarak yorumlandıktan sonra, zeminleri belirlemek amacıyla Holtz ve Gibbs (1956) tarafından yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemde 1 Psi (6,9 kPa) düşey yük altında ödometrede kuru zeminin şişme yüzdesine göre, zeminin şişme derecesi ortaya konulur. Ayrıca Plastisite İndisi, Rötire Limiti, çapları 0,001 mm' den küçük olan tanelerin yüzdesi gibi değerler de belirlenir. Şişen zeminlerle yapılan araştırmalar sonucu, bu özellikleri belirleme kriterleri (Tablo 1.2)'da önerilmiştir.

Tablo 1.2. Etkili endeks özellikleri ile şişme derecesinin belirlenmesi (Holtz ve Gibbs, 1956).

Şişme Derecesi	Şişme Yüzdesi (%)	Rötire Limiti (%)	Plastisite İndisi (%)	0.001'den küçük dane yüzdesi (%)	Serbest Şişme (%)
Çok yüksek	> 30	<10	>32	>27	>100
Yüksek	20 - 30	6 - 12	23 - 45	18 - 37	>100
Orta	10 - 20	8 - 18	12 - 34	12 - 27	50 - 100
Düşük	< 10	>13	<20	<17	<50

#### 1.4.1.3. Aktivite Yöntemi

Zeminlerin aktivitesi; değişen nem koşulları altında zeminin su alıp su verme kabiliyeti için kullanılan bir ifade olup, metilen mavisi adsorbsiyonu, kıvam limitleri ve zeminlerin katyon değişim kapasitesi gibi özelliklerinin tespit edilmesi sonucu bulunabilmektedir.

Genel olarak kullanılan aktivite formülü; zeminin plastikliği ile zeminin kil boyutu 2 µm'dan küçük olanlarının yüzdesi arasındaki ifadeyi ilişkilendirir. Aktivite formül olarak "denklem. 1.1" deki gibi tanımlanmıştır:

$$A = PI/CC \quad (1.1)$$

A: Aktivite

CC: Kil Yüzdesi (<2 µm)

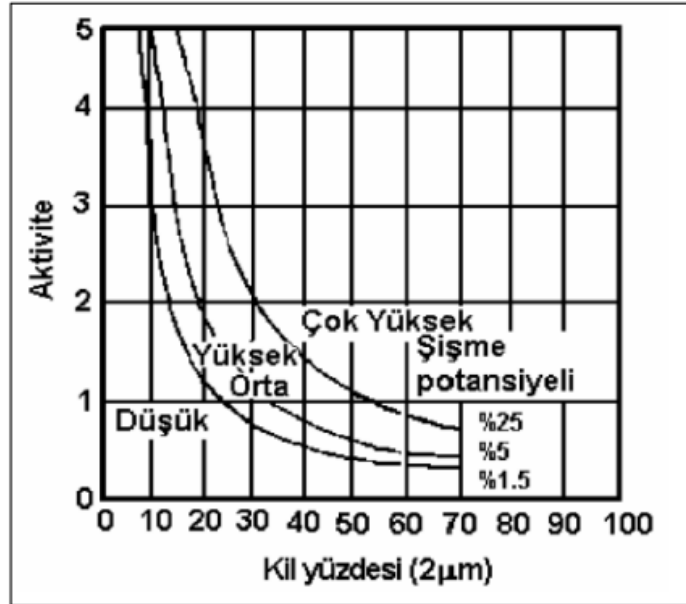
PI: Plastisite İndisi Değeri (PI= LL-PL)

Skempton (1953) killerin aktivite değerlerine (A) bağlı olarak killeri üç gruba ayırmış ve montmorillonit türü killeri aktif killer, illit türü killeri normal killer ve kaolinit türü killeri ise aktif olmayan killer olarak gruplandırmıştır. Aktif killer şişme potansiyeline sahip olduğu düşünülen killerdir (Tablo 1.3).

Tablo 1.3. Killerin aktivite değerlerine göre sınıflandırılması (Skempton, 1953) (Öztürk, 2012).

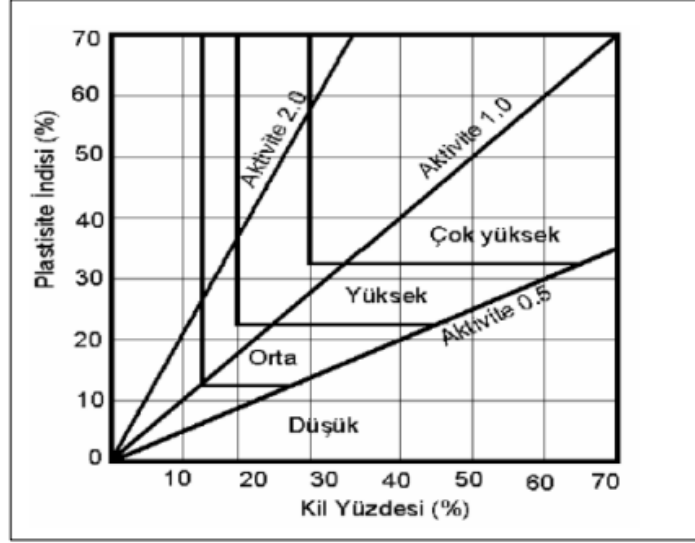
Aktivite (A)	Sınıflama
$A > 1,25$	Aktif killer (montmorillonit)
$0,75 < A < 1,25$	Normal killer (illit)
$A < 0,75$	Aktif olmayan killer (kaolinit)

Seed, Woodward and Lundgren (1962) tarafından yapılan çalışmalar neticesinde kil minerallerinin aktivitesi ile şişme katsayısı arasında doğrudan ilişki olduğu belirlenmiştir. Şekil 1.10' de Seed v.d. (1962) tarafından önerilen ve aktivite ile kil yüzdesine (<2 µm) bağlı olarak verilen sınıflandırma sistemi görülmektedir.



Şekil 1.10. Seed ve diğerleri (1962) tarafından önerilen sınıflandırma sistemi.

Şekil 1.11. 'de plastisite indisi ile kil yüzdesine göre tanımlanmış Van Der Merve (1964), sınıflandırma abağı verilmektedir (Ünver,2015).



Şekil 1.11. Van Der Merve (1964) tarafından önerilen sınıflandırma abağı (Genç, 2009).

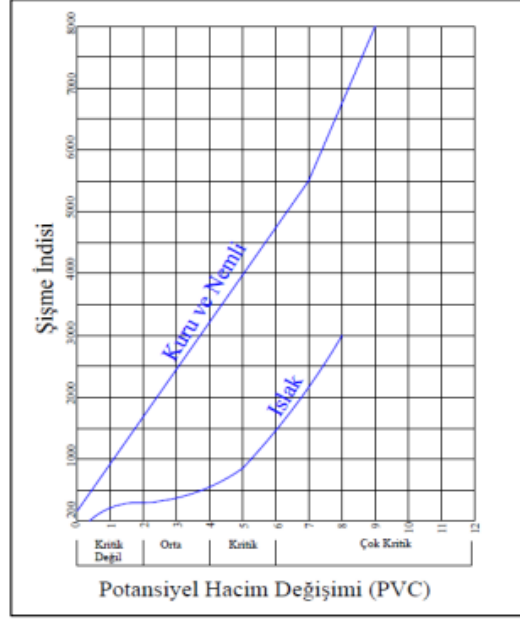
#### 1.4.1.4. PVC Yöntemi

Lambe (1960) tarafından Potansiyel Hacim Değiştirmesi (PVC) deneyi çalışmaları yapılmıştır. Yapılan deneyde örselenmiş numuneler konsolidometre halkasında sıkıştırılarak, üzerlerine  $140 \text{ t/cm}^2$  basınç uygulanmış ve numuneye su verilmiştir. İki saat süreyle beklendikten sonra kontrol halkasının okumaları basınca çevrilerek şişme indisi olarak tanımlanmıştır. PVC deneyi ile şişme eğilimi olan zeminlerin karşılaştırılması yapılabilmekte olup, zeminlerin şişme potansiyeli belirlenmemektedir (Genç, 2009).

Şişme indisi ile PVC arasındaki ilişki Şekil 1.12'de gösterilmektedir. PVC oranlarına göre de zeminlerin şişme kriterleri Tablo 1.4'de verilmiştir. Buna göre PVC oranı 2 den küçükse şişme indisi kritik değil, 2 ile 4 arasında ise orta, 4 ile 6 arasında kritik, 6'dan büyükse de çok kritik sınıfa girmektedir.

Tablo 1.4. PVC oranlarına göre şişme kriterleri (Genç, 2009).

PVC Oranı	Kategori
< 2	Kritik değil
2-4	Orta
4-6	Kritik
> 6	Çok kritik



Şekil 1.12. Şişme indisi-potansiyel hacim değişimi ilişkisi (Lambe, 1960).

#### 1.4.1.5. Kıvam Limitleri ile Belirleme

Şişmenin tanımlanması için kullanılan deneylerin hiçbiri henüz standart haline getirilmemiştir. Fakat zeminin kıvam limitleri şişme özelliği hakkında oldukça sağlam bilgiler vermektedir. Zeminin likit limiti ve plastisite indisi arttıkça şişme derecesinin de arttığı çalışmalar sonucunda gözlemlenmiştir. Literatürde şimdiye kadar pek çok sayıda sınıflandırma yöntemi kullanılmaktadır. Bu sınıflandırmaların bazısında aynı plastisite indisi değeri için farklı şişme potansiyeli değerleri elde edilmektedir. Bunun nedeni, araştırmaların farklı zemin tiplerinde yapılması, başlangıç zemin koşullarının ve su muhtevası değerlerinin farklı olması gösterilebilir (Nelson ve Miller, 1992). Literatürde, Chen (1988) tarafından yapılan sınıflandırma, en çok kullanılan sistemlerden birisidir ve bu çalışma kapsamında referans alınmıştır. Tablo 1.5’de zeminlerin likit limit ve plastisite indisine göre şişme derecesi verilmektedir

Tablo 1.5. Zeminlerin likit limit ve plastisite indisine göre şişme derecesi (Chen, 1988).

Likit Limit (%)	Plastisite İndisi (%)	Şişme Derecesi
> 60	$\geq 35$	Çok yüksek
40 – 60	20 – 55	Yüksek
30 – 40	10 – 35	Orta
< 30	0 – 15	Düşük

#### 1.4.1.6. Endeks Özellikleri ile Belirleme

Şişen zeminlerle ilgili yapılan tüm çalışmalar ve sınıflandırmalar zeminlerin şişme nedenlerini tespit etmek ve temel yapıda meydana gelecek sorunları çözebilmek amacıyla geliştirilmiştir. Endeks özelliklerini belirlemek için yapılan çalışmalar da bu amaçla yapılmıştır. Zemin sınıflanırken eğer Likit Limit, Plastik Limit ve Plastisite İndisi değerleri biliniyorsa, diğer zeminlerle kıyaslama yapılarak zeminin sahip olduğu özellikler yaklaşık olarak tahmin edilebilir (Seed ve diğerleri, 1962).

Chen (1988) şişme potansiyeli ile plastisite indisi arasında Tablo 1.6'daki gibi bir ilişki olduğunu belirlemiştir. Buna göre plastisite indisi yüzde olarak 0 ile 15 arasında ise şişme potansiyeli düşük, 10 ile 15 arasında orta, 15 ile 20 arasında yüksek, 35 ve üstünde ise şişme potansiyeli çok yüksek olarak değerlendirilir.

Tablo 1.6. Plastisite indisine göre şişen zeminlerin sınıflandırılması (Chen, 1988).

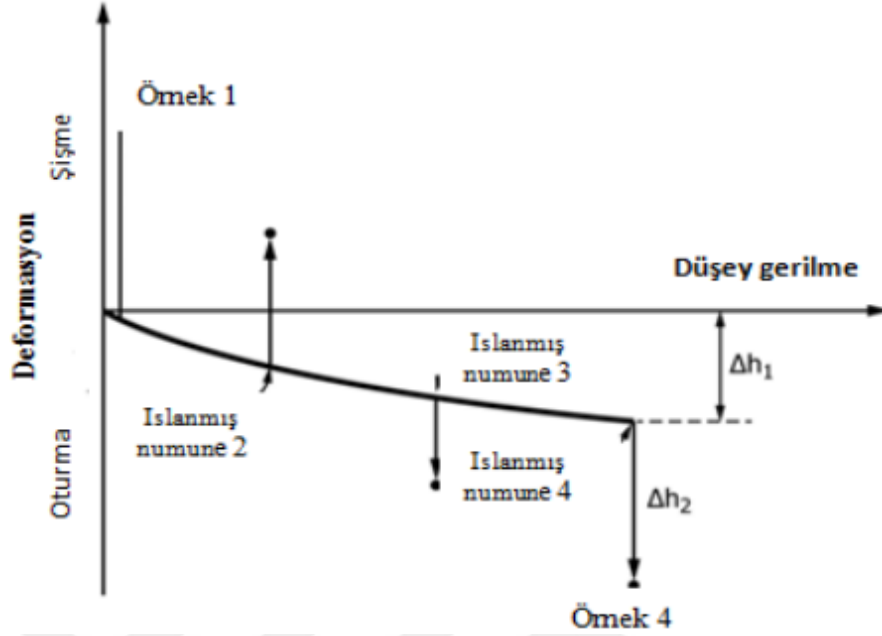
Plastisite indisi (%)	Şişme potansiyeli
0 – 15	Düşük
10 – 35	Orta
20 – 55	Yüksek
$\geq 35$	Çok yüksek

#### 1.4.1.7. Laboratuvar Deneyleri ile Belirleme

##### 1.4.1.7.1. Ödometre Yöntemi ile Belirleme

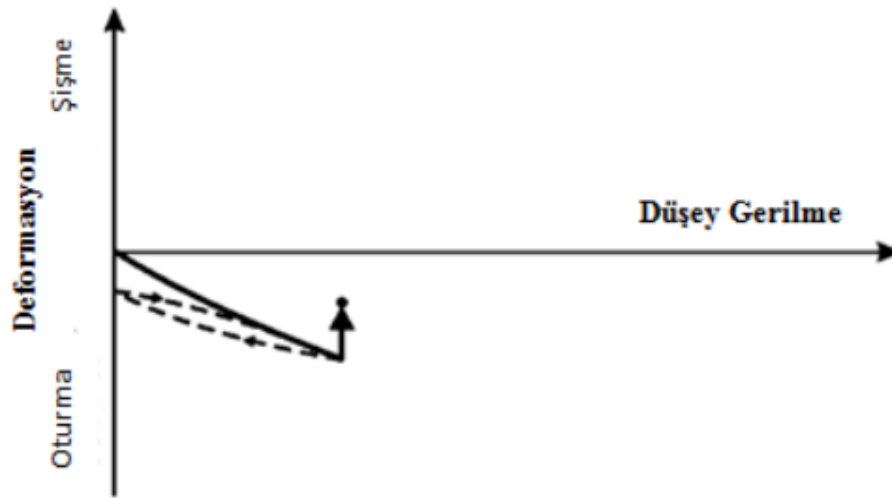
Bu deneyin amacı şişme parametrelerini belirlemektir. ASTM D4546 (2014) şişme basıncı ve şişme yüzdesi belirlenmesi amacıyla üç farklı yöntem önerilmektedir. Bu yöntemlerin tamamında yanal genişlemelere izin verilmemekte ve zemin su içerisinde doyurulmaktadır.

A Yöntemi (Serbest Şişme Deneyi): Bu yöntemde zemin numunesi 1 kPa sürşarj yükü altında suya doyurularak şişme tamamlanıncaya kadar beklenir. Sonra doğal boşluk oranı elde edilinceye kadar klasik ödometre deneyindeki yük kademeleri altında numune yüklenir. Deney sonucunda elde edilen grafik Şekil 1.13'deki gibidir.



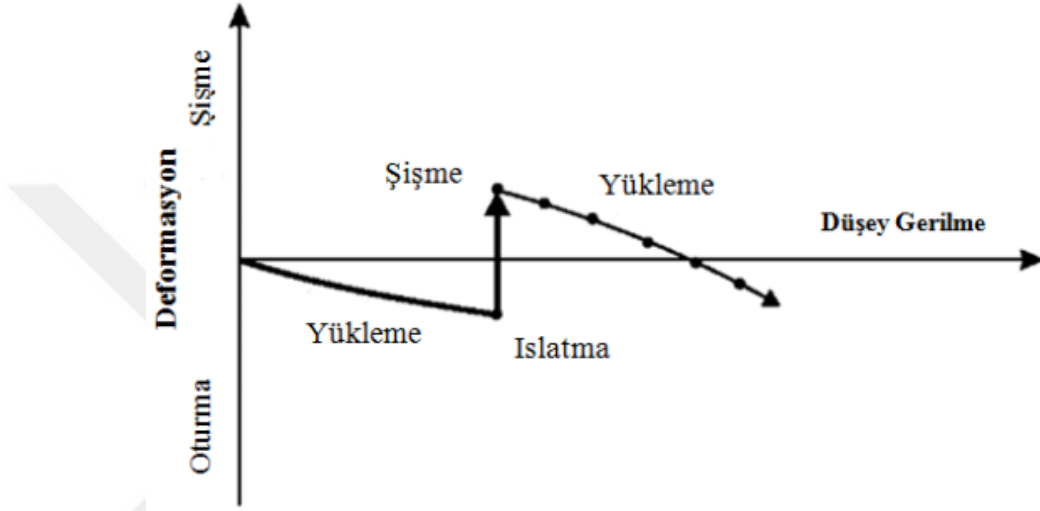
Şekil 1.13. Deformasyon ve düsey gerilmesi eğrisi metot A (ASTM D4546, 2014).

B Yöntemi: Zemin örneği ödometre de doğal su muhtevasında sürşarj gerilmesi + temel yükü etkisine eşdeğer bir  $P_0$  düsey gerilme altında bekletilir. Daha sonra suya doyurularak  $P_0$  gerilmesi altında şişmenin dengelenmesi sağlanır. Daha sonra klasik ödometre yükleme - boşaltma aşamalarına geçilebilir. Deney sonrası elde edilen grafik Şekil 1.14'teki gibidir.



Şekil 1.14. Deformasyon ve düsey gerilmesi eğrisi metot B (ASTM D4546, 2014).

C Yöntemi: Şişme basıncını elde etmek için numune su altında bırakıldıktan sonra ayarlanan düşey basınç tarafından numune yüksekliğinin sabit kalması sağlanır. Bundan sonra deney yöntemi D2435'e göre konsolidasyon deneyi yapılır. Boşaltma verileri şişme potansiyelini belirlemede kullanılır. Deneyden elde edilen grafik Şekil 1.15'teki gibidir.



Şekil 1.15. Zeminin deformasyon ve düşey gerilmesi eğrisi metot C (ASTM D4546, 2014).

#### 1.4.1.7.2. Serbest Şişme Deneyi ile Belirleme

Serbest şişme deneyi ilk olarak Holtz ve Gibbs (1956) tarafından geliştirilmiştir. Uygulaması oldukça kolay olan bu deney, şişme davranışının direk ölçüm yöntemlerinden sayılmaktadır. Deneye başlamadan önce 10 g zemin numunesi 24 saat etüvde kurutulur. Etüvden alınan zemin, içinde 100 ml damıtık su olan mezürün içine doldurulur. 24 saat sonra şişen numunenin hacmi okunur ve denklem 1.2'de verdiği gibi hesaplanmaktadır.

$$FS = \frac{V - V_s}{V_s} * 100 \quad (1.2)$$

Burada;

FS: Serbest şişme

V: Şişmeden sonraki zemin hacmi

Vs: Zeminin dane hacmi'dir.

Zeminin dane özgül ağırlığını belirlemek bazen ortam koşullarına bağlı kolay olmamaktadır. Bunun için literatürde önerilen diğer yöntem kullanılabilir. Bu yöntemde damıtık su ile hazırlanan çözelti, aynı şekilde gazyağı ile de hazırlanır. 24 saat sonra mezürlerdeki son hacim yükseklikleri okunur. Denklem 1.3’de verilen formül ile zeminin serbest şişmesi hesaplanabilmektedir.

$$FS = \frac{V - V_k}{V_k} * 100 \quad (1.3)$$

Burada;

FS: Serbest şişme

V: Numunenin damıtık sudaki son hacmi

V<sub>k</sub>: Numunenin gaz yağındaki son hacmi’

dir.

### **1.5. Zemin Stabilizasyonu**

Dünyada ve ülkemizde, geoteknik mühendisliği uygulamalarında problemlili zeminlere sıklıkla karşılaşılmaktadır. Medenileşme ve uygarlaşma için uygun alanların giderek azalması, artan nüfusa ve gelişen hayat şartlarına bağlı olarak artan yapılaşma ihtiyacı, problemlili zeminlerin iyileştirilip kullanılması ihtiyacını doğurmuştur.

Zeminlerde meydana gelen problemliler:

- Yapım esnasında ve sonrasında meydana gelen oturmalar,
- Temel kazısı ile ilgili problemliler,
- Temel zeminlerinin sıvılaşma potansiyeli,
- Şev duraysızlığı,
- Kazı sonucu kabarmalar,
- Çökebilen ve şişen zeminlerin varlığı.

Yapı inşa edilecek zeminin özelliklerinin, projelendirme çalışmalarından önce detaylı araştırılması ve doğru bir şekilde belirlenmesi büyük öneme sahiptir. Zemin

özelliklerinin istenilen proje şartlarını sağlayamadığı durumlarda, yetersiz zemin koşullarına ilişkin çözümler şunlardır:

- Problemlili bölgeden vazgeçilip yeni bir arazi tercih edilebilir,
- Daha iyi özelliklere sahip zemin tabakalarına ulaşmak için derin temel yöntemleri uygulanabilir,
- Zayıf zemin tabakası kaldırılarak yerine istenilen özelliklere sahip başka bir malzeme kontrollü olarak yerleştirilebilir,
- Zayıf zemin üzerine inşa edilecek yapı zeminden beklenen davranışa uyum sağlayabilecek, biçimde tasarlanabilir,
- Yetersiz ve zayıf zeminin çeşitli yöntemlerle, yerinde iyileştirilmesine başvurulabilir.

Zemin, üzerine yapıların oturtulduğu, yapı yükünü taşıyan taneli boşluklu doğal malzemelerdir. Zemin taneleri kayaçların fiziksel parçalanması ve kimyasal ayrışması sonucu meydana gelir. Zeminler üzerine yapılması düşünülen yapıları taşıma gücü açısından elverişsiz ise gelen yükleri güvenle taşıyamayabilir. Bu tür problemlili zeminlerde stabilizasyon önemlidir. Stabilizasyon (ıslah, iyileştirme, sağlamlaştırma, vb.); zeminin özelliklerinin, çeşitli yöntemlerle iyileştirilmesine verilen genel addır. Stabilizasyonda amaç, işin özelliğine göre; taşıma gücünü artırmak, beklenen oturmaları, deformasyonları azaltmak, geçirimliliği azaltmak, vb. olabilir.

Zemin iyileştirmesine ihtiyaç durumu, zayıf ve sorunlu zeminlerin özelliklerinin proje şartlarıyla birlikte değerlendirilmesiyle belirlenir. Öncelikle arazideki mevcut iyileştirilmemiş zemine ilişkin etütlerden elde edilen geoteknik veriler baz alınarak statik ve dinamik yükler altında analiz ve değerlendirmeler yapılır.

Zemin iyileştirme yöntemlerinde temel amaç, mekanik araçlarla zeminin boşluk oranının azaltılması veya zemin boşluklarının çeşitli bileşimdeki karışımlarla doldurulması işlemidir. Zemin iyileştirme yöntemleri aşağıdaki amaçlarla yapılır:

- Zayıf zeminin taşıma kapasitesini artırmak,
- Toplam oturmayı azaltıp konsolidasyonu hızlandırmak,

- Dolgu ve şevlerin stabilitesini sağlamak,
- İstinat duvarlarını desteklemek,
- Zeminin potansiyel sıvılaşma riskini azaltmak.

Problemlili zemine ıslah yöntemleri uygulandığında zeminin:

- Kayma mukavemeti artar,
- Kumlu zeminlerin sıkılığı, killi zeminlerin kıvamı iyileşir,
- Sıkışabilirliği azalır,
- Şişme ve büzülme potansiyeli düşer,
- Permeabilitesi azalır,
- Borulanmaya karşı mukavemeti artar,
- Sıvılaşma potansiyeli azalır.

Zemin iyileştirme yöntemleri başlıca üç ana grupta toplanabilir:

- İnşaat sırasında uygulanan geçici stabilizasyon,
- Katkı malzemesi kullanmadan mekanik etkiler uygulanarak yapılan kalıcı

Stabilizasyon

- Katkı malzemesi kullanılarak yapılan kalıcı stabilizasyon

Zemin iyileştirme yöntemleri, uygulama derinliğine bağlı olarak sınıflandırılabilir:

- Derin iyileştirme yöntemleri
- Yüzeysel iyileştirme yöntemleri

Stabilizasyon yöntemleri (Tablo 1.7)'de verilmiştir.

Tablo 1.7. Stabilizasyon yöntemleri.

Stabilizasyon		
➤ Yüzeysel Stabilizasyon	➤ Katkısız Stabilizasyon	➤ Kompaksiyon ➤ Drenaj ➤ Vb.
	➤ Katkılı Stabilizasyon	➤ Mekanik stab. ➤ Çimento ile stab.

Tablo 1.7' in devamı.

➤ Derin Stabilizasyon	➤ Kohezyonsuz zeminler	➤ Kireç ile stab. ➤ Bitüm ile stab. ➤ Vb. ➤ Derin kompaksiyon ➤ Derin vibrasyon ➤ Kompaksiyon kazıkları ➤ Patlayıcılar ➤ Enjeksiyon ➤ Vb.
	➤ Kohezyonlu zeminler	➤ Ön yükleme yöntemi ➤ Kum drenleri yöntemi ➤ Elektro – osmoz yöntemi ➤ Isı ile stabilizasyon ➤ Vb.

---

Zemin iyileştirme yönteminin seçimini etkileyen faktörler şunlardır:

- Zemin veya kayanın düşey ve yatay yönde değişimi ve özellikleri (ince tane yüzdesi, kıvam, normal konsolide/aşırı konsolide olma, süreksizlikler vb.)
- Yeraltı suyu durumu
- Öngörülen iyileştirme seviyesi (büyüklüğü)
- Farklı yöntemlerle elde edilebilecek iyileştirmelerin görece büyüklüğü ve yararı
- İyileştirilmesi hedeflenen alan ve derinlik
- Yapıma ilişkin faktörler (iş planı, ulaşılabilirlik, malzemeler, geçit hakkı ekipman ve işgücü temini vb.)
- Çevresel faktörler
- Maliyet
- Yeni veya mevcut yapılarla etkileşim
- Sonuçların kontrol edilebilirliği

- Bakım, dayanıklılık ve işletme gereksinimleri

Bazı yöntemler bazen tek zemin tipi için uygun olurken, bazıları geniş aralıkta farklı zeminlere uygulanabilmektedir.

Eğer temel zemininin şişme potansiyeli bulunuyorsa, bazı önlemlerin alınması gereklidir. Örneğin, bu şişen zeminin yerinden kaldırılması, yapısını değiştirerek şişme potansiyelini azaltacak işlemlerin gerçekleştirilmesi, inşaat sonrasında yapı temeli altındaki zeminin su muhtevasının kontrol altında tutulması vb. alınabilecek önlemlerden bazılarıdır. Şişen zeminlerin yapısı kompaksiyon yöntemleriyle değiştirilebilir. Ayrıca ön ıslatma yöntemiyle önceden şişmesi sağlanabilir. Şişen killerin kimyasal katkı malzemeleriyle iyileştirilmesi de çok kullanılan yöntemlerdendir. Kireç veya çimento, su ile birlikte zemine karıştırıldığında, zeminin bir çok özelliğinde iyileşme elde edilir (Yılmaz ve Karacan, 1998). Şişen zeminlerin iyileştirme yöntemlerinden bazıları aşağıda verilmiştir:

- Kimyasal katkı malzemeleri ile iyileştirme
- Ön ıslatma
- Sıkışma kontrolü
- Ön yükleme
- Su muhtevasının korunması

### **1.5.1. Şişen Zeminlerin Stabilizasyon Teknikleri**

Zeminlerin şişme sonucu hacim değiştirme kapasitesine sahip olması mühendislik yapıları uygulamalarında ciddi problemlere sebep olmakta ve büyük hasarlar meydana getirmektedir. Bu gibi durumlarda şişen zeminlerin iyileştirme yöntemlerine gidilmesi gerekmektedir. İyileştirme yöntemleri mekanik ve kimyasal olmak üzere iki başlık altında toplanarak uygulama çeşidi yapı tipi, zemin türü, kullanılacak malzemenin temin edilebilirliği ve ekonomi gibi sebeplere bağlı değişebilmektedir.

### **1.5.1.1. Mekanik Stabilizasyon**

#### **1.5.1.1.1. Şişen Zemini Kaldırma ve Yer Değiştirme**

Şişen bir zemin üzerine inşa edilecek mühendislik yapısına ait temelin altındaki zemin ile şişme özelliği olmayan bir zemini yer değiştirmek suretiyle uygulanan bir yöntemdir. Eğer şişen zemin ince bir tabaka halindeyse tamamı kaldırılır, tabaka kalın ise yeterli kalınlık belirlendikten sonra sadece bu kısmın kaldırılması ilkesine dayanır. Doldurulacak kısım çok yüksek yoğunlukta sıkıştırılarak taşıma gücü yüksek bir tabaka elde edilir. Bu yöntemde özel ekipmanlar kullanılmadığından diğer yöntemlere nazaran daha ekonomiktir. Ayrıca uygulaması da çok zaman almadığından kısa sürede gerçekleştirilebilmektedir. Maliyeti artırmamak adına dikkat edilmesi gereken husus, doldurulacak malzemenin yapıya yakın yerde seçilmesidir.

#### **1.5.1.1.2. Kompaksiyonun Kontrol Edilmesi**

Şişen zeminlerin kompaksiyon kontrolü uygulaması kolay ve ekonomik yöntemlerden biridir (Holtz ve Gibbs, 1956). Kompaksiyon yani sıkıştırma ile zemin taneleri birbirlerine yaklaştırılır ve aradaki hava boşlukları azaltılarak daha sıkı bir zemin elde edilmesi sağlanır. Bu sayede zeminin birim hacim ağırlığı artarak mühendislik özellikleri iyileştirilmiş olur. Kompaksiyon ile zeminin taşıma gücü artar, zeminde olabilecek hacim artışlarının önüne geçilir ve geçirimsizlik azalır. Böylece zemin daha kararlı bir hale gelir.

#### **1.5.1.1.3. Ön İslatma**

Ön ıslatmanın temel amacı yapı inşa edilmeden önce, zeminin şişmesini sağlamaktır. Su içeriği fazla olan zeminlerin şişme miktarının daha az olacağı prensibine dayanır. Bölgenin su içeriğinde kalması sağlanarak veya havuz oluşturularak zemin ıslatılır. Suyun istenilen derinliğe kadar inebilmesi için kilin ince çatlaklı yapıda olması gerekir. Eğer değilse suyun emdirilmesi çok uzun zaman alır. Böyle durumlarda zemin ıslatılmadan önce drenaj kuyusu açılmalıdır. Böylece suyun istenilen derinliğe indirilmesi hızlanır. İslatma işlemi tamamlandıktan sonra kilin üst kısmına %4 oranında sönmüş kireç veya 10- 15 cm kalınlığında kum-çakıl ilave edilerek, buharlaşma engellenir ve zemin üzerinde uygun bir çalışma ortamı sağlanmış olunur.

#### **1.5.1.1.4. Su Muhtevası Kontrolü**

Su muhtevası kontrolünün amacı inşaat temeline etraftan gelebilecek su girişini önlemek ve zemini kuru tutmaktır. Bunun için temel zeminine hem yatayda hem de düşeyde geçirimsiz duvarlar ve drenaj sistemi uygulanır. Böylece temelin altında veya yanında suyun birikmesi engellenir. Yalıtım malzemeleri, hendekler, oluklar, kanal ve menfezler yeraltındaki ve yüzeydeki suların temelden uzaklaştırılmasında kullanılan drenaj yöntemleridir. İnşaat alanının yakın civarındaki yüzey sularının uzaklaştırılması da çok önemlidir. Yeraltında su birikimini önlemek için drenaj hendekleri açılarak temel altındaki zeminin su emmesi engellenir.

#### **1.5.1.2. Kimyasal Stabilizasyon**

Şişen zeminlerin etkilerini azaltmak amacıyla uçucu kül, çimento, kireç gibi kimyasal maddeler uzun yıllardan beri kullanılmaktadır ve etkili sonuçlar elde edilmektedir. Zeminin çimento ile iyileştirilmesi çok kullanılan yöntemlerden biridir. Kilin çimento ile iyileştirilmesinde alınan sonuçlarla kireçte alınan sonuçlar benzerlik gösterir. Fakat kireç ile iyileştirilemeyen zeminlerde çimento kullanımı daha başarılı olmaktadır.

Zeminin kireç ile iyileştirilmesinde, zemin sertleşerek plastik kıvamdan katı kıvama geçer ve böylece zeminin plastisite indisi azalır, plastik limit artar, likit limit azalır, böylece zeminin dayanımı artarak deformasyon azalır. Bu metot arazide uygulanırken killi zemin gevşetilerek zemine kireç serilir. Daha sonra zemin karıştırılarak sulama yapılır. En son olarak da zemin silindir yardımıyla iyice sıkıştırılır (Şekil 1.16).



Şekil 1.16. Şişen zeminlerin kireçle iyileştirilmesi (Demir ve Kılıç, 2010).

Yapılan çalışmalarda zeminde kullanılacak %2 ile %8 arasındaki oranlarda eklenerek yapılan kireçle stabilizasyon şişmeyi ciddi oranlarda azaltmak dışında, şişen zeminin dayanımını ve optimum su içeriğini artırma gibi önemli katkılar da sağlamaktadır.

Zeminde meydana gelebilecek kabarmaları en aza indirmek amacıyla kullanılan uçucu kül, bağlayıcılık özelliği çok az olan, kireç veya su ile karıştırıldıklarında kimyasal reaksiyona girerek bağlayıcılık özelliği kazanan malzemelerdir. Uçucu kül zemine kil ile kireç arasında puzolanik reaksiyon gerçekleşmesini sağlayarak zeminin tane çapını artırmak için eklenir. Böylece zemin yapısı değiştirilerek etkili sonuçlar elde edilir.

### **1.6. Literatür Özeti**

Literatürde plastik atık katkılı kil zeminlerin geoteknik özellikleri ile ilgili çalışmalar sınırlı sayıdadır. Literatürde plastik atık kullanılarak zeminlerin mühendislik ve geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesi konusunda yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Ashraf vd (2011) yaptıkları çalışmada, atık plastik şişelerin takviyeli zemin örneklerinin performansı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Standart proktor deneyinden maksimum kuru yoğunluk ve optimum nem içeriği sırasıyla  $18.95 \text{ kN/m}^3$  ve %11.22

olarak elde edilmiştir. Laboratuvarında takviye edilmemiş ve takviyeli zemin-atık plastik şeritlerin karışımları üzerinde CBR ve plaka yükleme deneyleri yapılmıştır. Zemine %0.2 %0.4 %0.6 %0.8 %1.0 oranlarında plastik ilave edilmiştir. Plastik şeritler homojen olarak karıştırılmış ve optimum su muhtevasında sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan numuneler üzerinde CBR deneyi yapılmıştır. CBR deney sonucunda takviye edilmemiş zemin numunelerinin, takviyeli zemin numunelerine göre CBR değerleri karşılaştırılmıştır. Deney sonucunda, CBR değerlerinin %0.6 plastik ile 1,967'den 2,479'a yükseldiği ve daha sonra düştüğü gözlemlenmiştir. Zemine plastik şerit eklenmesiyle hazırlanan numuneler üzerinde yapılan plaka yükleme deneyi sonucunda plastikle stabilize edilmiş zeminde 4 mm oturmaya tekabül eden taşınan yükün düz zemine göre çok daha fazla olduğu ve dolayısıyla zeminin taşıma kapasitesinde önemli bir artış olduğu görülmüştür.

Kar vd (2012) yaptıkları çalışmada, sıkıştırılmış killerde rastgele lif ilavesinin kilin konsolidasyon özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Deneyde polipropilen ve hindistan cevizi lifleri kullanılmıştır. Kullanılan zemin sınıfı CL olarak bulunmuştur. Zemine %0, %0.2 %0.4 %0.6 %0.8 %1.0 oranlarında lif ilave edilmiştir. Lifler homojen olarak karıştırılmış ve optimum su muhtevasında sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan numuneler üzerinde konsolidasyon deneyi yapılmıştır. Konsolidasyon deney sonucunda takviye edilmemiş zemin numunelerinin, takviyeli zemin numunelerine göre sıkışma indisi ( $C_c$ ), hacim değişim katsayısı ( $m_v$ ) ve kabarma indisi ( $C_s$ ) değerleri karşılaştırılmıştır. Deney sonucunda zemine lif ilave edilmesiyle sıkışma indisi önce azalmış sonra tekrar artma meydana gelmiştir. Minimum  $C_c$  değeri, polipropilen ve hindistan cevizi elyafı ile güçlendirilmiş zemin için sırasıyla %0.6 ve %0.8 elyaf içeriğinde gözlenmiştir. Kabarma indisi ( $C_s$ ) lif oranının artmasıyla artmıştır. Hacimsel değişim katsayısı ( $m_v$ ) polipropilen lifler için %0.4'e, hindistan cevizi liflerinde ise %0.6'ya kadar azalmakta daha sonra artmaktadır. Ancak, artış oranı polipropilen lifler için daha fazladır. Deney sonucunda her iki lif tipinde de benzer sonuçlar görülmüştür.

Bahattara vd (2013) tarafından yapılan çalışmada, zayıf zeminlerin iyileştirilmesi için, CBR deneyi yapılarak, alışveriş poşetleri ve yerel olarak bulunan diğer plastik malzemeler gibi farklı plastik atık türleri katkısının zemine olan etkisini analiz edilmiştir. Zemin özelliklerini belirlemek için elek analizi ve proktor deneyleri yapılmıştır. Plastik şeritler, 10, 20, 30 ve 40mm uzunluğunda, 10mm genişliğinde kesilmiş ve %0, %0.25,

%0.50 ve %1.00 oranlarında kuru zemine homojen bir şekilde ilave edilmiştir. Deney sonuçlarına göre karışım numunelerinde plastik şerit miktarı arttıkça numunenin CBR değerini arttığı saptanmış ve plastik, killi zeminlerin iyileştirilmesi için takviye malzemesi olarak başarıyla kullanılabilir sonucuna ulaşılmıştır.

Kalumba ve Chebet (2013) yaptıkları çalışmada, alışveriş poşetlerinin atıklarının zemin iyileştirilmesinde alternatif malzeme olarak kullanılmasını araştırmıştır. Laboratuvarında takviye edilmemiş ve takviyeli zemin-plastik şeritlerin karışımları üzerinde kesme kutusu deneyi yapılmıştır. Plastik şeritler, 15, 30 ve 45 mm uzunluğunda, 6, 12 ve 18 mm genişliğinde kesilmiş ve %0.1, %0.2 ve %0.3 oranlarında kuru zemine homojen bir şekilde ilave edilmiştir. Kesme kutusu deneyi, numune ortalama  $1700 \text{ kg/m}^3$  yoğunluğa sıkıştırılmış ve deneyler 1.2 mm/dk'lık yükleme hızında ve 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa'lık normal gerilmelerle yapılmıştır. Hazırlanan numuneler üzerinde yapılan deney sonuçlarına göre plastik şeritler ilavesiyle zeminin içsel sürtünme açısı artmış ve içsel sürtünme açısının maksimum değerinin 30 mm uzunluğunda ve %0.1 plastik şerit ilavesinde bulunmuştur. Deneyler sonucunda, Yeni bir iyileştirme tekniği olan bu uygulamanın geoteknik alanında sızdırmayı engellemek amacıyla kullanılabileceği ve tekniğin geliştirilmesi için farklı zemin cinslerinde farklı plastik çeşitleri kullanılarak daha fazla çalışmaya gerek olduğu önerisinde bulunulmuştur.

Maheshwari vd (2013) yaptıkları çalışmada, lif değişkenlerinin (içerik ve uzunluk) lif takviyeli zemin örneklerinin performansı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Zemin özelliklerini belirlemek için elek analizi, kıvam limit testleri yapılmıştır. Zemin %8 kum, %66 silt, %25 kil oranlarından oluşmaktadır. Likit limiti %52.9 plastik limiti %27.5 oranlarında bulunmuştur. Polyester lifler, %0, %0.25, %0.50, %0.75, %1.00 ve %1.50 oranlarında kuru zemine homojen bir şekilde elle karıştırılmıştır. Uzunluğu 12,1 mm olan, polyester lifler kullanılmıştır. Çalışmada CBR, kompaksiyon, konsolidasyon ve üç eksenli deneyler yapılmıştır. Kompaksiyon deneyi sonucunda lif içeriğinin artması kuru yoğunluğu etkilememiştir. Artan lif içeriğine birlikte optimum su muhtevası artmıştır. CBR değeri, lif içeriğinin %0.50'ye kadar artmasıyla artmış ve daha sonra lif oranının %0.50'in üzerinde çıkmasıyla CBR değerinin azaldığı gözlenmiştir. Serbest basınç mukavemetinin zemine %0.5 oranına kadar polyester lifin eklenmesi zeminin mukavemet değerini artırmıştır. Üç eksenli deney sonucunda lif içeriğinde artış ile c değerinde biraz

artış olmuştur. Ancak  $\phi$  değeri, lif içeriğinde %0.50'a kadar olan artış ile kayda değer bir şekilde artmış, ardından %1.00'da hem c, hem de  $\phi$  değeri düşmüştür. Konsolidasyon deneyi sonucunda  $C_c$  sıkışma indisi, %0.50'a kadar olan liflerin katılımıyla azalmış ve daha sonra, liflerin %0.50'ın üzerine ilave edilmesiyle, sıkışma indisi  $C_c$ 'de artış olmuştur.

Kalumba ve Chebet (2014) yaptıkları çalışmada %0.1, %0.2 ve %0.3 katkı oranlarında 15, 30, ve 45 mm uzunluğa ve 6, 12 ve 18 mm genişliğe sahip plastik şerit yerel kumun numunelerinin kayma dayanımı ve taşıma kapasitesine özelliklerine araştırılmışlardır. Kesme deneyi için hazırlanan numuneler 100 mm x 100 mm boyutlarında kalıplara statik sıkıştırma uygulanarak yerleştirilmiştir. Deney 25 kPa, 50 kPa ve 100 kPa gerilmelerde 1,2 mm/dak yatay ileri yer değiştirme hızında yapılmıştır. Plaka yükleme deneyi için hazırlanan numuneler 150 x 100 x 16 mm ve 150 x 50 x 16 mm boyutlarında 1,2 mm/dak yatay ileri yer değiştirme hızında kalıplara yerleştirilmiştir. Yapılan deney sonuçlarına göre kesme dayanımı maksimum değerinin 15mm uzunluğunda, 6mm genişliğinde ve %0.1 plastik şerit ilavesinde bulunmuştur. Çalışma sonunda plastik-kum zemin karışımlarında taşıma gücünü artırdığı sonucuna varılmıştır.

Manuel ve Joseph (2014) yaptıkları çalışmada, plastik katkısının killi zeminlerin geoteknik davranışı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Killi zemin, geoteknik özellikleri belirlemek için özgül ağırlık, elek analizi, hidrometre, likit limitleri ve standart proktor testine tabi tutulmuştur. Kullanılan kil (CH) olarak sınıflandırılmıştır. Zeminin likit limiti %171, plastik limiti %45, plastisite indisi %126 ve özgül ağırlığı 2,56 olarak belirlenmiştir. Zemin özelliklerini iyileştirilmesi için uzunluğunu 25 mm ve genişliği 10mm olan plastik şeritlerden faydalanılmıştır. Kuru zemin ağırlığının %0, %0.25, %0.5, %0.6, %0.75 ve %1 oranında plastik şerit eklenmiştir. Proktor deneyi sonucunda plastik içeriğinin artması kuru yoğunluğu %0.6'ye kadar artmasıyla artmış ve daha sonra azaldığı gözlenmiştir. CBR değeri, plastik içeriğinin %0.6'ye kadar artmasıyla artmış ve daha sonra CBR değerinin azaldığı gözlenmiştir. Serbest basınç mukavemetinin zemine %0.6 oranına kadar plastik şerit eklenmesi zeminin mukavemet değerini artırmıştır. Üç eksenli deney sonucunda plastik içeriğinde artış ile hem c değerinde hem de  $\phi$  değeri biraz artış olmuştur.

Poweth vd (2014) çalışmalarında, plastik katkılı zayıf zeminlerin mühendislik özelliklerini araştırmıştır. %0, %0.25, %0.5 ve %0.75 oranlarında plastik kattıkları zeminler üzerinde standart proktor, CBR ve kesme kutusu deneyleri uygulamışlardır. Çalışma sonucunda, karışım numunelerinde maksimum kuru yoğunluk ve kayma mukavemeti değerinin %0.25 plastik ilavesinde bulunmuştur. CBR değerlerinin %0,5 plastik ile düştüğü ve daha sonra %0,75 oranda yükseldiği tespit edilmiştir.

Pal vd (2015) çalışmalarında, Haryana'dan (Hindistan) elde edilen killi zeminin çeşitli özelliklerinin iyileştirilmesi için polipropilen atık liflerinin kullanımını araştırmak için kapsamlı bir laboratuvar çalışması yapılmıştır. Killi zemin, geoteknik özellikleri belirlemek için özgül ağırlık, elek analizi, likit limitleri ve standart proktor deneyine tabi tutulmuştur. Kullanılan kil (CL) olarak sınıflandırılmıştır. Zeminin likit limiti %28.10, plastik limiti %16.26, plastisite indisi %11.84 ve özgül ağırlığı 2,62 olarak belirlenmiştir. Laboratuvarında takviye edilmemiş ve takviyeli zemin- polipropilen atık liflerinin karışımları üzerinde standart proktor, kesme kutusu ve serbest basınç deneyi yapılmıştır. Polipropilen atık liflerinin, 10, 20 ve 30 mm uzunluğunda kesilmiş ve %0, %0.15, %0.25 ve %0.35 oranlarında kuru zemine homojen bir şekilde ilave edilmiştir. Proktor deneyi sonucunda, polipropilenin atık liflerinin eklenmesiyle maksimum kuru yoğunlukta ( $\gamma_{dmax}$ ) bir azalma olduğu sonucuna varılmıştır. Kesme kutusu deney sonucunda, 20mm uzunluğunda ve ağırlıkça %0.35 polipropilen içeren zeminin c değerinde %46.88,  $\phi$  değerinde %25.18 artış olmuştur. Serbest basınç deney sonucunda, 20 mm uzunluğunda ve ağırlıkça %0.25 polipropilen içeren zeminin serbest basınç mukavemetinde %52.80 artış olmuştur. Hazırlanan numuneler üzerinde yapılan deney sonuçlarına göre polipropilen atık liflerinin Haryana'dan (Hindistan) toplanan kili zeminin stabilizasyonunda kullanılabileceğini göstermiştir.

Alpyürür (2016) yaptığı çalışmada, gazbetonun zemin iyileştirmesinde kullanımını araştırmak için kapsamlı bir laboratuvar çalışması yapılmıştır. Gazbeton öğütülerek kullanılmış ve düşük plastisiteli kil, yüksek plastisiteli kili ve kum zeminler ile karıştırılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler, düşük plastisiteli kil, yüksek plastisiteli kili ve kum numunelerine ek olarak ağırlıkça %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında gazbeton kuru zemine homojen bir şekilde ilave edilmiştir. Deneysel çalışmalarda, elek analizi, hidrometre, kompaksiyon, serbest basınç, kesme kutusu, CBR

ve şişme basıncı deneyi yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre, gazbetonun problemlili zeminlerin iyileştirmesinde katkı maddesi olarak kullanılabilceği, özellikle düşük mukavemet ve yüksek şişme potansiyeline sahip zeminlerde etkili olabileceği belirlenmiştir.

Damion vd (2016) tarafından yapılan çalışmada, yaptığı çalışmada, atık plastik, zeminin sıkıştırma özellikleri, CBR değerleri ve permeabilite üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Zemin parametlerini belirlemek için elek analizi, kıvam limitleri ve hidrometre deneyleri yapılmıştır. Plastik şeritler, 10, 30, 40 mm uzunluğunda, 10mm genişliğinde kesilmiş ve %0, %0.25, %0.50 ve %1.00 oranlarında kuru zemine homojen bir şekilde ilave edilmiştir. CBR değeri, plastik içeriğinin %0.5'ye kadar artmasıyla artmış ve daha sonra CBR değerinin azaldığı gözlenmiştir. Deney sonuçlarına göre karışım numunelerinde plastik şerit miktarı arttıkça numunenin CBR değerini arttığı, alt zemini geçirimsiz hale getirdiği saptanmış ve plastik, zeminlerin iyileştirilmesi için takviye malzemesi olarak başarıyla kullanılabilir sonucuna ulaşılmıştır.

Fauzi vd (2016) tarafından yapılan araştırmada, atık plastik polietilen (HDPE) ve atık kırma camın zayıf zeminlerin iyileştirilmesi üzerine etkisini araştırmıştır. Killi zemin, geoteknik özellikleri belirlemek için özgül ağırlık, elek analizi, kıvam limitleri ve standart proktor deneyine tabi tutulmuştur. %4, %8 ve %12 oranlarında atık plastik ve kırma cam kattıkları zeminler üzerinde standart proktor, CBR ve üç eksenli deneyleri uygulamışlardır. Araştırmacıya göre karışım numunelerinde HDPE ve kırma cam miktarı %12'ye arttıkça numunenin maksimum kuru yoğunluk ve optimum su değerleri arttığı saptanmıştır. Karışım numune içeriğindeki HDPE ve kırma cam oranının artması CBR değerini artmıştır. Tüm numuneler için atık HDPE ve Cam içeriği arttıkça c ve  $\phi$  değerinin sırasıyla azaldığı ve arttığı gözlemlenmiştir. Deney sonuçlarına göre, HDPE, zemin takviye malzemesi olarak başarıyla kullanılabilir sonucuna ulaşılmıştır.

Mai vd (2017) çalışmalarında, plastik şişe şerit takviyeli zemin örneklerinin performansı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Zemine %1 ve %2 oranlarında plastik ilave edilmiştir. Plastik şeritler homojen olarak karıştırılmış ve optimum su muhtevasında sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan numuneler üzerinde standart proktor, kesme kutusu, serbest basınç, serbest şişme ve CBR deneyi yapılmıştır. Deney sonucunda, artan plastik içeriğiye

birlikte CBR değeri artmış ve alt zemini geçirimsiz hale getirdiği saptanmıştır. Deney sonuçları analiz edildikten sonra, zemine plastik şeritler ilave edilmesinin, zemin özellikleri üzerinde olumlu bir etkisi olduğu tespit edilmiştir ve ayrıca plastik atık şişşelerinin doğaya verilen zararların azaltılacağını vurgulamıştır.

Gencer (2018) tarafından yapılan araştırmada, ponza katkılı kil zeminlerin biyopolimer ile etkileştirilmesi sonucu elde edilen numunelerin geoteknik özellikleri incelenmiştir. Bu amaçla yüksek plastisiteli kil (CH) ponza tozu ile (%5, %15, %25) yüzdelerde karıştırılmış, daha sonra elde edilen ponza katkılı killere (%0,5, %1, %1,5) yüzdelerde biyopolimer eklenmiştir. Deney sonuçları, biyopolimer katkılı kil - ponza karışımlarının likit limit değerlerinin doğal kile göre arttığını, numunelerin non-plastik özellik sergilediğini göstermiştir. Ayrıca biyopolimer yüzdesindeki artışla numunelerin serbest basınç mukavemetleri artmış, hidrolik iletkenlik değerlerinde azalma görülmüştür.

Kumar vd (2018) çalışmasında, zemin sınıfı ML olarak belirlediği doğal zemini proktor sıklılığında hazırlamış ve numunelerine plastik şerit ekleyerek standart proktor ve CBR deneyi uygulamıştır. Plastik şeritler, 1, 2, 3 cm uzunluğunda kesilmiş ve %0, %0.2, %0.50 ve %0.80 oranlarında kuru zemine homojen bir şekilde ilave edilmiştir. Standart proktor deney sonucuna göre karışımdaki plastik oranı arttıka maksimum kuru birim ağırlılığı azalmakta, optimum su içeriği ise artmaktadır. Plastik-doğal zemin karışımı üzerine CBR deneyleri yapılmıştır. Deney sonucunda, artan plastik içeriğiye birlikte CBR değeri artmış ve en iyi sonuç 2cm uzunluğunda ve %0.8 plastik oranında elde edilmiştir.

Saravanan ve Ravindraraj (2018) yaptıkları çalışmada, plastik şişşelerin, zeminin mukavemet davranışına etkisini araştırmışlardır. Doğal zemin numunelerine plastik şerit ekleyerek CBR deneyi uygulamıştır. Zemine %0, %0.2 %0.4, %0.6 ve %1 oranlarında plastik ilave edilmiştir. CBR deneyi zeminin optimum su içeriği ile karıştırılmasıyla gerçekteştirilmiştir. CBR değerlerinin %0,6 plastik ile 1,967'den 2,479'a yükseldiği ve daha sonra azaldığı gözlemlenmiştir.

Demir (2019) tarafından yapılan araştırmada, ferrosilisyum alaşımlarının ve silisyum metalinin üretiminde endüstriyel atık olan silis dumanı ile mermer stabilizasyonunda puzolonik katkı olarak kullanılmıştır. Tozu killi bir zeminin birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine göre yüksek plastisiteli killi bir zeminin

stabilizasyonunda kullanılan mermer tozu ve silis dumanı %0, %5, %10, %15, %20 doğal malzeme ile kireçsiz ve %6 kireçli olarak karıştırılmıştır. Hazırlanan karışımların durabilite ve dayanım gibi geoteknik özellikleri incelenmiştir. İncelenen numunelerin dayanım değerlerinde silis dumanının kireçle beraber kullanıldığında doğal zemine, mermer tozuna ve sadece kireçli karışımlara göre daha yüksek çıktığı gözlemlenirken, durabilite özelliklerinde ise mermer tozunun daha etkin olduğu söylenilebilir.

Farah ve Nalbantoglu (2019) yaptıkları çalışmada, plastik şişelerin, zayıf zeminlerin iyileştirilmesi üzerine etkisini araştırmıştır. Doğal zemin numunelerine plastik atık ekleyerek direkt kesme kutusu ve CBR deneyi uygulamıştır. Zemine %0, %0.5, %0.75 ve %1.0 oranlarında plastik ilave edilmiştir. Test sonuçlarına göre Kesme mukavemetini ve CBR değerini arttırmak için gerekli olan optimum plastik atık yüzdesi %0,75 olarak bulunmuş ve plastik atık takviyesinin, takviyeli kumun kesme mukavemetinin ve CBR değerinin iyileştirilmesine katkıda bulunduğunu göstermiştir.

Öztürk (2019) yaptıkları çalışmada, atık lastiklerin piroliz yöntemi kullanılarak geri dönüştürülmesi ile elde edilen karbon karasının yüksek plastisiteli kilin geçirimsizlik katsayısı üzerine olan etkisi incelenmiştir. Kil zemine ağırlıkça %1, %3 ve %5 oranlarında karbon karası katılarak karışımlar elde edilmiştir. Karışımlar üzerinde standart ve kompaksiyon deneyleri yapılarak her iki sıkıştırma enerjisi içinde optimum su içeri ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri belirlenmiştir. Daha sonra karışımlar 0, 5 ve 10 çevrim donma-çözölmeye maruz bırakıldıktan sonra bu numuneler üzerinde düşen seviyeli permeabilite deneyi yapılmış ve geçirimsizlik katsayısı belirlenmiştir. Yapılan laboratuvar deney sonuçlarına göre genel olarak standart ve kompaksiyon enerjisi altında sıkıştırılan numunelerin arasında tüm donma-çözölmeye çevrim sayılarında 0-5-10 çevrimlerde en düşük geçirimsizlik katsayısı değerini %1 karbon karasının katkılı numunelerin verdiği tespit edilmiştir.

Turan (2019) çalışmasında, bor üretiminde ortaya çıkan atık kil pestillerinin geoteknik özellikleri incelenmiştir. Bu amaçla bor atığı kil pestilleri üzerinde kıvam limitleri, standart proktor, serbest basınç, şişme basıncı ve geçirimsizlik deneyleri ile mineralojik analizler yapılarak bor atığı kil pestillerinin mühendislik özellikleri ortaya konmuştur. Daha sonra yüksek plastisiteli kile farklı oranlarda (%10, %30, %50 ve %70)

katılarak bor atığı katkıli killer elde edilmiş ve bu numuneler üzerinde geoteknik deneyler gerçekleştirilerek deney sonuçları doğal kile ait deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Deneyler sonucunda, Kestelek ve Bigadiç bor atıklarının yüksek plastisiteli kilin stabilizasyonunda katkı malzemesi olarak kullanılabileceği belirlenmiştir.

Yaşar (2019), çalışmasında, uçucu kül katkısının yüksek plastisiteli killi zeminin geoteknik özellikleri üzerindeki etkisi araştırmıştır. Kil zemine ağırlıkça sırasıyla %5, %10, %15 ve %20 oranlarında uçucu kül katılarak karışımlar elde edilmiştir. Elde edilen karışım numuneleri optimum su muhtevalarında sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan numuneler üzerinde konsolidasyon deneyi, CBR deneyi ve serbest basınç deneyi yapılmıştır. Deney sonucunda, CBR ve serbest basınç dayanımında önemli oranda artışlar gözlemlenmiştir. Killi zeminlere %10'a kadar katılan uçucu kül serbest basınç dayanımının arttığı, %10'dan sonra uçucu kül oranının artması ile serbest basınç dayanımı azaldığı görülmüştür.

Alpayrak ve Gencer (2020) yaptıkları çalışmada, yüksek plastisiteli kilin (CH) çeşitli özelliklerinin iyileştirilmesi için biyopolimer kullanımını araştırmak için kapsamlı bir laboratuvar çalışması yapılmıştır. Killi zemin, geoteknik özellikleri belirlemek için özgül ağırlık, elek analizi, likit limitleri ve standart proktor deneyine tabi tutulmuştur. Laboratuvarında takviye edilmemiş ve takviyeli zemin- biyopolimer karışımları üzerinde likit limit, standart proktor, şişme basıncı, serbest basınç, hidrolik iletkenlik ve SEM deneyleri yapılmıştır. Biyopolimer %0, %0.5, %1 ve %1.5 oranlarında kuru zemine homojen bir şekilde ilave edilmiştir. Hazırlanan numuneler üzerinde yapılan deney sonuçlarına göre biyopolimer kili zeminin stabilizasyonunda kullanılabileceğini göstermiştir.

Aslan topçuoğlu (2020) tarafından yapılan çalışmada, sönmüş kireç, uçucu kül, silis dumanı ile asidik ve bazik karakterli tüflerin bentonit kilinin geoteknik özellikleri üzerine etkisini araştırdığı doktora çalışmasında, kür uygulamasının dayanımı ve dayanım parametrelerini artırdığını, stabilizasyon sonrasında katkıli örneklerde Plastisite İndisindeki azalmanın %60'tan fazla olması durumunda kohezyon ve içsel sürtünme açısının ve dolayısıyla serbest basınç dayanımının önemli oranda arttığı serbest basınç dayanımının değerlerinin artması için hem kohezyon hem de içsel sürtünme değerlerinde artış olması gerektiğini belirlemiştir.

Aysu (2020) yaptığı çalışmada, yüksek plastisiteli kil zeminlerde cam lifi katkısının zeminin mukavemet, permeabilite ve konsolidasyon özelliklerine etkisi incelenmiştir. Çalışmada uzunluğu 12mm olan cam lifi kullanılmıştır. Numunelerdeki cam lifi oranı kil zeminin belli bir yüzdesi şeklinde %0.25, %0.50, %0.75, %1.0, %1.25 ve %1.50 oranlarında seçilmiş, kil zemin ile birlikte karıştırılarak ve karışım örnekleri optimum su içeriği kullanılarak hazırlanmıştır. Suya doymun hale getirilen katkılı ve katkısız kil numuneler üzerinde taşıma gücü, konsolidasyon ve geçirgenlik deneyleri yapılmış, belirli orandaki cam lifi katkısının kil zeminin taşıma gücü, oturma ve permeabilitesine etkisi incelenmiştir. Ayrıca yüksek plastisiteli kil zeminlerde cam lifi katkısının zeminin mukavemet, permeabilite ve konsolidasyon özelliklerini optimum şekilde sağlayan katkı oranını belirlenmiştir.

Keleş (2020) tarafından yapılan çalışmada, yüksek plastisiteli kiline ağırlıkça %10, %20 ve %30 oranlarda Bitlis pomzası, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında uçucu külü ve %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında Bitlis volkanik tüfü ayrı ayrı ilave edilerek kıvam limitleri, proktor, serbest basınç ve şişme basıncı deneyleri yapılmıştır. Daha sonra kireç ağırlıkça %6 oranında sabit tutularak aynı deney serileri tekrarlanmıştır. Serbest basınç mukavemeti açısından optimum oranlar belirlendikten sonra bu oranlarda serbest basınç numuneleri hazırlanıp 7, 14, 21, 90 ve 120 gün boyunca kuru bırakılıp serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Deneyler sonucunda, ikili ve üçlü karışımlarda Bitlis pomzası, uçucu külü ve Bitlis volkanik tüfü için optimum oranlar sırası ile %10, %15 ve %10 olarak belirlenmiştir. Bitlis pomzası, Afşin-Elbistan uçucu külü, Bitlis volkanik tüfü ve kireç katkılarının yüksek plastisiteli kilin stabilizasyonunda katkı malzemesi olarak kullanılabileceği belirlenmiştir.

Küçükaslan (2020) çalışmasında, katkı malzemesi olarak asidik karakterli tüfler ve bazik karakterli tüfler seçilmiştir. Yüksek plastisiteli bentonite farklı oranlarda eklenen bu tüflerin, bentonitin konsolidasyon özellikleri ile şişme potansiyeline olan etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla hazırlanan katkısız bentonit ve tüf katkılı örneklerde konsolidasyon deneyleri yapılarak, asidik ve bazik tüf katkısının killi zeminlerde konsolidasyon katsayısı  $C_v$  üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Ayrıca, şişme potansiyeline olan etkileri belirlemek amacıyla katkısız bentonit ve tüf katkılı örneklerde şişme basıncı ve şişme yüzdesi deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda, katkı oranının %5 olması

halinde asidik tüflerin bazik tüflere göre örneklerin  $C_v$  değerlerini daha fazla artırdığı ve şişme basıncını ise daha fazla azalttığı belirlenmiştir. Asidik ve bazik tüflerin şişme yüzdesi üzerindeki etkisi benzerdir ve katkı oranına bağlı olarak örneklerde şişme yüzdeleri azalma göstermektedir. Elde edilen sonuçlar hem asidik hemde bazik karakterli tüflerin yüksek plastisiteli killi zeminlerin konsolidasyon ve şişme potansiyeli üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Saravanan vd (2020) çalışmasında, killi zeminlerin geoteknik özelliklerini iyileştirmek için plastik atık etkisi incelenmiştir. Killi zemin, geoteknik özellikleri belirlemek için özgül ağırlık, elek analizi, likit limitleri ve özgül ağırlık deneyine tabi tutulmuştur. Doğal zemin numunelerine plastik atık ekleyerek standart proktor, serbest basınç ve CBR deneyleri uygulamıştır. Plastik şeritler, 8, 16, 24 mm uzunluğunda, 8mm genişliğinde kesilmiş ve zemine %0.5, %1, and %1.5 oranlarında plastik ilave edilmiştir. Standart proktor deney sonucuna göre karışımdaki plastik oranı arttıkça maksimum kuru birim ağırlığı azalmakta, optimum su içeriği ise artmaktadır. Deney sonuçlarına göre karışım numunelerinde plastik şerit miktarı arttıkça numunenin CBR değerini arttırdığı saptanmış ve serbest basınç mukavemetinin maksimum değerinin 8mm uzunluğunda, 8mm genişliğinde ve %1.5 plastik şerit ilavesinde bulunmuştur. Bu araştırmadan elde edilen sonuçlar, plastik killi zeminlere eklenmesinin geoteknik mühendisliğinde zemin iyileştirmesi için başarılı olacağını olumlu yönde göstermektedir.

Dehghanian (2021) çalışmasında, killi zeminlerin geoteknik özelliklerini iyileştirmek için uçucu külün etkisi incelenmiştir. Elek analizi, su içeriğinin belirlenmesi, kıvam limitleri, Standart Proktor ve üç eksenli kesme deneyleri kil örneklerinin %0, %5, %10, %15, %20 ve %25 uçucu kül ile karıştırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, killi zeminin uçucu kül kullanılarak etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir.

Gangwar ve Tiwari (2021) yaptıkları çalışmada, plastik atık takviyeli zemin örneklerinin performansı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Killi zemin, geoteknik özellikleri belirlemek için özgül ağırlık, elek analizi, likit limitleri, özgül ağırlık ve standart proktor deneyine tabi tutulmuştur. Kullanılan kil (CL) olarak sınıflandırılmıştır. Laboratuvarında takviye edilmemiş ve takviyeli zemin-atık plastik karışımları üzerinde

CBR, standart proktor ve serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Zemine %0, %0.5, %1, %1.5 ve %2 oranlarında plastik ilave edilmiştir. Plastik atık homojen olarak karıştırılmış ve optimum su muhtevasında sıkıştırılmıştır. Standart proktor deney sonucuna göre karışımdaki plastik oranı arttıkça maksimum kuru birim ağırlığı azalmakta, optimum su içeriği ise artmaktadır. Deney sonuçlarına göre karışım numunelerinde plastik şerit miktarı arttıkça numunenin CBR değerlerinin %1 plastik ile yükseldiği ve daha sonra azaldığı gözlemlenmiş ve serbest basınç mukavemetinin %0.5 plastik ile yükseldiği ve daha sonra azaldığı görülmüştür.

Hassan vd (2021) yaptıkları çalışmada, plastik atık takviyeli zemin örneklerinin performansı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Killi zemin, geoteknik özellikleri belirlemek için özgül ağırlık, elek analizi, likit limitleri, özgül ağırlık ve standart proktor deneyine tabi tutulmuştur. Kullanılan kil (CL) olarak sınıflandırılmıştır. Laboratuvarında takviye edilmemiş ve takviyeli zemin-atık plastik karışımları üzerinde CBR, standart proktor ve serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Zemine %1, %2, %3 ve %4 oranlarında plastik ilave edilmiştir. Laboratuvar test sonuçları, karışım numunelerinde plastik şerit miktarı arttıkça numunenin CBR değerini arttığı saptanmış ve serbest basınç mukavemetinin %1 plastik ile yükseldiği ve daha sonra azaldığı görülmüştür.

Mahmutluoğlu ve Bağrıaçık (2021) yaptıkları çalışmada, cam atık çamurunun, killi bir zeminin (CI) mukavemet ve konsolidasyon özelliklerine etkileri incelenmiştir. Malzemelerin özelliklerini belirleyebilmek için, Çukurova Üniversitesi zemin mekaniği laboratuvarında bir dizi deneyler gerçekleştirilmiştir. Kullanılan zemin orta plastisiteli kil olarak sınıflandırılmıştır. CI numunesinin dane birim hacim ağırlık, maks. kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası sırasıyla 27 kN/m<sup>3</sup> , 17,40 kN/m<sup>3</sup> ve %18.10 olarak, likit limit, plastik limit ve plastisite indisi değerleri ise, sırasıyla %42, %24 ve %18 olarak tespit edilmiştir. Çalışmada, kil-cam atığı karışımlarının en ideal su muhtevası, karışım oranları, mukavemet, oturma ve şişme değişimleri gibi özellikleri irdelenmiştir. Kullanılan cam atığının, kil zeminin mukavemet özelliklerinde gerçekleştirdiği değişimleri belirleyebilmek için serbest basınç deneyleri yapılmıştır ve %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında karışımlar yapılarak oluşturulan numunelerde kompaksiyon deneyleri yapılmış ve optimum su miktarları belirlenmiştir. Konsolidasyon deneylerinde iç çapı 50 mm, yüksekliği 20 mm olan halkalar kullanılmıştır. Deneyler

tamamlandıktan sonra, yük-boşluk oranı grafikleri çizilerek tüm numuneler için şişme basınçları da hesaplanmıştır. Mikro-yapı analizleri gerçekleştirilerek, söz konusu zeminin iç yapısı ve iç-yapı değişimleri gözlemlenmiş ve sonuçta killerin cam atığı ile iyileştirilebileceği, çevre-dostu bir yaklaşım ile vurgulanmıştır.

Yılmaz (2021) tez çalışmasında, yüksek fırın cürufu ve nano-SiO<sub>2</sub> ile stabilize edilen yüksek plastisiteli zeminin bir boyutlu oturma davranışı incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda, yüksek fırın cürufu ve yüksek fırın cürufu ile nano-SiO<sub>2</sub> karışımının stabilizasyona etkisi ayrı ayrı incelenmiştir. Bu kapsamda, yüksek plastisiteli zemine dört farklı oranda yüksek fırın cürufu %10, %20, %30 ve %40 ve aynı cüruf oranlarına küçük miktarlarda %1 ve %1.5 nano-SiO<sub>2</sub> eklenerek iki farklı numune hazırlanmıştır. Deneysel çalışmaların ilk aşaması olarak, kullanılan malzemelere XRF, XRD, SEM ve lazer kırınım testleri yapılarak malzemelerin fiziksel ve özellikleri tespit edilmiştir. Sonrasında, stabilize zeminlerin indeks özelliklerini ve hacimsel değişimini değerlendirmek için kıvam limitleri, proktor, konsolidasyon ve şişme deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları hem yüksek fırın cürufu hem de cüruf ile nano-SiO<sub>2</sub> karışımlarının plastisitenin azaltılması, yoğunluğun artırılması, konsolidasyon oturmaları ve şişme yüzdelerinin azalmasında etkili olduğunu göstermektedir. Ayrıca, genel olarak yüksek fırın cüruf ile %1 nano-SiO<sub>2</sub> karışımının, %1.5 oranına göre daha etkili olduğu görülmüştür.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 2.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

#### 2.1.1. Şişen Kil Zemin

Bu çalışmada, kullanılan zemin numunesi, Samsunun İlkadım ilçesine bağlı Kıran Mahallesi bölgesinden 1.5 m derinlikten örselenmiş örnek olarak alınarak, (Şekil 2.1, Şekil 2.2 ve Şekil 2.3) Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarına getirilmiştir. Laboratuvara getirilen zemin numuneleri öncelikle havada kurumaya bırakılmış ve daha sonrasında uygulanacak deneylerin koşullarına göre etüvde kurutulmuş kullanılmıştır.



Şekil 2.1. Etüvde kurutulmuş doğal kil zemin.



Şekil 2.2. Zemin numunesinin alındığı saha görüntüsü.



Şekil 2.3. Zemin numunesinin alındığı alana ait yer bulduru haritası.

### 2.1.1.1. Zeminin Sınıflandırılması

Doğal malzemenin tane dağılımı eğrisini çizebilmek amacıyla iri taneli kısma yıkamalı elek analizi, ince taneli kısma ise hidrometre deneyi TS 1900-1 (2006) standartına uygun olarak yapılmıştır.

Yıkamalı elek analizi, zeminin 200 No.lu elek üstünde yıkanması ile ince taneli malzemenin arındırılması, kalan iri taneli malzemesinin kurutulup tekrardan elenmesi yöntemidir. Doğal zeminde bulunan taneleri temsil edecek şekilde alınan kuru numune 200 No.lu elek üstünde yıkanarak ince tanelerinden arındırılan numune kurutulmuş ve daha sonra farklı gözenek açıklıklarına sahip elek setinden elenmiştir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Elek analizinde kullanılan elekler.

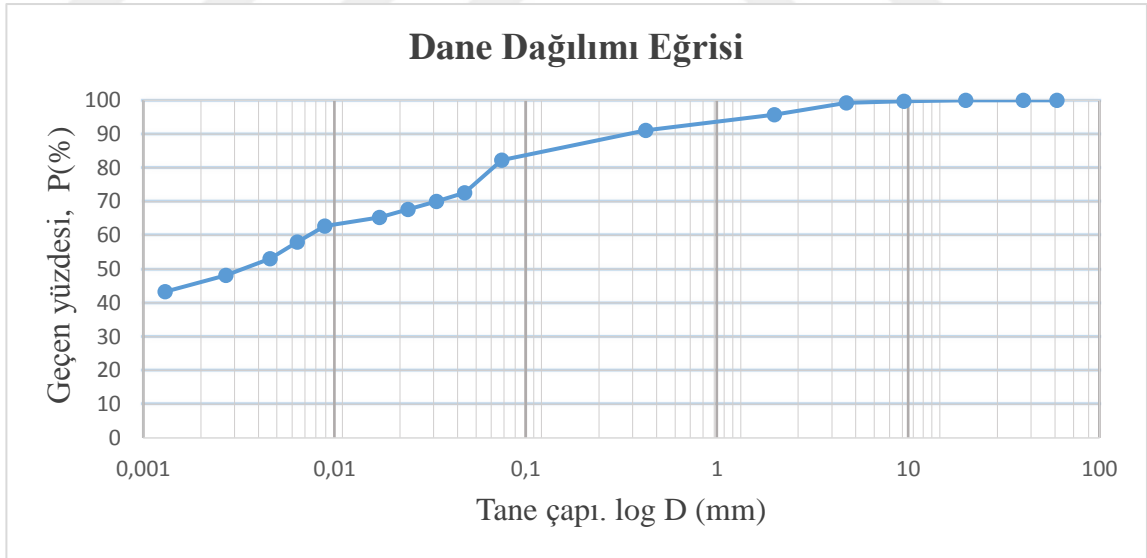
İnce tanelerin tane çapı dağılımının belirlenmesinde ıslak analiz yöntemleri uygulanmaktadır. Hidrometre yöntemi, ıslak analiz için kullanılan yöntemlerden biridir.

Hidrometre deneyi için 200 No.lu elek altına geçen zeminden 50 gr alınarak, sodyumhegzametafosfat çözeltisinde 1 gün bekletilmiştir. Çözelti içinde birbirinden ayrılan kil, hidrometre deneyine tabi tutulmuştur ve 24 saat boyunca hidrometre okumaları alınmıştır (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Hidrometre deneyi.

Zeminin elek analizi ve hidrometre sonuçlarına göre dane dağılımı eğrisi belirlenmiş ve Şekil 2.6’de gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Doğal zemine ait dane dağılımı eğrisi.

Şekil 2.6’de görülen dane dağılımı eğrisi dikkate alınarak MIT (Massachusetts Teknoloji Enstitüsü)’e göre (Tablo 2.1) doğal zemindeki çakıl, kum, silt ve kil yüzdeleri Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.1. MIT sınıflandırması.

Zemin Cinsi	Tane Çapı, mm
Blok	>200
Taş	200 - 60
Çakıl	60 - 2
Kum	2 - 0,06
Silt	0,06 - 0,002
Kil	<0,002

Tablo 2.2. Doğal zeminin MIT zemin sınıflandırma sistemlerine göre içerdiği zemin sınıflarının yüzdeleri.

Sınıflandırma Sistemi	Çakıl (%)	Kum (%)	Silt (%)	Kil (%)
MIT	4.28	20.72	28	47

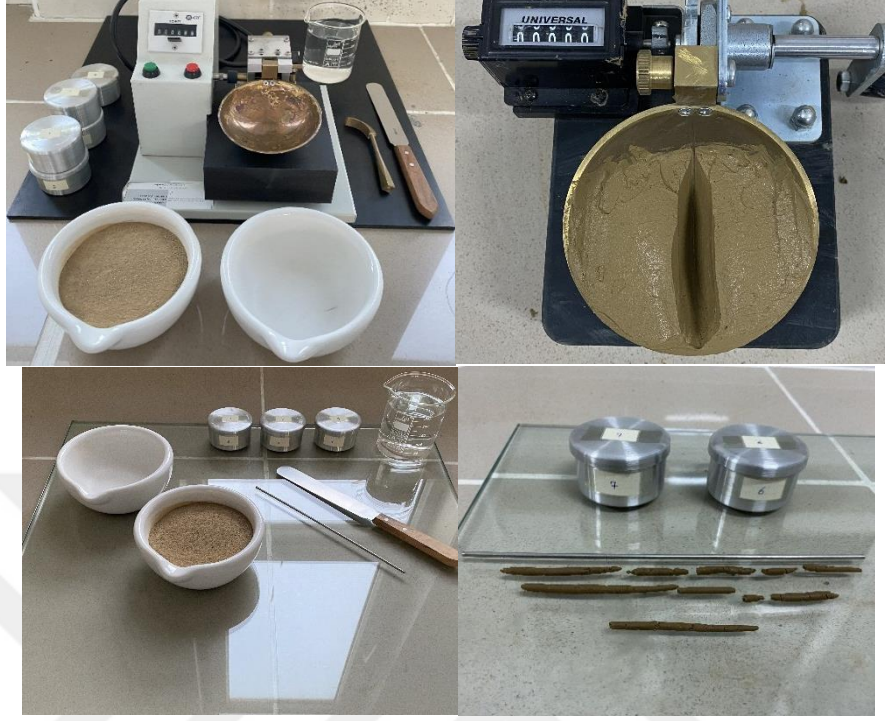
#### 2.1.1.2. Kıvam Limitleri

TS 1900-1 (2006) standartına uygun olarak yürütülen kıvam limitleri deneyinde, örselenmiş olarak alınan ve 40 no.lu elekten geçen etüv kurusu zemin numuneleri bir gün süreyle küre bırakıldıktan sonra likit limit ve plastik limit deneyleri yapılmıştır (Şekil 2.7). Likit limit deneyi Casagrande deney aleti kullanılarak yapılmıştır ve 5 farklı numune üzerine uygulanarak tekrar edilmiştir. Deney sonunda elde edilen darbe sayısı ve buna karşılık gelen su muhtevası değerleri ile akış eğrisi çizilmiştir. Çizilen grafikte 25 vuruşa karşılık gelen su muhtevası zeminin likit limitini belirlenmiştir. Likit limitin deney sonuçları Şekil 2.8’ de verilmiştir.

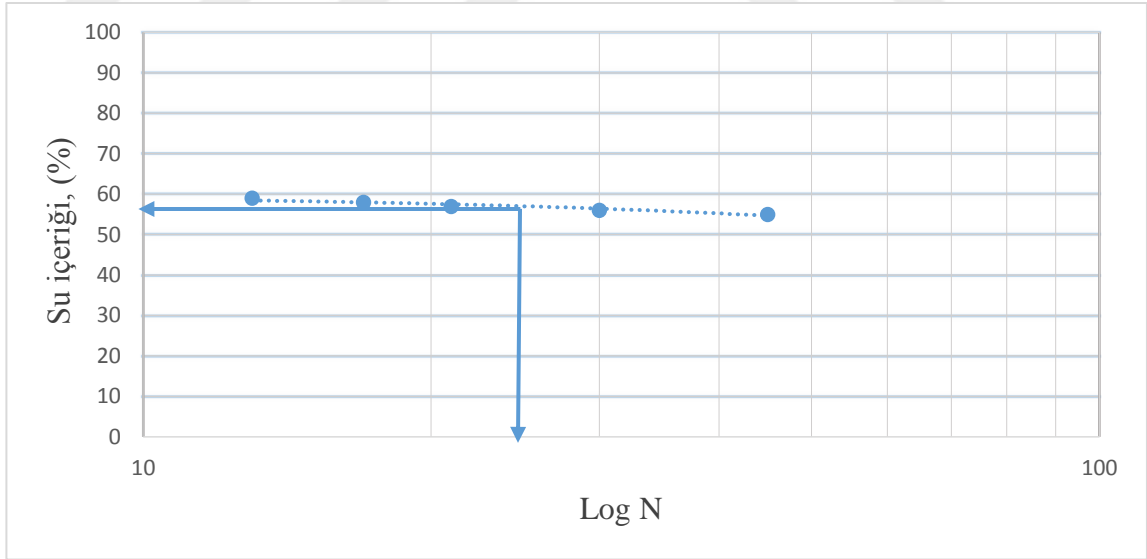
Deney sonuçlarında hesaplanan su muhtevalarına göre zeminin likit limiti %56.7, plastik limiti %24.4 ve plastisite indisi ise %32.3 olarak bulunmuştur (Tablo 2.3).

Tablo 2.3. Doğal zeminin kıvam limitleri.

Likit Limit, LL (%)	Plastik Limit, PL (%)	Plastisite İndisi, IP (%)
56.7	24.4	32.3

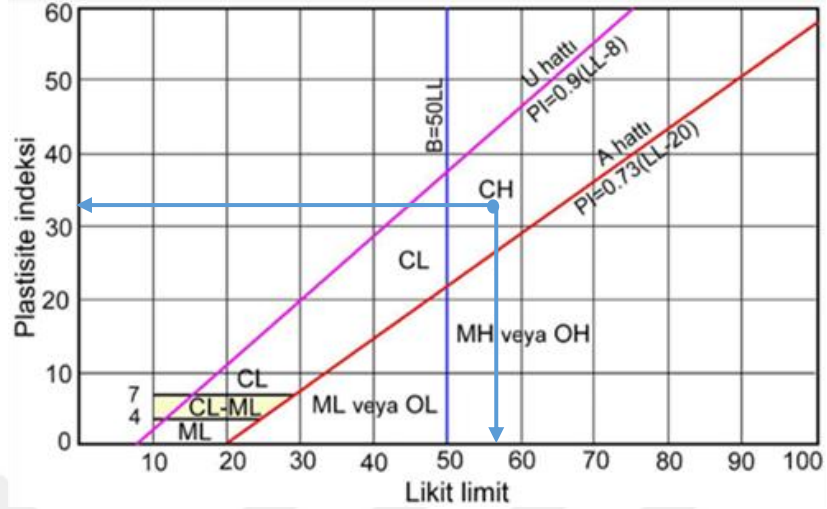


Şekil 2.7. Likit limit ve plastik limit deney numunelerinin hazırlanması ve yapılışı.



Şekil 2.8. Likit limitin belirlenmesi.

Kil zeminin Birleştirilmiş Zemin Sınıflama Sistemine göre yüksek platiseli kil (CH) sınıfına girdiği belirlenmiştir. Kil zeminin sınıfı belirlenmesi Şekil 2.9' de verilmiştir.



Şekil 2.9. Plastisite grafiği.

### 2.1.1.3. Kompaksiyon Özellikleri

Kompaksiyon, mekanik enerji uygulayarak zemin danelerinin birbirlerine yaklaştırılması ve böylece daneler arası boşlukların azaltılarak zeminin daha sıkı bir forma sahip olmasını sağlayan mekanik işlem olarak tanımlanmaktadır. Bu işlem sonrasında zemin, daha kararlı bir hale gelir, geçirimsizliği azalır, uygulanan dış yüklerle karşı dayanımı artar ve bu özelliklerini uzun süre koruyabilirler. Danelerin birbirine göre hareket etmesi ve hareket yeteneği zeminin optimum su içeriğine ( $w_{opt}$ ) ve uygulanan kompaksiyon enerjisine bağlıdır. Bu nedenle, zeminde mümkün olan en iyi sıkıştırmanın yapılabilmesi ancak zeminin  $w_{opt}$  değerinde sıkıştırılması ile mümkündür ve zeminin  $w_{opt}$  değeri ise proktor deneyleri ile belirlenebilmektedir. Bu deneyin amacı, belirli bir zeminin, farklı su içeriklerinde sıkışabilme özelliklerinin ve maksimum sıkışmaya karşılık gelen maksimum kuru birim hacim ağırlığın ( $\gamma_{kmax}$ ) ve bu andaki su içeriğinin laboratuvarında belirlenmesidir. Deneyin temeli, çapı ve yüksekliği belli molta (silindir) konan zemin örneğine kütlesi belli bir tokmağın, belli bir mesafeden, belli sayıda düşürülmesi yoluyla belli bir enerji vermeye dayanır.

Günümüzde, yaygın olarak tercih edilen iki proktor deneyi vardır ve bunlar Standart Proktor deneyi ile Modifiye Proktor deneyleridir. Standart Proktor deneyi, kalıp içerisine üç tabaka halinde konulan zemin örneğinin her tabakasına 2.5 kg'lık ağırlığın 30.5 cm yükseklikten 25 kez düşürülerek sıkıştırılan zeminin maksimum kuru yoğunluk ( $\gamma_{kmax}$ ) ile

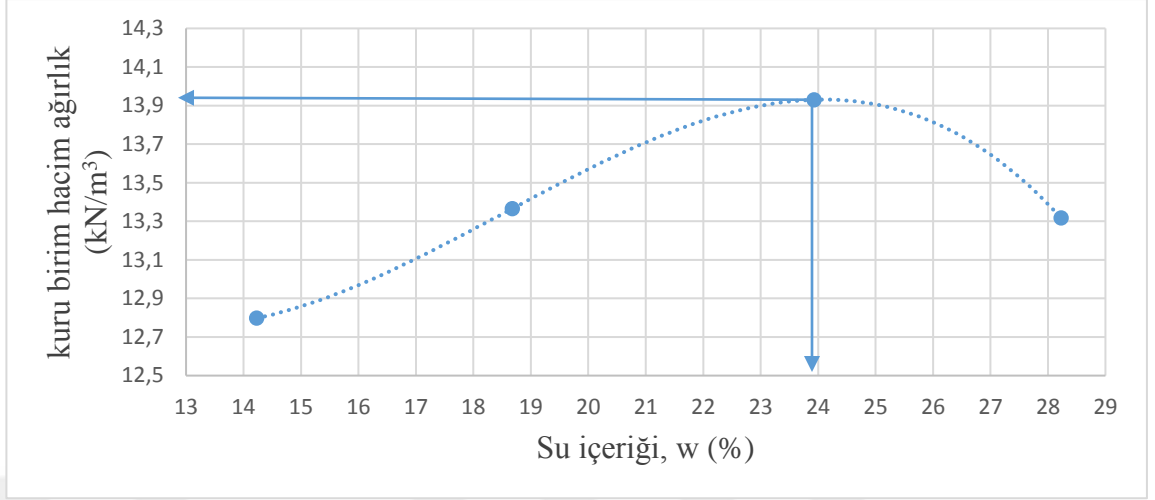
optimum su içeriği ( $w_{opt}$ ) parametrelerinin belirlenmesi işlemidir. Modifiye Proktor deneyinde ise zemin kalıp içerisine beş tabaka halinde yerleştirilmekte ve 4.5 kg'lık yük 45.7 cm yükseklikten her bir tabaka üzerine 25 kez düşürülerek kalıp içerisindeki zemin rneği sıkıştırılmaktadır.

Bu çalışmada, zemin örneklerinin  $w_{opt}$  değerlerini belirlemek için ASTM D698 (2012) standardına göre Standard proktor deneyleri yapılmıştır. Bu deney, 30.5 cm yükseklikten serbest düşmeye bırakılan 2.5 kg'lık yük altında zeminin  tabaka halinde kalıp içerisinde sıkıştırılması ve sıkıştırılmış örneğin maksimum kuru birim hacim ağırlık ( $\gamma_{kmax}$ ) ve optimum su içeriği ( $w_{opt}$ ) değerlerini belirlenmesi şeklinde gerçekleştirilmektedir (şekil 2.10).



şekil 2.10. Proktor deney numunelerinin hazırlanması ve deneyin yapılışı.

Bu deneyden elde edilen veriler kullanılarak şekil 2.11'da gösterilen kompaksiyon eğrisi çizilmiş ve maksimum kuru birim hacim ağırlık  $13,92 \text{ kN/m}^3$ , optimum su muhtevası ise %23.93 olarak bulunmuştur.



Şekil 2.11. Doğal zemin örneğine ait kuru birim hacim ağırlık ( $\gamma_k$ ) – su içeriği (w) grafiği.

### 2.1.2 Plastik Atık

Deneylerde kullanılan plastik atık Plasko Plastik firmasından temin edilmiş olup firma tarafından verilen analiz sonuçları Tablo 2.4’de verilmiştir. Plastik atık hammaddesi pvc olan, sert, suya, kuvvetli asitlere ve güneş ışığına karşı dayanıklı bir malzemedir. Deneyde kullandığımız plastik atık uzunluğu 12 mm ve genişliği 2,5 mm olarak seçilmiştir (Şekil 2.12).



Şekil 2.12. Deneyde kullanılan plastik atık.

Tablo 2.4. Deneylerde kullanılan plastik atık teknik özellikleri.

Açıklama	Değer
Özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	1,38
Gerilme direnci (N/mm <sup>2</sup> )	46-48
Darbe mukavemeti (N/mm <sup>2</sup> )	550
Uzama (%)	25-50
Sertlik (N/mm <sup>2</sup> )	110
Yumuşama noktası (°C)	84
Şekil alma sıcaklığı (°C)	105-125
Isı ile yapışma (°C)	175-215
Gres ve yağlara karşı direnç	Şartlı dayanıklılık
Organik solventlere karşı direnç	Şartlı dayanıklılık
Yırtılma direnci (lb/in <sup>2</sup> )	410-490
Elektrik direnci (Ohm-cm)	10 <sup>16</sup>
Su emmesi (% / gün)	0.05
Su buharı geçirgenliği (25 °C, 1gün)	0,35-2
Oksijen geçirgenliği (25 °C, 1gün) (cm <sup>3</sup> )	4-30
Karbondioksit geçirgenliği (25 °C, 1gün) (cm <sup>3</sup> )	4-30
Azot gazı geçirgenliği (25 °C, 1gün) (cm <sup>3</sup> )	1-10
Hidrojen geçirgenliği (25 °C, 1gün) (cm <sup>3</sup> )	3-10

## 2.2. Katkılı Numunelerin Hazırlanması

Bu aşama, deneysel çalışmalarda kullanılacak olan doğal zemini ve katkı malzemelerinin deneylere hazır hale getirilmesini kapsamaktadır. Öncelikle etüvde kurduğumuz kil zemine, zemin kuru ağırlığının %0, %0.25, %0.5, %0.75 oranlarında plastik atık eklenerek deney numuneleri hazırlanmıştır. Kullanılan plastik atık uzunluğu 12 mm ve genişliği 2,5 mm'dir. Plastik atık zemine homojen olarak dağıtılarak karıştırılmıştır (Şekil 2.13). Plastik atık zemine ilavesinden sonra eklenecek su miktarı, proktor deneyi sonucu elde edilen optimum su muhtevası değerine göre belirlenmiştir. Hazırlanan bu karışım optimum su muhtevalarında proktor kalıbında sıkıştırılmıştır. Tablo 2.5' da zemin karışımlarına ait oranlar verilmektedir.



Şekil 2.13. Kil zemine plastik eklenmesi ve plastik kil zemine karıştırılması.

Tablo 2.5. Çalışmada kullanılmak üzere hazırlanan karışımların oranları.

Plastik atık oranı (%)	Doğal zemin (%)
0	100 CH
0.25	99.75 CH
0.50	99.50 CH
0.75	99.25 CH

### 2.2.1. Zemin Karışımlarının Şişme Parametrelerinin Belirlenmesi

Zeminlerde, su içeriği ve gerilme şartlarındaki değişimlerin sonucunda meydana gelen hacim artışı şişme olarak tanımlanır ve bu özellik şişme potansiyeli olarak adlandırılır. Şişme potansiyeli; bir zeminin hem şişme yüzdesini hem de şişme basıncını ifade eden bir terimdir (Sridharan vd., 1986; Shuai, 1996; Thomas, 1998). Kilin şişmesini Mc Bride (1989) kil yüzeyi, iyonlar ve su arasındaki etkileşim kuvvetlerinin dengelenmesi olarak tanımlar. Kil daneleri, yüzeyleri negatif elektrik, köşeleri ise pozitif elektrik yüklü mineral parçacıklarıdır. Yüzeydeki negatif yükler, elektriksel kuvvetler ve kil daneciklerinin yüzeyine bağlı olan zemin suyundaki katyonlar ile dengededir. Zeminin su içeriğinin veya kimyasal bileşiminin değişmesi zeminin su kimyasını değiştirmekte ve böylece kil - su sistemindeki itme ve çekim kuvvetlerinden oluşan iç kuvvetler etkilenmektedir. Çekim kuvvetleri; London-van der Waals kuvvetleri, negatif ve pozitif

yüklü yüzeyler arasındaki Coulomb kuvvetleri, dane-katyon-dane bağları, hidrojen bağları ve çimentolanma bağlarından ileri gelir. İtme kuvvetleri ise adsorbe su iyonları ve su molekülleri arasındaki çift tabaka etkileşimleri ile dane yüzeyleri ve tabakalar arasındaki katyonların hidrasyonu sırasında meydana gelen hidrasyon enerjilerinden kaynaklanmaktadır. (Van Olphen, 1963; Mesri ve Olson, 1971; Sridharan vd., 1986). İç kuvvetler sistemindeki denge durumu, zemin suyundaki kapiler gerilme ve dışarıdan uygulanan gerilmeler sonucu bozulmakta, denge yeniden sağlanıncaya kadar, zeminde şişme ve büzülme gibi hacim değişiklikleri oluşmaktadır (Nelson ve Miller, 1992).

Keskin (1993) zeminin şişme potansiyelini etkileyen faktörleri şu şekilde sıralamaktadır;

- Zeminin içerdiği kil yüzdesi
- Kil mineralinin cinsi ve çökeltme koşulları
- Arazideki gerilme şartları
- Kilin gerilme geçmişi
- Zeminin kuru birim hacim ağırlığı
- Zemin danelerinin yerleşim biçimi
- Zeminin başlangıç su içeriği ve doygunluk derecesi
- Zeminin boşluk oranı
- Geçirgenlik
- Şişen zemin tabakasının kalınlığı ve derinliği
- Dış yükler
- İklim şartları
- Bitki örtüsü
- Sıkıştırılmış zeminlerde sıkıştırma için kullanılan kompaksiyon yöntemi
- Çevresel şartlardaki değişiklikler gibi etkenler zeminin şişme basıncını etkileyen

başlıca faktörlerdir.

Günümüzde en fazla tercih edilen yöntem, ASTM D 4546 tarafından önerilen ve doğrudan bir ölçüm tekniği olan tek boyutlu ödometre yöntemidir. Bu yöntemde Metot-A, B ve C olmak üzere üç farklı deney yöntemi önerilmektedir. Bu çalışmada, zemin örneklerinin şişme basınçlarının belirlenmesi amacıyla bir boyutlu ödometre deney

aletinde şişme basıncı deneyi yapılmıştır (Şekil 2.14). Deneyler, ASTM D 4546 (2014) tarafından önerilen sabit hacim odometre deney yöntemine (Metot-C) göre yapılmıştır. Tablo 2.6’ da zemin karışımlarına ait şişme basınçları verilmektedir.

Tablo 2.6. Kil ve Plastik atık karışımlarının şişme basınçları.

Numune	şişme basıncı (kPa)
%100 CH	693,24
%99.75 CH + %0.25 PA	672,74
%99.50 CH + %0.50 PA	402,07
%99.25 CH + %0.75 PA	447,18

Zeminlerin şişme potansiyelinin önemli bir göstergesi olan şişme yüzdesi, örselenmemiş veya sıkıştırılarak hazırlanmış zemin örneğinin su altında bırakılması sonucu hacminde meydana gelen artışın, başlangıç hacmine göre yüzdesini ifade etmektedir (Keskin vd., 1992).

Bu tez kapsamında yapılan şişme deneylerinde, optimum su muhtevası ve maksimum birim hacim ağırlığında hazırlanan numunelerin şişme yüzdesi değerleri bulunurken ASTM D 4546 (2014) (Metot-A) kullanılmıştır. Tablo 2.7’da zemin karışımlarına ait şişme yüzdeleri verilmektedir.

Tablo 2.7. Kil ve Plastik atık karışımlarının şişme yüzdeleri.

Numune	Şişme yüzdesi (%)
%100 CH	9.97
%99.75 CH + %0.25 PA	9.60
%99.50 CH + %0.50 PA	2.40
%99.25 CH + %0.75 PA	4.40



Şekil 2.14. Şişme deney numunelerinin hazırlanması ve deneyin yapılışı.

### 2.2.2. Zemin Karışımlarının Serbest Basınç Mukavemetlerinin Belirlenmesi

Serbest basınç deneyi ASTM D 2166 (2016) standardına göre yapılmıştır. Serbest basınç deneyi kil zeminler için sıklıkla kullanılan, konsolidasyonsuz-drenajsız deneylerin özel bir tipidir. Bu testte çevre basıncı  $\sigma_3$  sıfırdır. Eksenel yük hızlı bir şekilde uygulanarak numunenin göçmesi sağlanır (Şekil 2.15). Deneye başlamadan önce numunenin çapı ve boyu ölçülür ve kaydedilir. Oluşacak kayma düzleminin alt ve üst yükleme başlıkları ile kesişmemesi için, çap/boy oranının uygun olması gerekmektedir. Genellikle bu oran numunenin boyu, çapının 2 katı olacak şekilde seçilir. Serbest basınç deneyi, kendini tutabilen özelliklere sahip zeminler üzerinde uygulanabilmektedir bu nedenle sadece killi zeminlerde kullanılan bir deneydir. Deney sırasında numunenin drenaj koşulları kontrol edilemezken yükleme hızlı yapılarak zeminin drenajsız kayma mukavemeti elde edilmektedir.

Serbest basınç deneyi sonucunda, elde edilen okuma değerleri kullanılarak zemin numunesinin gerilme-şekil değiştirme grafiği oluşturulmuş ve zeminin serbest basınç dayanımı hesaplanmıştır.



Şekil 2.15. serbest (tek eksenli) basınç deney numunelerinin hazırlanması ve deneyin yapılması.

Örneklere gerçekleştirilen serbest basınç deneyleri sonucunda elde edilen veriler Tablo 2.8’de verilmiştir.

Tablo 2.8. Kil ve Plastik atık karışımlarının serbest basınç deney sonuçları.

Numune	Serbest basınç mukavemeti, $q_u$ (kPa)
% 100 CH	282
%99.75 CH + %0.25 PA	325
%99.50 CH + %0.50 PA	580
%99.25 CH + %0.75 PA	427

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, yüksek plastisiteli doğal malzemenin stabilizasyonunda, ağırlıkça %0, %0.25, %0.5, %0.75 oranlarında plastik atık katkı karışımlar hazırlanmıştır. Bu katkıların şişme potansiyeli ve dayanım özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir.

#### 3.1. Katkı Malzemelerinin Şişme Parametrelerine Etkisi

Zeminlerin şişme potansiyelinin önemli bir göstergesi olan şişme basıncının üzerindeki yapıdan kaynaklanan ek gerilmeden daha büyük olması durumunda, mühendislik yapısında önemli hasarlar meydana gelebilmektedir. Killerin şişme basıncının limit değerlerden daha yüksek olduğu durumlarda zeminde iyileştirme yöntemlerine başvurulur ve bu yöntemlerden en yaygın olarak tercih edilen farklı oranlarda katkı kullanarak yapılan stabilizasyondur. Bu çalışma kapsamında, Katkılı numunelerin şişme parametrelerini belirleyebilmek için deneyler ASTM D4546 (2014) standardına göre yapılmıştır. Tablo 2.6'de belirtilen oranlarda hazırlanan numuneler, optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığında sıkıştırılmıştır. Şişme basıncı ve şişme yüzdesi deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 3.1'de verilmiştir. Katkı miktarının artışı ile birlikte şişme yüzdesi ve şişme basıncı değerlerinde belirgin bir düşüş görülmektedir.

Tablo 3.1. Katkı malzemelerinin zeminin şişme yüzdesi ve şişme basıncı değerlerine etkisi.

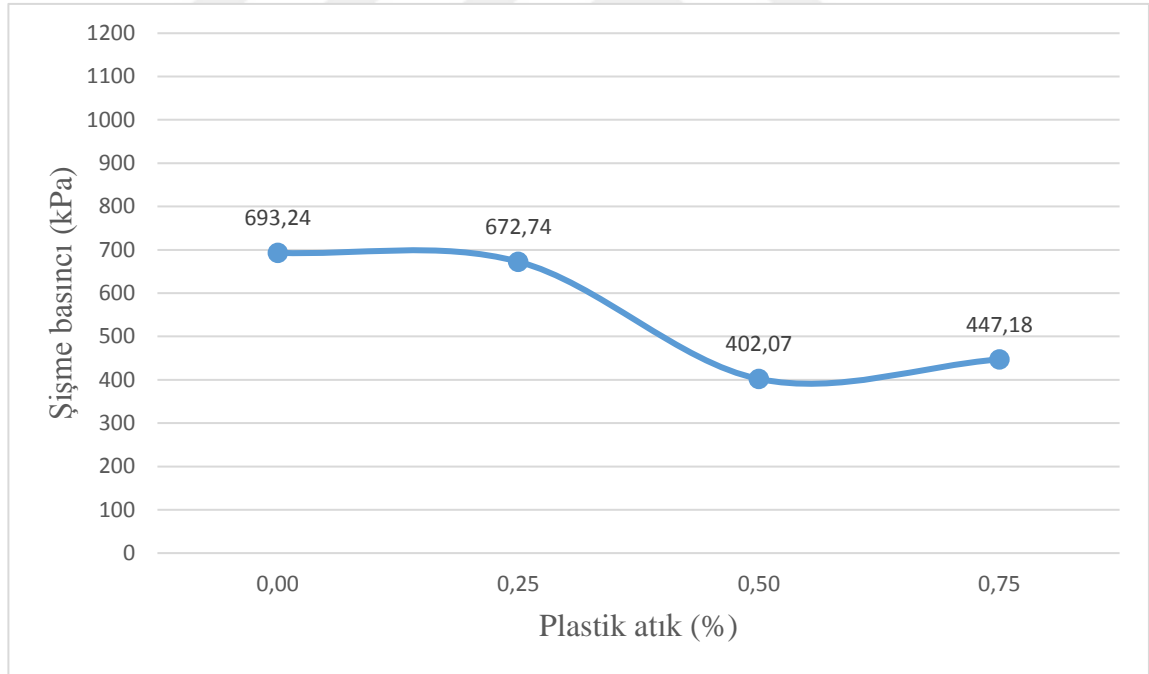
Numune	Şişme yüzdesi (%)	Şişme basıncı (kPa)
%100 CH	9.97	693,24
%99.75 CH + %0.25 PA	9.60	672,74
%99.50 CH + %0.50 PA	2.40	402,07
%99.25 CH + %0.75 PA	4.40	447,18

Plastik atık katkısının yüksek plastisiteli kilinin şişme basıncı üzerindeki etkilerini ortaya koymak amacıyla yapılan laboratuvar deneylerine ait sonuçlar değerlendirilerek, katkı oranı etkisi açıklanmaya çalışılmıştır. Örneklere ait şişme basıncı değerlerindeki % değişimler Tablo 3.2'de meydana gelen değişimleri gösteren grafik ise Şekil 3.1'de verilmiştir.

Yapılan deney sonuçlarına göre; katkısız kilin şişme basıncı 693,24 kPa dır. Katkılı örneklerde bu değer katkı oranına bağlı olarak azalmakta ve bu değerler 672,74 kPa ile 447,18 kPa arasında değişmektedir (Tablo 3.2). Örneklerin şişme basınçlarına ait değerlerdeki azalma incelendiğinde; azalma oranı katkı oranının artmasına bağlı olarak artmaktadır (Şekil 3.1).

Tablo 3.2. Katkısız kile göre katkılı örneklerin şişme basıncı değerlerinde meydana gelen % değişimler.

Numune	Şişme basıncı (kPa)	Değişim (%)
% 100 CH	693,24	-
%99.75 CH + %0.25 PA	672,74	-3.05
%99.50 CH + %0.50 PA	402,07	-72.42
%99.25 CH + %0.75 PA	447,18	-55.02



Şekil 3.1. Örneklerin şişme basıncı değerlerindeki değişimlere ait grafik.

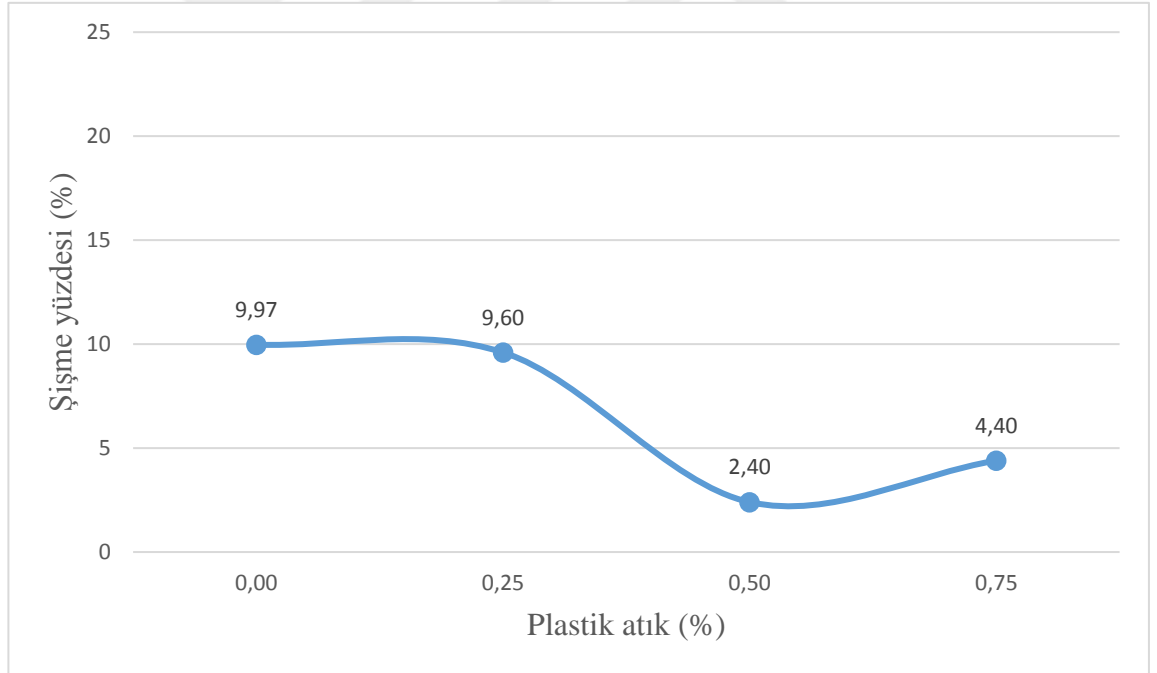
Zeminlerde şişme potansiyelini ifade eden diğer bir parametre de şişme yüzdesidir. Bu çalışmada, plastik atık katkısının yüksek plastisiteli kilinin şişme yüzdesi üzerindeki etkilerini ortaya koymak amacıyla yapılan laboratuvar deneylerine ait sonuçlar değerlendirilerek, katkı oranı etkisi açıklanmaya çalışılmıştır. Örneklerle ait şişme yüzdesi

değerlerindeki % değişimler Tablo 3.3’de, meydana gelen değişimleri gösteren grafik ise Şekil 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.3. Katkısız kile göre katkılı örneklerin şişme yüzdesi değerlerinde meydana gelen % değişimler.

Numune	Şişme yüzdesi (%)	Değişim (%)
%100 CH	9.97	-
%99.75 CH + %0.25 PA	9.60	-3.85
%99.50 CH + %0.50 PA	2.40	-315.42
%99.25 CH + %0.75 PA	4.40	-126.59

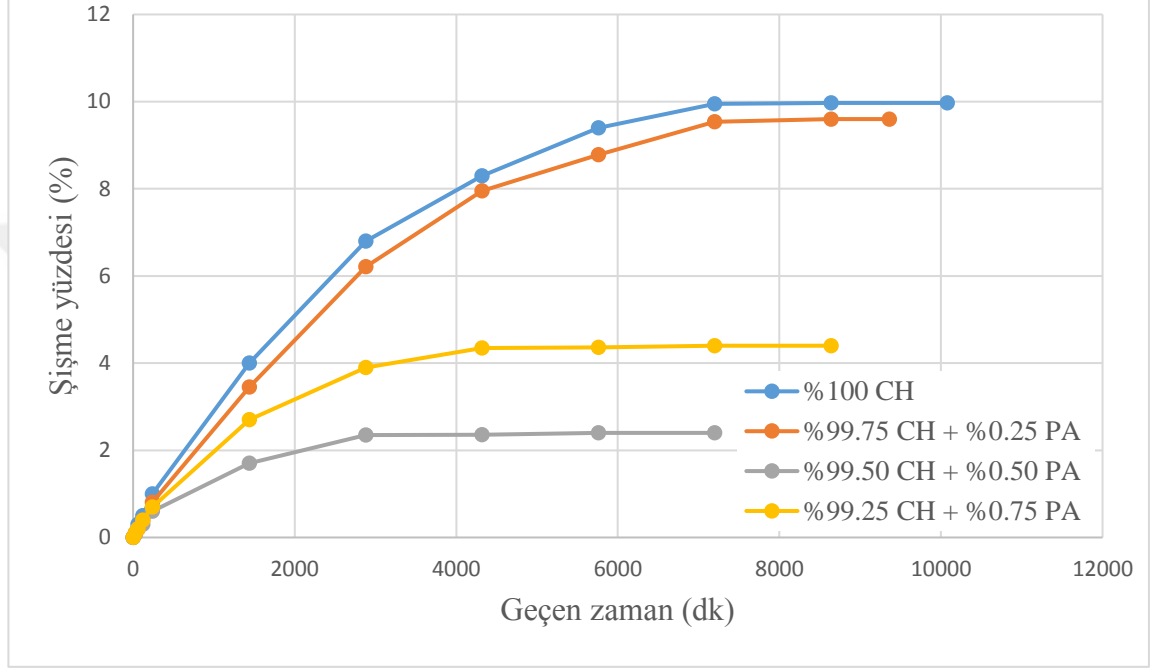
Zemin karışımlarda katkı oranına bağlı olarak şişme yüzdesindeki değişim Şekil 5.18’de görülmektedir.



Şekil 3.2. Örneklerin şişme yüzdesi değerlerindeki değişimlere ait grafik.

Katkısız kil şişme yüzdesi %9.97 iken bu değer plastik atık katkılı örneklerde %9.60-%4.40 arasında değişmektedir (Tablo 3.3). Örneklerin şişme yüzdesine ait değerlerdeki azalma incelendiğinde; azalma oranı katkı oranının artmasına bağlı olarak artmaktadır (Şekil 3.2).

Katkısız kil şişme yüzdesine göre en yüksek azalma oranı %0.50 katkı oranında ortaya çıkmıştır. Bu örnekteki azalma oranı %315.42 tür. Katkı oranının %0.50'den fazla olduğu örneklerdeki azalma oranları sınırlı kalmıştır. Karışımların zamana bağlı olarak şişme yüzdeleri Şekil 3.3'da gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Örneklerin zamana bağlı şişme yüzdeleri.

### 3.2. Katkı Malzemelerinin Dayanım Üzerindeki Etkisi

Katkısız ve plastik atık katkılı numunelerin dayanım özelliklerini belirlemek için ASTM D 2166 (2016) standardına göre serbest basınç deneyi yapılmıştır. Tablo 2.6'de belirtilen oranlarda hazırlanan numuneler, optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığında sıkıştırılmıştır.

Numunelerin serbest basınç deney sonucu oluşan kırılma şekilleri Şekil 3.4'de verilmiştir. Serbest basınç deney sonuçları Tablo 3.4'te, numunelerin katkı oranına bağlı olarak serbest basınç mukavemet değerlerindeki değişim Şekil 3.5'de görülmektedir.



CH-%0PA

CH-%0.25PA



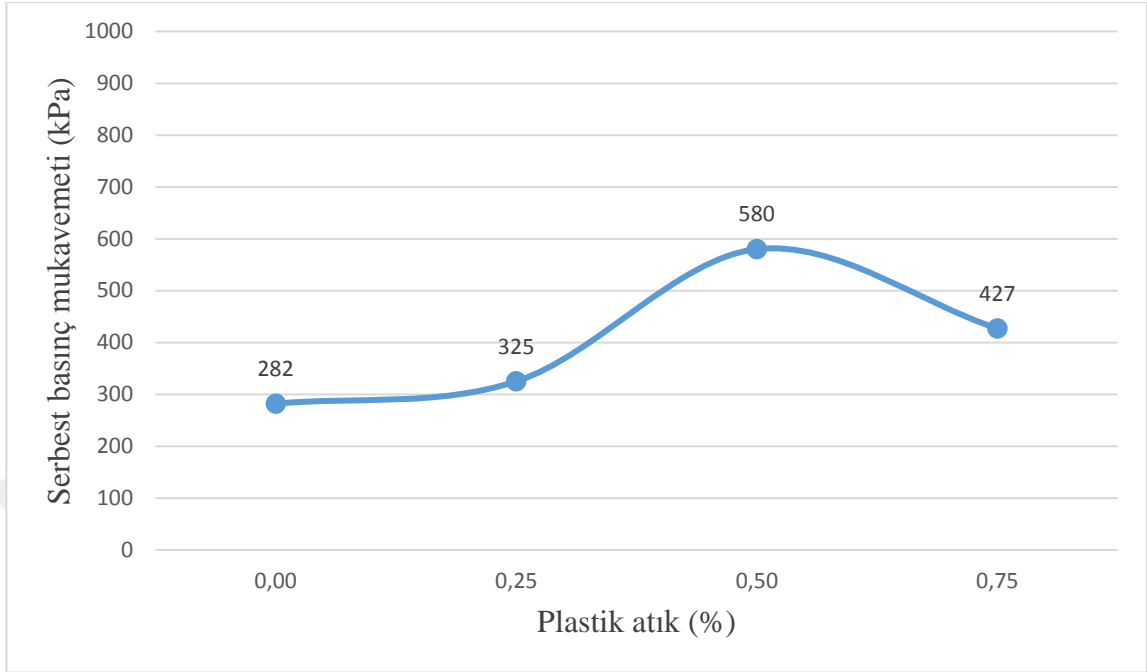
CH-%0.5PA

CH-%0.75PA

Şekil 3.4. Serbest basınç deney sonucu kırılan numuneler.

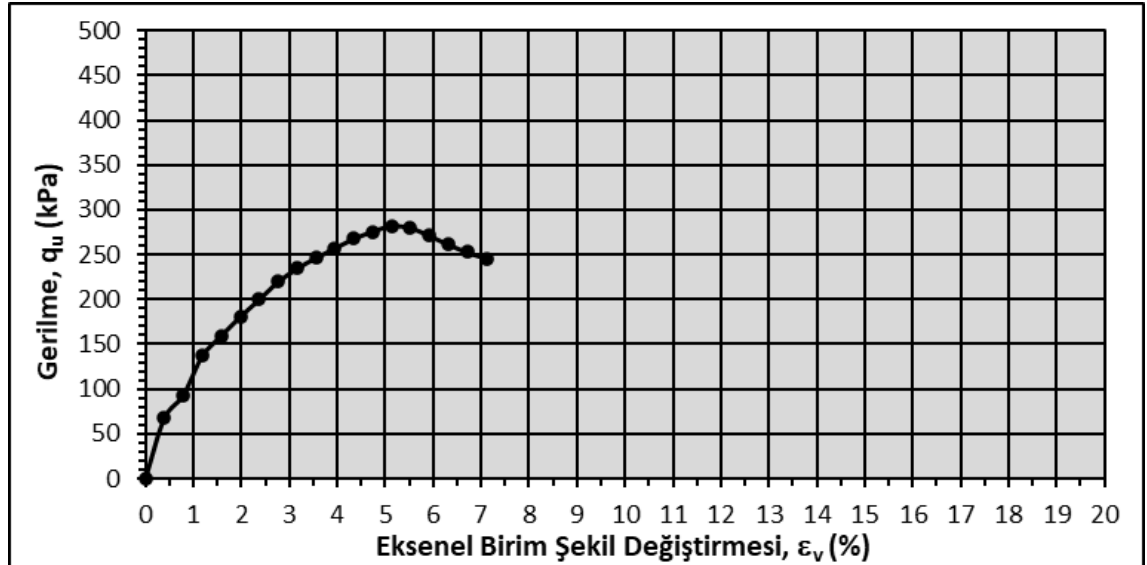
Tablo 3.4. Katkısız kile göre katkılı örneklerin serbest basınç değerlerinde meydana gelen % değişimler.

Numune	Serbest basınç mukavemeti, $q_u$ (kPa)	Değişim (%)
%100 CH	282	-
%99.75 CH + %0.25 PA	325	15.25
%99.50 CH + %0.50 PA	580	105.67
%99.25 CH + %0.75 PA	427	51.42

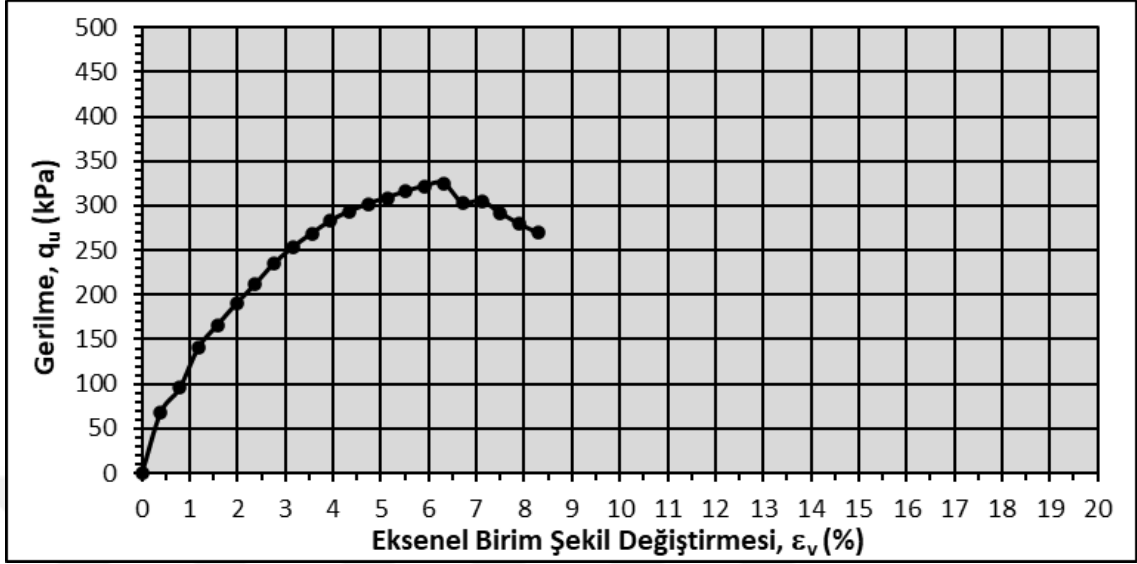


Şekil 3.5. Örneklerin serbest basınç mukavemet değerlerindeki değişimlere ait grafik.

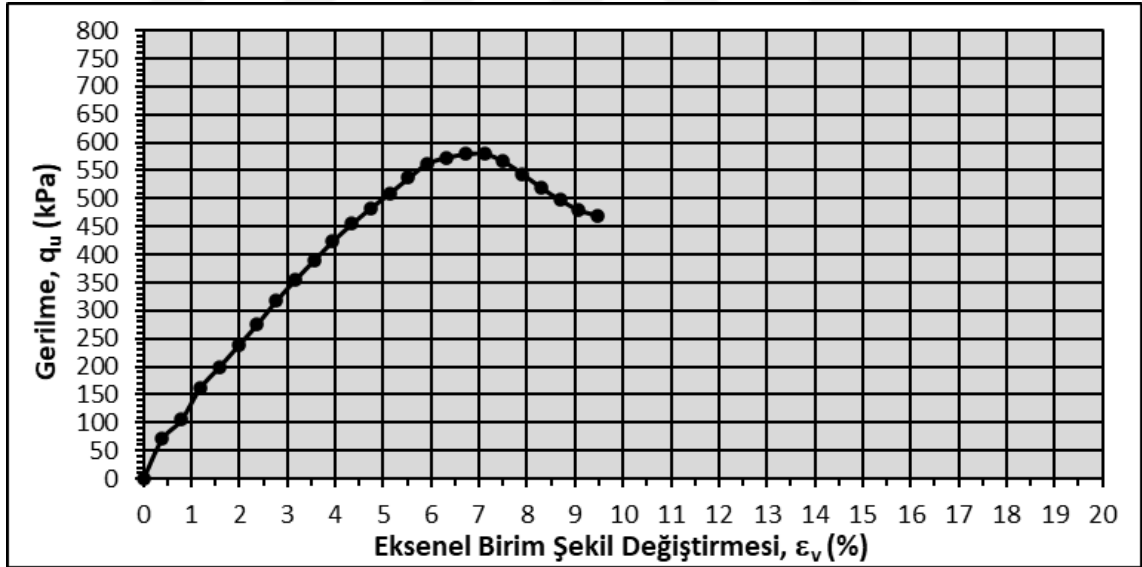
Optimum su muhtevasına göre hazırlanan karışımların serbest basınç deneylerinde elde edilen birim şekil değiştirme-eksenel gerilme grafikleri (Şekil 3.6, 3.7, 3.8, 3.9)'de verilmiştir.



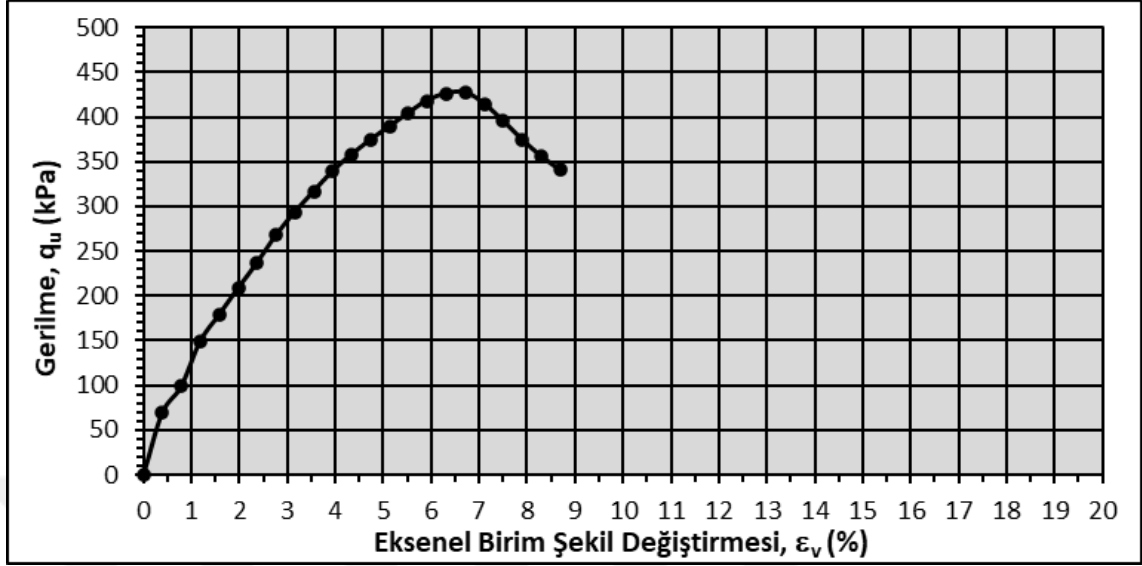
Şekil 3.6. Serbest basınç deney sonucu birim şekil değiştirme-eksenel gerilme grafiği (%0 plastik katkılı).



Şekil 3.7. Serbest basınç deney sonucu birim şekil değiştirme-eksenel gerilme grafiği (%0.25 plastik katkılı).



Şekil 3.8. Serbest basınç deney sonucu birim şekil değiştirme-eksenel gerilme grafiği (%0.5 plastik katkılı).



Şekil 3.9. Serbest basınç deney sonucu birim şekil değışirme-eksenel gerilme grafiği (%0.75 plastik katkılı).

Deney sonuçları göz önüne alındığında tüm karışımın zeminin mukavemetini arttırdığı görülmüştür. Doğal kilin serbest basınç mukavemeti %0.5 plastik atık katkısında en yüksek değere ulaşmıştır.

Şekil 3.6, 3.7, 3.8 ve 3.9 incelendiğinde doğal kilin serbest basınç mukavemeti 282 kPa olduğu, %0.5 plastik atık katıldığında bu değerin 580 kPa değerine ulaşarak % 105.67 oranında arttığı tespit edilmiştir. Katkı oranı %0.5'i geçince serbest basınç mukavemeti düşmeye başladığı gözlemlenmiştir.

Deney sonuçları literatürde olan çalışmalarla benzerlik göstermiştir. Plastik atık, literatür çalışmalarının çoğunda belirli bir orana kadar mukavemeti artırmış, daha sonra mukavemette düşme meydana getirmiştir.

#### 4. SONUÇLAR

Şişen zeminler inşaat mühendisliği yapılarında ciddi sorunlara neden olmaktadır. Bu tür zeminlerin üzerine inşa edilecek yapılarla serbest şişmeler engellendiği zaman yapıya önemli zararlar verebilecek gerilmeler oluşmaktadır. Bu problemi kontrol edebilmek için en yaygın olarak kullanılan çözüm yöntemi farklı katkı malzemeleri ile stabilizasyondur. Bu çalışmada, şişen zeminlerinin plastik atık katkısı ile zeminin mukavemet ve şişme özelliklerine etkisi incelenmiştir.

Bu yüksek lisans tez çalışması kapsamında, kullanılan kil mineralinin tanımlanması ve zemin stabilizasyonun tanımı ele alınmıştır. Ardından dünya üzerinde yüzeysel zemin stabilizasyonunda hem yaygın hem de alternatif olarak uygulanan yöntemlerin kullanımı irdelenmiş ve daha önce yapılan çalışmalara değinilmiştir.

Tezin ikinci bölümünde ise kullanılan zemin örneğinin tanımlanması ve laboratuvar deneyleri ile fiziksel, mekanik ve dayanım özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca çalışmada kullanılan katkı malzemelerinin özellikleri açıklanmıştır. Plastik atığın zemini iyileştirmesine etkisini incelemek amacıyla, doğal zemine ağırlıkça %0, %0.25, %0.50 ve %0.75 oranlarında plastik atık katkısı ile karışımlar hazırlanmıştır. Yüksek plastisiteli kil zemin üzerinde yapılan şişme yüzdesi, şişme basıncı deneyinden sonra gerçekleştirilen serbest basınç deneyleri sonrası zeminin, şişme ve mukavemet özellikleri belirlenmiştir.

Killi zemin geoteknik özellikleri belirlemek için gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar şöyledir:

- Doğal kili sınıflandırmak amacıyla gerçekleştirilen elek analizi ve kıvam limitleri deneylerinden elde edilen sonuçlara göre zemin sınıfı CH olduğu belirlenmiştir.
- Doğal kilin kıvam limitlerini belirlemek için likit limit ve plastik limit deneyleri yapılmış ve likit limit (LL) değeri %56.7, plastik limit değeri (PL) %24.4 , plastisite indisi (PI) %32.3 olarak tespit edilmiştir.
- Doğal kilin kompaksiyon parametrelerini belirlemek için standart proktor deneyleri yapılmış ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı  $13,92 \text{ kN/m}^3$  ve optimum su muhtevası %23.93 olarak tespit edilmiştir.

Plastik atık malzemesi ile gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar şöyledir:

- Optimum su muhtevasında hazırlanan doğal kil numunesi üzerinde yapılan şişme deneyleri sonucunda, doğal kilin serbest şişme yüzdesi %9.97 olarak belirlenmiştir. Katkı oranı arttıkça şişme yüzdesinin azaldığı ve %0.5 plastik atık katıldığında bu değer %2.40 değerine düşerek %315.42 oranında azaldığı tespit edilmiştir.

- Optimum su muhtevasında hazırlanan doğal kil numunesi üzerinde yapılan şişme deneyleri sonucunda, doğal kilin şişme basıncı değerini 693,24 kPa olarak belirlenmiştir. Katkı oranı arttıkça şişme basıncının azaldığı ve %0.5 plastik atık katıldığında bu değer 402,07 kPa değerine düşerek %72.42 oranında azaldığı tespit edilmiştir.

- Optimum su muhtevasında hazırlanan doğal kil numunesi üzerinde yapılan şişme deneyleri sonucunda, şişme yüzdesi ve şişme basıncı değerlerinin %0.5 plastik ile azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca %0.75 plastik ilave edildiğinde şişme yüzdesi ve şişme basıncı değerinde bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, doğal kile %0.75 miktarda plastik ilavesinin doğal kilin daha dağınık ve bozulmuş yapı kazanmasına neden olduğu düşünülmüştür.

- Optimum su muhtevasında hazırlanan yalın kil numunesi üzerinde yapılan serbest basınç deneyi sonucunda, kilin serbest basınç mukavemeti 282 kPa olarak belirlenmiştir. %0.5 plastik atık katıldığında bu değer 580 kPa değerine ulaşarak %105.67 oranında arttığı, katkı oranı %0.5'i geçince ise serbest basınç mukavemetinde düşüşler olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni, plastik oranının %0.5'in üzerine çıktığında zeminin boşluk miktarının artmasından dolayı kohezyon ve mukavemeti azalttığı düşünülmüştür.

- Tez çalışması sonucunda, plastik atık doğru oranda kullanıldığında problemler zeminlerin iyileştirilmesinde alternatif bir katkı maddesi olarak kullanılabileceği, özellikle düşük mukavemet ve yüksek şişme potansiyeline sahip zeminlerde oldukça etkili olduğu belirlenmiştir.

## 5. ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında, plastik atığın şişen zemin stabilizasyonu çalışmalarında alternatif bir yöntem olarak kullanılabilceği sonucuna varılmıştır. Plastiğin çevresel bir atık olması ve bu atık ürünün zemin stabilizasyonunda kullanılmasının hem çevresel hem de ekonomik olarak önemli getirilere sahip olması sebebiyle geoteknik uygulamalarında kullanılması uygun olacaktır. Bu konuda yapılabilecek yüksek lisans ve doktora çalışmalarına ışık tutması amacıyla aşağıdaki öneriler sunulmuştur:

- Bu çalışmayla, şişen zemin stabilizasyonunda en başarılı sonuçların elde edildiği katkı oranı %0.5 olduğu belirlenmiştir. Bu katkı oranlarının kilin geçirimsizliğine ve kayma direncine olan etkisinin de incelenmesi önerilmektedir.
- Plastik katkıli killerin geoteknik özellikleri üzerindeki etkilerinin daha iyi anlaşılabilmesi için ilerleyen çalışmalarda farklı killer kullanılarak deneysel çalışmalarla araştırılması önerilmektedir.

## KAYNAKLAR

- Albayrak, Z. and Gencer, G., (2020), The usability of clay/pumice mixtures modified with biopolymer as an impermeable liner, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 25, 28–36.
- Alpyürür, M., (2016), *Zemin iyileştirmesinde öğütülmüş gazbeton kullanımı* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Altun, S., “Zemin İyileştirme Yöntemleri”, *İnşaat Mühendisleri Odası*, 2010, [https://www.imo.org.tr/resimler/dosya\\_ekler/0065ed90be0fa16\\_ek.pdf?tipi=2&turu=X&sube=16](https://www.imo.org.tr/resimler/dosya_ekler/0065ed90be0fa16_ek.pdf?tipi=2&turu=X&sube=16), (30.09.2010).
- Ashraf, A., Sunil, A., Dhanya, J., Joseph, M., Varghese, M., and Veena, M., (2011), Soil Stabilisation Using Raw Plastic Bottles. *Proceedings of Indian Geotechnical Conference*, Kochi.
- Aslan Topçuoğlu, Y. (2020). *Farklı katkı maddelerinin zeminlerin mühendislik özellikleri üzerindeki etkisi* (Doktora Tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- ASTM D 698-12, (2012). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort. ASTM West Conshohocken, PA.
- ASTM D 4546-14, (2014). Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soils. ASTM West Conshohocken, PA
- ASTM D 2166-16, (2016). Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. ASTM West Conshohocken, PA.
- Aysu, Ş., (2020), *yüksek plastisiteli kil zeminlere cam lifi katkısının zeminin mukavemet, permeabilite ve konsolidasyon özelliklerine etkisi kullanımı* (Yüksek lisans tezi). Konya Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Aytekin, M., (2004), *Deneysel Zemin Mekaniği*. Teknik Yayınevi, Mühendislik & Mimarlık Yayınları, Ankara.
- D. T. Bergado and L. R. Anderson, (1996), *Soft Ground Improvement In Low Land And Other Environments*, Asce Press Systems, Ny, Usa.
- Bhattara, P., Kumar, A., Santosh, K., Manikanta, T. and Tejeswini, K., (2013), Engineering Behavior Of Soil Reinforced With Plastic Strips. *International Journal of Civil, Structural, Environmental and Infrastructure Engineering Research and Development (IJCSEIERD)*, Vol. 3, Issue 2, Jun 2013, 83-88.
- Bildik, S., “Zemin İyileştirme Yöntemleri”, *İnşaat Mühendisleri Odası*, 2017, [https://www.imo.org.tr/resimler/dosya\\_ekler/0065ed90be0fa16\\_ek.pdf?tipi=2&turu=X&sube=16](https://www.imo.org.tr/resimler/dosya_ekler/0065ed90be0fa16_ek.pdf?tipi=2&turu=X&sube=16), (15.11.2017).
- Chebet, F., and Kalumba, D., (2014), Laboratory Investigation On Re-Using Polyethylene (Plastic) Bag Waste Material For Soil Reinforcement In Geotechnical Engineering. *Civil Engineering and Urban Planning: An International Journal (CiVEJ)*, Vol.1, No.1.
- Chen, F. H., (1973), The Basic Physical Property of Expansive Soils, Proc. *Third International Conference on Expansive Soils*. Haifa, Israel.
- Chen, F. H., *Foundation on Expansive Soils*, Elsevier Science Pub. Co., Canada 1988.

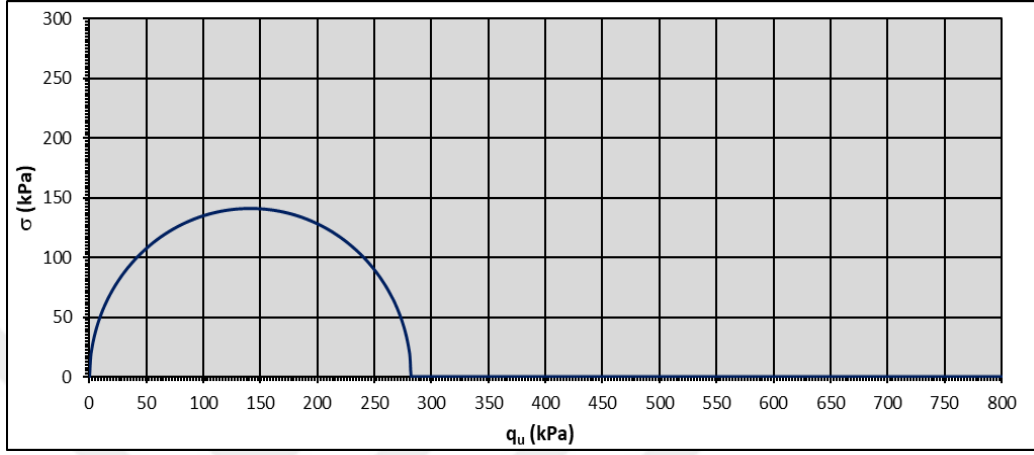
- Çetin, A., Y., (2011), *Yüksek plastisiteli kil zeminlerin alternatif malzemeler ile yüzeysel zemin stabilizasyonu* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Çınar, H., (2014), *Zemin iyileştirmesinde jet grout yöntemi ve uygulamaya yönelik proje çalışmaları* (Yüksek lisans tezi). Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Damion, T., Ashique, M., Varkey, P., and George, S., (2016), Use of Plastic Bottle Strips as an Admixture in the Soil Sub-grade for Road Construction, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, Volume: 03 Issue: 04.
- Dehghanian, K., (2021), Killi Zeminlerin Özelliklerinin Uçucu Kül Kullanarak İyileştirilmesi, *ALKÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 3(1): 66-72.
- Demiral, T. Ö., (2017), *Sülfatlı su içerikli kum zeminlerde portland çimentosu ve sülfata dayanıklı çimento kullanılarak oluşturulan jet-grout kolonlarının taşıma gücüne sülfatın etkisi* (Yüksek Lisans Tezi). Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Durgunoğlu, H. T., (2004), Yüksek modüllü kolonların temel mühendisliğinde kullanımı, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onuncu Ulusal Kongresi*. 16-17.
- Farah, R. and Nalbantoglu, Z., (2019), Performance of plastic waste for soil improvement, *SN Applied Sciences 1*, 1340.
- Fauzi, A., Djauhari, Z., and Fauzi, U., (2016), Soil Engineering Properties Improvement by Utilization of Cut Waste Plastic and Crushed Waste Glass as Additive. *IACSIT International Journal of Engineering and Technology* 8(1):15-18.
- Gangwar, P. and Tiwari, S., (2021), Stabilization of soil with waste plastic bottles, *3rd International Conference on Computational and Experimental Methods in Mechanical Engineering*, Volume 47, Part 13, 3802-3806.
- Gencer, G., (2018), *Biyopolimer ile etkileştirilmiş kil/ponza tozu karışımlarının bazı geoteknik özelliklerinin araştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Ghabae, S., (2015), *Kireç ile stabilize edilmiş bentonitin kür süresinin mukavemet üzerindeki etkisi* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Hassan, H., Rasul, J., and Samin, M., (2021), Effects of Plastic Waste Materials on Geotechnical Properties of Clayey Soil, *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 8, 390- 413.
- Han, J., *Principles and Practice of Ground Improvement*, New Jersey, Canada 2015.
- Holtz, W. G. and Gibbs, H. J., (1956), Engineering Properties of Expansive Clays, *Transact. ASCE*, 121, 641-677.
- Kalumba, D., and Chebet, C., (2013), Utilisation of polyethylene (plastic) shopping bags waste for soil improvement in sandy soils. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- Kar, R. K., Pradhan, P. and Naik, A., (2012), Consolidation Characteristics of Fiber Reinforced Cohesive Soil. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17:3861-3874
- Keleş, E., (2020), *Bitlis pomzası, bitlis volkanik tüfü, aşıin-elbistan uçucu külü ve kirecin yüksek plastisiteli kile olan etkisi* (Yüksek Lisans Tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Keskin, S.N., Yıldırım, H. ve Ansal, M.A., (1992). Killi Zeminlerde Yanal Şişme Davranışları, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 4. Ulusal Kongresi*.

- Keskin, S.N. (1993). *İstanbul neojen kilinin şişme davranışına, ön konsolidasyonun, mineralojik özelliklerin ve çevresel faktörlerin etkisi* (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü. İstanbul.
- Keskin, S. N., Uzundurukan, T. S., Göksan, A. ve Korkmaz, M.Ç., (2006), Bayrakzeminlerin Şişme Davranışının Anfis Analizi ile Tahmin Edilmesi, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onbirinci Ulusal Kongresi*, Türkiye: Karadeniz Teknik Üniversitesi, 7-8 Eylül.
- Kılıç, G., (2008), *Çimento ile zemin stabilizasyonu* (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kumar, T., Panda, S., Hameed, S., and Maity, J., (2018), Behaviour Of Soil By Mixing Of Plastic Strips. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, Volume: 05 Issue: 05.
- Küçükaslan, N., (2020), *Asidik ve bazik tüf katkılarının yüksek plastisiteli killerin konsolidasyonuna etkisi* (Yüksek Lisans Tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elâzığ.
- Mai, R., Sarathkumar, P., Dinesh, V., and Sathish, N., (2017), PET as Soil Stabilization Material. *International Journal of ChemTech Research*, Vol.10 No.11, 127-130.
- Manuel, M., and Joseph, S., (2014), Stability Analysis of Kuttanad Clay Reinforced with PET Bottle Strips. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, Vol. 3 Issue 11.
- Maheshwari, K., and ark., (2013), Effect of Polyester Fibers on Strength Properties of Clayey Soil of High Plasticity, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Volume 4, Issue 6.
- Mahmutluoğlu, B. ve Bağrıaçık, B., (2021), Cam Atık Çamuru ile Güçlendirilmiş Kilin Mukavemet, Oturma ve Şişme Davranışlarının İncelenmesi: Çevre Dostu Bir Zemin İyileştirme Yaklaşımı, *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, Cilt 13, Sayı 2, 612 – 624.
- John D. Nelson and Debora J. Miller, *Expansive Soils Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering*, J. Willey and Sons., Canada 1992.
- Neubauer, C. H. And Thompson, M. R., (1972), Stability Properties Of Uncured LimeTreated Fine-Grained Soil, *Highway Research Record No.381, Highway Research Board*, 20-26.
- Akın Önalp ve Ersin Arel, *Geoteknik Bilgisi I Zeminler ve Mekaniği*, Birsen Yayınevi, İstanbul 2013.
- Öz, M. Y., (2015), *Sıvılaşmaya karşı jet grouting yöntemi ile örnek bir iyileştirme uygulamasının incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- Kutay Özeydin, *Zemin Mekaniği*, Birsen Yayınevi, İstanbul 2000.
- Öztürk, A., (2019), *Atık Karbon Karasının Yüksek Plastisiteli Kil Zeminin Bazı Geoteknik Özelliklerine Etkisi* (Yüksek Lisans Tezi). Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Pal, S., Sonthwal, V., and Rattan, J., (2015), Soil Stabilisation Using Polypropylene as Waste Fibre Material. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, Vol. 4, Issue 11, 2319-8753.
- Poweth, M., Haneef, F., Jacob, M., Krishnan, R., and Rajan, S., (2014), Effect of Plastic Granules on the Properties of Soil. *Journal of Engineering Research and Applications*, Vol. 4, 160-164.

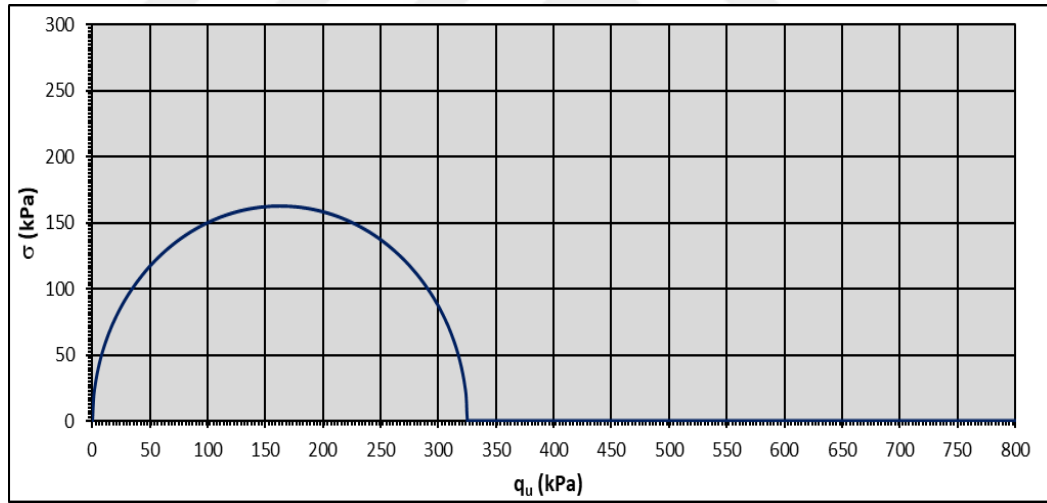
- Raman, V., (1967), Identification of Expansive Soils from the Plasticity Index and the Shrinkage Index Data, *Indian Engineering*, Calcutta 11(1).
- Sağlam, A., “Zemin İyileştirme Yöntemleri”, *Zm 11 Karadeniz Teknik Üniversitesi*, 2017, <https://docplayer.biz.tr/5406550-Yontemleri-zm-11-karadeniz-teknik-universitesi-trabzon.html#>
- Saravanan, S., and Ravindraraj, B., (2018), Soil Stabilisation Using Raw Plastic Bottles. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, Volume 9, Issue 4, 812–815.
- Saravanan, R., Murthi, P., Poongodi, K., and Raju, A., (2020), A study on the effect of waste plastic strips in the stabilization of clay soil. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 981.
- Shuai, F., (1996). *Simulation of swelling preure measurements on expansive soils* (Doctoral Thesis). University of Saskatchewan, College of Graduate Studies and Research, Canada.
- Sridharan, A., Rao, A. S., and Sivapullaiah, P. V., (1986), Swelling pressure of clays. *Geotechnical Testing Journal*, 9 (1), 24-33.
- Thomas, P.J. (1998). *Quantifying properties and variability of expansive soils in selected map units* (Doctoral Thesis). Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia.
- Tumluer, G., (2006), *Çimento katkılı kumlu zeminlerin mukavemeti* (Yüksek Lisans Tezi). Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Turan, F., (2015), *Killi zeminlerin yük altında oturmalarının nümerik analizi*, (Uzmanlık Tezi). İller Bankası Anonim Şirketi, İstanbul.
- Turan, E., (2019), *Bor atığı pestillerinin mühendislik özellikleri ve yüksek plastisiteli kilin stabilizasyonunda kullanılabilirliği* (Yüksek Lisans Tezi). Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Argun Tunç, *Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları*, Nobel Yayın Dağıtım, İstanbul 2002.
- Bayram Ali Uzuner, *Temel Zemin Mekaniği*, Derya Kitabevi, Trabzon 2013.
- Yaşar, M., (2019), *Uçucu kül katkısının kilin geoteknik özelliklerine etkisi* (Yüksek Lisans Tezi). Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bartın.
- Yılmaz, V., (2021), *Yüksek fırın cürufu ve nano-sio2 ile stabilize edilen yüksek plastisiteli zeminin bir boyutlu oturma davranışının araştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.

## EKLER

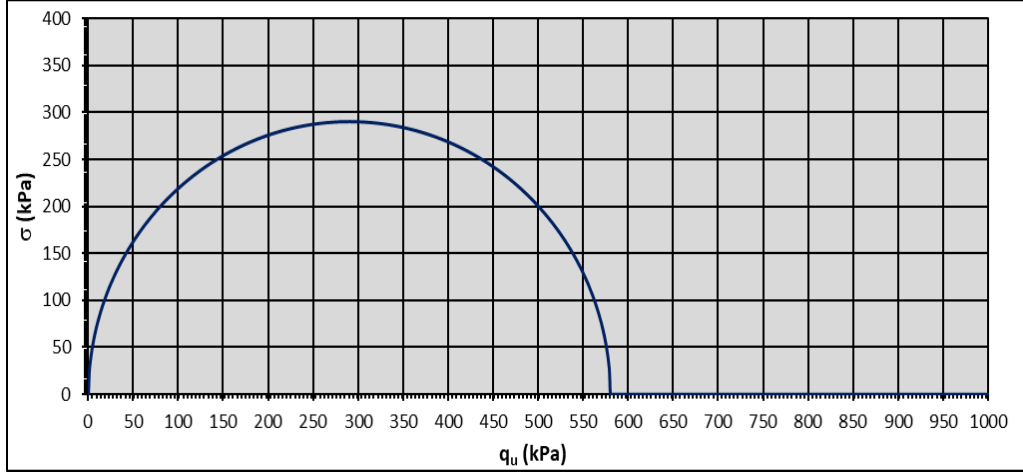
### EK A: Serbest Basınç deneyi sonuçları



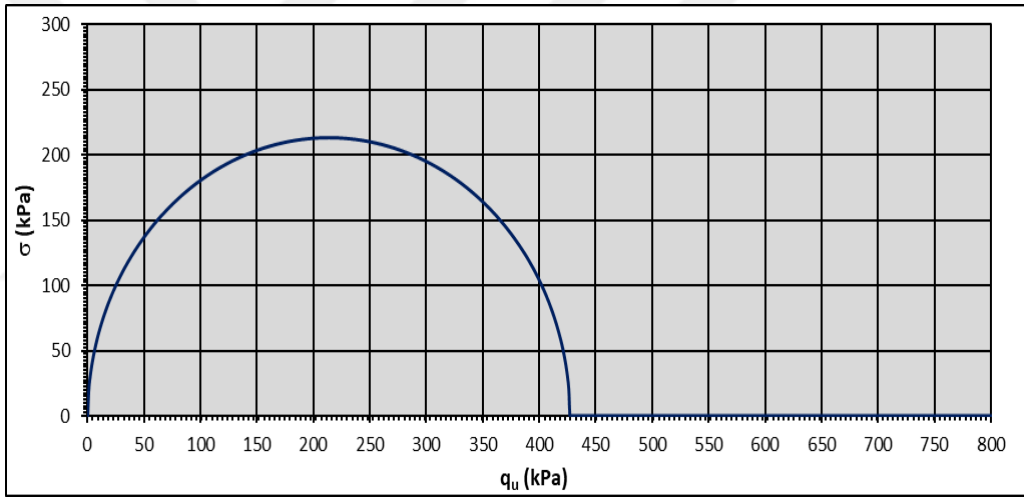
Ek A.1. % 100 CH numunesinin serbest basınç deneyi grafiği.



Ek A.2. %99.75 CH - %0.25 PA numunesinin serbest basınç deneyi grafiği.



Ek A.3. %99.50 CH - %0.50 PA numunesinin serbest basınç deneyi grafiği.



Ek A.4. %99.25 CH - %0.75 PA numunesinin serbest basınç deneyi grafiği.

## ÖZGEÇMİŞ

Duaa BABAT, Mersin Dumlupınar Anadolu Lisesi'ni bitirdikten sonra Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nden 2019 yılında mezun oldu. İyi derecede İngilizce, Arapça ve Türkçe bilmektedir. 10/01/2022

### İletişim Bilgileri

Öğrenci no :18211455

ORCID ID : <https://orcid.org/0000-0002-5735-7049>

