

**T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KURŞUN-ÇİNKO MADEN ATIĞININ ZEMİN STABİLİZASYONUNDA  
DEĞERLENDİRİLMESİ**

**FATİH BALATAN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
GEOTEKNİK PROGRAMI**

**DANIŞMAN  
PROF. DR. SUAT AKBULUT**

**İSTANBUL, 2019**

**T.C.**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KURŞUN-ÇİNKO MADEN ATIĞININ ZEMİN STABİLİZASYONUNDA  
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Fatih BALATAN tarafından hazırlanan tez çalışması 11.07.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Prof. Dr. Suat AKBULUT  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Prof. Dr. Suat AKBULUT  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ataç BAŞÇETİN  
İstanbul Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet Şükrü ÖZÇOBAN  
Yıldız Teknik Üniversitesi



Bu çalışma, TÜBİTAK'ın 116M721 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

## ÖNSÖZ

---

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, bir kil zemine, kurşun-çinko maden atık malzemesi ilave edilerek, zeminin mukavemet özelliklerinin iyileştirilmesi deneysel olarak araştırılmış ve elde edilen deney sonuçları ayrıntılı bir biçimde sunulmuştur.

Tez çalışmam süresince, ilgi ve yardımlarını esirgemeyen, çok değerli danışman hocam sayın Prof. Dr. Suat AKBULUT'a saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmamda, yardımlarını eksik etmeyen sayın Prof. Dr. Ataç BAŞÇETİN'e ve Araştırma Görevlisi Yüksek Maden Mühendisi Dr. Serkan TÜYLÜ'ye teşekkür ederim.

Deneysel çalışmam süresince, bana her zaman yardımcı olan Yüksek İnşaat Mühendisi Hazal Berrak GENÇDAL, Araştırma Görevlisi Yüksek İnşaat Mühendisi Ceren AYDIN ve değerli arkadaşım Yüksek İnşaat Mühendisi Mehmet Hakan DOĞRU'ya çok teşekkür ederim.

Tez sürecinde manevi desteğini esirgemeyen değerli dostum Barış ATAKİŞİ'ye çok teşekkür ederim.

Tez sürecinde her zaman yanımda olan çok değerli Nadejda MOTİNA'ya sonsuz sevgilerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim süresince benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, yol gösterici olan babam Hasan Metin BALATAN, annem Sevgi BALATAN ve sevgili abim Murat BALATAN'a sonsuz saygı ve sevgilerimi sunarım.

Temmuz, 2019

Fatih BALATAN

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	viii
KISALTMA LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ .....	xvi
ÖZET .....	xviii
ABSTRACT.....	xx
<b>BÖLÜM 1</b>	
GİRİŞ.....	1
1.1    Literatür Özeti .....	1
1.2    Tezin Amacı .....	22
1.3    Hipotez .....	22
<b>BÖLÜM 2</b>	
ZEMİNLERİN STABİLİZASYONU.....	23
2.1    Killer .....	23
2.2    Zeminlerin Stabilizasyonu .....	27
2.3    Zemin Stabilizasyon Yöntemleri.....	28
2.4    Katkılı Zemin Stabilizasyonu.....	30
2.4.1    Kireç ile Zemin Stabilizasyonu .....	31
2.4.2    Çimento ile Zemin Stabilizasyonu.....	33
2.4.3    Uçucu Kül ile Zemin Stabilizasyonu .....	35
2.4.4    Silis Dumanı ile Zemin Stabilizasyonu.....	37
2.4.5    Mermer Tozu .....	38
2.4.6    Çelikhane Cüruf Atıkları .....	39
2.4.7    Kırmızı Çamur Atığı .....	40
2.4.8    Gaz Beton Atığı .....	41

2.4.9	İnşaat Yıkıntı Atığı .....	42
2.4.10	Bitüm .....	43
2.5	Kayma Mukavemeti ve Konsolidasyon .....	44
2.5.1	Kompaksiyon .....	44
2.5.2	Kayma Mukavemeti .....	46
2.5.3	Mohr Coulomb Göçme Hipotezi .....	48
2.5.4	Konsolidasyon .....	50

### BÖLÜM 3

MALZEME VE YÖNTEM .....	52	
3.1	DeneySEL Çalışmada Kullanılan Malzemeler .....	52
3.1.1	Kil .....	52
3.1.2	Kurşun-Çinko Maden Atık Malzemesi .....	54
3.1.3	Uçucu Kül .....	57
3.1.4	Çimento .....	58
3.1.5	Şebeke Suyu .....	59
3.2	Tez Çalışmasında Kullanılan Deney Düzenleri .....	60
3.2.1	Özgül Ağırlık Deneyi .....	61
3.2.2	Dane Çapı Dağılımı .....	61
3.2.3	Kıvam Limit Deneyleri .....	63
3.2.4	Kompaksiyon .....	65
3.2.5	Serbest Basınç Deneyi .....	66
3.2.6	Üç Eksenli Basınç Deneyi .....	69
3.2.7	Direkt Kesme Kutusu Deneyi .....	72
3.2.8	Konsolidasyon Deneyi .....	75
3.2.9	Taramalı Elektron Mikroskop Analizi (SEM) .....	77
3.2.10	X-ray Difraksiyon Analizi (XRD) .....	79

### BÖLÜM 4

DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ .....	80	
4.1	Pb-Zn Katkılı Kil Numuneler .....	80
4.1.1	Özgül Ağırlık Deney Sonuçları .....	81
4.1.2	Dane Çapı Dağılım Deney Sonuçları .....	82
4.1.3	Kıvam Limit Deney Sonuçları .....	83
4.1.4	Kompaksiyon Deney Sonuçları .....	86
4.1.5	Mukavemet Deneyleri için Karışım Numunelerinin Hazırlanması .....	89
4.1.6	Serbest Basınç Deneyi Sonuçları .....	91
4.1.7	Üç Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları .....	94
4.1.8	Kesme Kutusu Deneyi Sonuçları .....	99
4.2	Uçucu Kül ile Harmanlanan Pb-Zn Katkılı Kil Numuneler .....	103
4.2.1	Kıvam Limit Deney Sonuçları .....	104
4.2.2	Kompaksiyon Deney Sonuçları .....	105
4.2.3	Serbest Basınç Deneyi Sonuçları .....	109
4.2.4	Üç Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları .....	112
4.3	Çimento ile Harmanlanan Pb-Zn Katkılı Kil Numuneler .....	118
4.3.1	Serbest Basınç Deneyi Sonuçları .....	118

4.3.2	Üç Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları .....	122
4.4	Uçucu Kül ve Çimento ile Harmanlanan Pb-Zn Katkılı Kil Numuneler ....	125
4.4.1	Serbest Basınç Deneyi Sonuçları.....	125
4.4.2	Üç Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları .....	127
4.5	Mukavemet Deneyleri Sonucunda Kilde Elde Edilen İyileşme Oranları .	132
4.6	Pb-Zn Atık Malzemesinin Kil, Uçucu Kül ve Çimento ile İyileştirilmesi ...	134
4.6.1	Kompaksiyon Deney Sonuçları .....	134
4.6.2	Serbest Basınç Deneyi Sonuçları.....	136
4.6.3	Üç Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları .....	138
4.7	Mukavemet Deneyleri Sonucunda Pb-Zn Numunelerindeki İyileşme Oranları .....	144
4.8	Şişme Basıncı ve Konsolidasyon Deneyi Sonuçları.....	145
4.9	Taramalı Elektron Mikroskop Analizi (SEM) Sonuçları.....	152

## BÖLÜM 5

SONUÇ VE ÖNERİLER .....	155
KAYNAKLAR .....	159
ÖZGEÇMİŞ .....	165

## SİMGE LİSTESİ

---

$c$	Kohezyon
$c_u$	Drenajsız Kayma Mukavemeti
$D$	Numune Çapı
$G_s$	Özgül Ağırlık
$I_p$	Plastisite İndeksi
$q_u$	Serbest Basınç Mukavemeti
$S$	Suya Doymunluk Derecesi
$W$	Su Muhtevası
$W_{opt}$	Optimum Su Muhtevası
$W_L$	Likit Limit
$W_P$	Plastik Limit
$\chi_k$	Kuru Birim Hacim Ağırlık
$\sigma$	Normal Gerilme
$\tau$	Kayma Gerilmesi
$\epsilon$	Şekil Değişirme
$\phi$	Kayma Mukavemeti Açısı
$a_v$	Sıkışabilirlik Katsayısı
$m_v$	Hacimsel Sıkışabilirlik Katsayısı
$c_c$	Sıkışım İndisi
$c_s$	Şişme İndisi



## KISALTMA LİSTESİ

---

ASTM	American Society for Testing and Materials
CH	Yüksek Plastisiteli Kil
ML	Düşük Plastisiteli Kil
Pb-Zn	Kurşun-Çinko Maden Atık Malzemesi
SB	Serbest Basınç Deneyi
SEM	Taramalı Elektron Mikroskop Deneyi
SP	Standart Proktor Test
UCS	Serbest Basınç Mukavemeti
USCS	Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi
UU	Konsolidasyonsuz Drenajsız Üç Eksenli Basınç Deneyi
YTÜ	Yıldız Teknik Üniversitesi

## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1	Kireç malzemesinin serbest basınç mukavemetine etkisi ..... 3
Şekil 1.2	Hamble kilinin drenajsız kayma mukavemetinin 4 farklı çimento yüzdesi ile değişimi ..... 4
Şekil 1.3	Kil ve Uçucu Kül ilave edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemet – su muhtevası grafiği ..... 4
Şekil 1.4	Uçucu kül oranının serbest basınç mukavemet değerlerine olan etkisi [5] .. 5
Şekil 1.5	Serbest Basınç Mukavemeti – Uçucu Kül Atık Oranı Grafiği [6] ..... 5
Şekil 1.6	Çimento katkılı karışım numunelerinin kür süresine göre serbest basınç mukavemet – çimento ..... 6
Şekil 1.7	Farklı oranlarda mermer tozu ile harmanlanan kil + bentonit karışım numunelerinin 1 ve 7 gün kür süreli serbest basınç mukavemet – katkı oranı grafiği ..... 7
Şekil 1.8	BOF Cüruf Oranı - Serbest Basınç Mukavemet Grafiği ..... 8
Şekil 1.9	Silis dumanı ile harmanlanmış kil karışım numunelerinin kompaksiyon (a) ve serbest basınç mukavemet – silis dumanı katkı oranı (b) grafileri ..... 9
Şekil 1.10	Şişme Basıncı – Silis Dumanı Oranı Grafiği..... 10
Şekil 1.11	Kaolen kili ile farklı oranlarda harmanlanan inşaat yıkıntı atığının serbest basınç mukavemet değer grafiği ..... 11
Şekil 1.12	Cam Tozu Oranı ve Serbest Basınç Mukavemet İlişkisi Grafiği..... 12
Şekil 1.13	Farklı oranlarda Çatalağzı uçucu külü ile harmanlanan Afyon kili karışım numunelerinin şişme basıncı değişimi ..... 13
Şekil 1.14	Kil – öğütülmüş gazbeton karışım numunelerinin serbest basınç mukavemet – birim deformasyon grafiği..... 14
Şekil 1.15	Maksimum kuru birim hacim ağırlık – Su muhtevası (a) ve Serbest basınç mukavemet (b) grafiği..... 15
Şekil 1.16	Serbest Basınç Mukavemet – Kırmızı Çamur Oranı Atık Grafiği ..... 16
Şekil 1.17	Kırmızı çamur katkılı karışım numunelerinin serbest basınç mukavemet ve kohezyon – katkı yüzdesi grafiği ..... 17
Şekil 1.18	Kırmızı çamur katkılı kil numunelerinin şişme basıncı – katkı yüzdesi grafiği ..... 17
Şekil 1.19	EAF Cüruf katkılı kil numunelerinin kıvam ve kayma dayanımı-normal basınç grafiği ..... 18
Şekil 1.20	Kuvars kumu ile harmanlanan kırmızı kil karışım numunelerinin serbest basınç mukavemet – kum oranı grafiği..... 19

Şekil 1.21	Kuars kumu - kırmızı kil numunelerinin kesme kutusu deneyi sonucunda elde edilen kohezyon (a) ve içsel sürtünme açısı (b) – kum oranı grafikleri	20
Şekil 1.22	Mermer katkılı zemin numunelerinin SEM görüntüleri - (a) Katkısız Kil, (b) %5 MT+%95 Kil, (c) %10 MT+%90 Kil, (d) %15 MT+%85 Kil.....	21
Şekil 2.1	Bazı kil minerallerinin şematik diyagramları- Kaolinit (a), Montmorillonit (b), İllit (c), Klorit (d) .....	25
Şekil 2.2	Şişme potansiyelinin belirlenmesinde kullanılan abak .....	26
Şekil 2.3	Farklı Dane Boyutundaki Kireçler .....	31
Şekil 2.4	Kireç ile Zemin İyileştirme Uygulaması .....	31
Şekil 2.5	Kıvam limit değerlerinin kireç oranı ile değişimi.....	33
Şekil 2.6	Çimento stabilizasyonu .....	34
Şekil 2.7	Uçucu kül atık malzemesinin SEM görüntüsü.....	36
Şekil 2.8	Silis Dumanı.....	38
Şekil 2.9	Mermer Tozu .....	38
Şekil 2.10	Metal Cürufu .....	39
Şekil 2.11	Kırmızı Çamur Atık Malzemesi .....	40
Şekil 2.12	Zemin stabilizasyon işlemlerinde kullanılan öğütülmüş gaz beton atığı .....	41
Şekil 2.13	İnşaat Yıkıntı Atığı .....	42
Şekil 2.14	Yol stabilizasyon işlemlerinde bitüm uygulaması .....	43
Şekil 2.15	Kompaksiyon sonrası zemin durumu.....	44
Şekil 2.16	Kompakte edilmiş bir zeminde $\gamma_k - W$ ilişkisi.....	45
Şekil 2.17	Standart ve Modifiye Proktor deneyi sonucunda elde edilen eğriler .....	46
Şekil 2.18	Zayıf zeminlerde yaşanan oturma problemi.....	47
Şekil 2.19	Göçme yüzeyi boyunca oluşan kayma gerilmeleri .....	47
Şekil 2.20	Tayvan'da meydana gelen şev kayması.....	48
Şekil 2.21	Mohr-Coulomb Göçme Hipotezi .....	50
Şekil 2.22	Konsolidasyon oturması sorunu yaşayan bir yapı .....	50
Şekil 2.23	Konsolidasyon deformasyon – zaman ilişkisi grafiği .....	51
Şekil 3.1	Öğütülmemiş zemin (a) ve Öğütülmüş zemin (b) .....	53
Şekil 3.2	Kil numunesinin XRD analiz kırınım grafiği .....	54
Şekil 3.3	Çamur kıvamında muhafaza edilen (a) ve etüve konulmadan önceki (b) kurşun-çinko maden atık malzemesi .....	55
Şekil 3.4	Pb-Zn maden atık malzemesinin XRD analiz kırınım grafiği.....	57
Şekil 3.5	Uçucu kül.....	57
Şekil 3.6	Çimento.....	58
Şekil 3.7	Şebeke suyu .....	59
Şekil 3.8	Deney Programı .....	60
Şekil 3.9	Deneyel Çalışmadaki Karışımlar .....	60
Şekil 3.10	Piknometre Deney Düzenegi .....	61
Şekil 3.11	Elek Seti (a), Hidrometre kabı (b) - Dane Çapı Dağılım Deney Düzenegi.....	62
Şekil 3.12	İnce daneli zeminlerin kıvam limitleri .....	63
Şekil 3.13	Atterberg Kıvam Deneyi Düzenegi.....	63
Şekil 3.14	Cassagrande Plastisite Kartı .....	64
Şekil 3.15	Kompaksiyon Deney Düzenegi .....	66
Şekil 3.16	Deney sonrası numune kırılma açısı (a), Gerilme-Deformasyon Grafiği (b) .....	67

Şekil 3.17	Mohr Dairesi ve Mukavemet Zarfı.....	68
Şekil 3.18	Serbest basınç deneyi sonucunda numunelerin boy deformasyon değişimi .....	68
Şekil 3.19	Serbest Basınç Deney Düzeneği.....	68
Şekil 3.20	Üç eksenli basınç hücresi, membrana geçirilmiş numune ve su ile doldurulmuş cam hücre .....	70
Şekil 3.21	Üç Eksenli Basınç Deneyi Düzeneği.....	71
Şekil 3.22	Üç eksenli basınç deneyindeki gerilme durumlarının gösteren Mohr Daireleri.....	71
Şekil 3.23	Direkt Kesme Kutusu Deney Düzeneği .....	73
Şekil 3.24	Direkt kesme kutusu deney aparatları .....	73
Şekil 3.25	Kesme kutusu cihazı çalışma prensibi.....	73
Şekil 3.26	Kesme kutusu deney sonucunda zemine ait c ve $\phi$ değerlerinin belirlenmesi .....	74
Şekil 3.27	Konsolidasyon deneyi çalışma prensibi .....	75
Şekil 3.28	Konsolidasyon Deney Düzeneği.....	76
Şekil 3.29	Konsolidasyon deney aparatları .....	76
Şekil 3.30	Analiz için hazırlanan numuneler (a), Taramalı Elektron Mikroskop Cihazı (b).....	78
Şekil 3.31	Taramalı Elektron Mikroskobu Analiz Cihazı .....	78
Şekil 3.32	XRD Cihazı .....	79
Şekil 4.1	Dane Kuru Birim Hacim Ağırlık – Katkı Oranı Grafiği .....	81
Şekil 4.2	Hidrometre Eğrisi Kil .....	82
Şekil 4.3	Pb-Zn katkılı kil numunelerinin, plastisite kartı üzerindeki gösterimi .....	83
Şekil 4.4	Kil ve kurşun-çinko maden atık malzemesinin şişme değeri grafiği .....	84
Şekil 4.5	Pb-Zn katkılı kil numunelerinin plastisite kartındaki gösterimi .....	84
Şekil 4.6	Pb-Zn katkılı kil numunelerin kıvam limit değerleri .....	85
Şekil 4.7	Kil, Pb-Zn ve uçucu kül malzemelerinin kuru birim hacim ağırlık – optimum su muhtevası grafiği .....	86
Şekil 4.8	Pb-Zn katkılı kil zemin numunelerinin maksimum kuru birim hacim ağırlık- optimum su muhtevası grafikleri .....	87
Şekil 4.9	Pb-Zn katkılı kil numunelerin optimum su muhtevası (a), maksimum kuru birim hacim ağırlık (b) – Pb-Zn katkı oranı grafikleri.....	88
Şekil 4.10	Metal Numune Alıcılar (a) ve Silindirik Numune (b).....	90
Şekil 4.11	Kesme kutusu ringi (c) ve konsolidasyon ringi (d) .....	90
Şekil 4.12	Cam desikatör (e) ve etüv (f) .....	91
Şekil 4.13	Pb-Zn katkılı kil numunelerinin serbest basınç mukavemet.....	92
Şekil 4.14	Pb-Zn katkılı kil numunelerinin serbest basınç mukavemet – katkı oranı grafiki .....	92
Şekil 4.15	Serbest basınç deney cihazı ve deney sonrası zemin numuneleri.....	93
Şekil 4.16	Deney öncesi (a) ve deney sonrasındaki (b) numunenin üç eksenli basınç deney düzeneğinin içindeki görünümü.....	94
Şekil 4.17	Üç eksenli basınç deneyi sonrasındaki zemin numunelerinin görünümü ve kırılma açıları .....	94
Şekil 4.18	Pb-Zn katkılı kil numunelerin 50 kPa (a) ve 200 kPa (b) çevre basıncı altındaki deviatör gerilme - şekil değiştirme grafikleri .....	96

Şekil 4.19	Pb-Zn katkılı kil numunelerin kohezyon (a) ve kayma mukavemeti açısı (b) – Pb-Zn katkı oranı grafiği .....	97
Şekil 4.20	Pb-Zn katkılı kil numunelerin 50 kPa ve 200 kPa çevre basıncı etkisindeki kayma direnci grafikleri.....	98
Şekil 4.21	Direkt kesme kutusu deneyi sonrasındaki zemin numunelerinin görünümü .....	99
Şekil 4.22	Pb-Zn katkılı kil numunelerin 50 kPa ve 200 kPa yatay yük etkisi altındaki kayma gerilmesi – yatay deformasyon grafiği .....	100
Şekil 4.23	Pb-Zn katkılı kil numunelerin kohezyon (a) ve kayma mukavemeti açısı (b) – Pb-Zn katkı oranı grafiği .....	101
Şekil 4.24	Pb-Zn katkılı kil numunelerin 50 kPa ve 200 kPa çevre basıncı etkisindeki kayma direnci grafikleri.....	102
Şekil 4.25	%10 oranında uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin plastisite kartındaki gösterimi.....	104
Şekil 4.26	%10 oranında uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin kıvam limit değişim grafiği .....	104
Şekil 4.27	Uçucu kül malzemesinin kuru birim hacim ağırlık – su muhtevası grafiği.	105
Şekil 4.28	%5 oranında uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin kuru birim hacim ağırlık – su muhtevası grafiği .....	106
Şekil 4.29	%10 oranında uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin kuru birim hacim ağırlık – su muhtevası grafiği .....	107
Şekil 4.30	%20 oranında uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin kuru birim hacim ağırlık – su muhtevası grafiği .....	107
Şekil 4.31	Uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin optimum su muhtevası – Pb-Zn katkı oranı grafiği .....	108
Şekil 4.32	Uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin maksimum kuru birim hacim ağırlık – Pb-Zn katkı oranı grafiği .....	108
Şekil 4.33	%5 oranında uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin serbest basınç mukavemet – birim şekil değiştirme grafiği .....	110
Şekil 4.34	%10 oranında uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin serbest basınç mukavemet – birim şekil değiştirme grafiği .....	110
Şekil 4.35	%20 oranında uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin serbest basınç mukavemet – birim şekil değiştirme grafiği .....	111
Şekil 4.36	%5 oranında uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin 50 kPa çevre basıncı altındaki deviatör gerilme – birim şekil değiştirme grafiği .....	112
Şekil 4.37	%5 oranında uçucu kül ile harmanlanan karışım numunelerinin kohezyon (a) - içsel sürtünme açısı (b) grafikleri.....	113
Şekil 4.38	%5 oranında uçucu kül ile harmanlanan karışım numunelerinin 50 kPa ve 200 kPa çevre basıncı etkisindeki kayma direnci grafikleri.....	114
Şekil 4.39	%10 oranında uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin 50 kPa (a) ve 200 kPa (b) çevre basıncı altındaki deviatör gerilme – birim şekil değiştirme .....	115
Şekil 4.40	%10 oranında uçucu kül ile harmanlanan karışım numunelerinin kohezyon (a) - içsel sürtünme açısı (b) grafikleri.....	116
Şekil 4.41	%10 oranında uçucu kül ile harmanlanan karışım numunelerinin 50 kPa ve 200 kPa çevre basıncı etkisindeki kayma direnci grafikleri.....	117

Şekil 4.42	Çimento ilaveli Pb-Zn katkılı kil numunelerin, 1 gün kür süresi sonrasındaki serbest basınç mukavemet – şekil değiştirme grafiği .....	119
Şekil 4.43	Çimento ilaveli Pb-Zn katkılı kil numunelerin, 7 gün kür süresi sonrasındaki serbest basınç mukavemet – şekil değiştirme grafiği .....	120
Şekil 4.44	Çimento ilaveli Pb-Zn katkılı kil numunelerin 1 ve 7 gün kürleme süresi sonundaki serbest basınç mukavemet – çimento oranı grafiği.....	121
Şekil 4.45	Farklı oranlarda çimento ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin 50 kPa (a) ve 200 kPa (b) çevre basıncındaki deviatör gerilme - şekil değiştirme grafiği .....	122
Şekil 4.46	Farklı oranlarda çimento ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin kohezyon (a) ve kayma mukavemeti açısı (b) grafikleri .....	123
Şekil 4.47	Farklı oranlarda çimento ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin 50 kPa ve 200 kPa çevre basıncı etkisindeki kayma direnci grafiği.....	124
Şekil 4.48	Çimento ve uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunesinin serbest basınç mukavemet – birim şekil değiştirme grafiği .....	125
Şekil 4.49	Çimento ve uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin 50 kPa (a) ve 200 kPa (b) çevre basıncı etkisindeki gerilme - birim şekil değiştirme grafiği .....	127
Şekil 4.50	Farklı oranlarda uçucu kül ve çimento ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin kohezyon (a) ve kayma mukavemeti açısı (b) grafikleri .....	128
Şekil 4.51	Farklı oranlarda uçucu kül ve çimento ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin 50 kPa ve 200 kPa çevre basıncı etkisindeki kayma direnci grafiği .....	129
Şekil 4.52	Pb-Zn, uçucu kül ve çimento katkılı karışım numunelerinin serbest basınç mukavemet – birim şekil değiştirme grafiği.....	130
Şekil 4.53	Pb-Zn, uçucu kül ve çimento katkılı karışım numunelerinin serbest basınç mukavemet – numune grupları grafiği .....	130
Şekil 4.54	Pb-Zn, uçucu kül ve çimento katkılı karışım numunelerinin kohezyon (a), kayma mukavemeti açısı (b) – numune grupları grafikleri .....	131
Şekil 4.55	Pb-Zn, uçucu kül ve çimento katkılı karışım numunelerinin 50 kPa ve 200 kPa çevre basıncı etkisindeki kayma direnci – numune grupları grafiği....	132
Şekil 4.56	Uçucu kül ve çimento ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin kuru birim hacim ağırlık – su muhtevası grafiği .....	135
Şekil 4.57	%80 oranında Pb-Zn katkılı karışım numunelerinin serbest basınç mukavemet – birim şekil değiştirme grafiği.....	136
Şekil 4.58	%80 oranında Pb-Zn katkılı karışım numunelerinin serbest basınç mukavemet – numune grupları grafiği .....	136
Şekil 4.59	%60 oranında Pb-Zn katkılı karışım numunelerinin katkısız Pb-Zn'ye göre serbest basınç mukavemet – birim şekil değiştirme grafiği .....	137
Şekil 4.60	%60 oranında Pb-Zn katkılı karışım numunelerinin serbest basınç mukavemet – numune grupları grafiği .....	137
Şekil 4.61	Pb-Zn katkılı kil numunelerinin 50 kPa (a) ve 200 kPa (b) çevre basıncı altındaki deviatör gerilme - şekil değiştirme grafikleri .....	138
Şekil 4.62	Pb-Zn katkılı kil numunelerinin kohezyon (a), kayma mukavemeti açısı (b) – numune grupları grafikleri .....	139
Şekil 4.63	Pb-Zn katkılı kil numunelerinin 50 kPa ve 200 kPa çevre basıncı etkisindeki kayma direnci – numune grupları grafiği.....	140

Şekil 4.64	Pb-Zn katkılı karışım numunelerinin 50 kPa (a) ve 200 kPa (b) çevre basıncı altındaki deviatör gerilme - şekil değiştirme grafikleri .....	141
Şekil 4.65	Pb-Zn katkılı karışım numunelerinin kohezyon (a), kayma mukavemeti açısı (b) – numune grupları grafikleri .....	142
Şekil 4.66	Pb-Zn katkılı kil numunelerinin 50 kPa ve 200 kPa çevre basıncı etkisindeki kayma direnci – numune grupları grafiği .....	143
Şekil 4.67	Pb-Zn katkısı ile harmanlanan kil numunelerinin şişme basıncı – Pb-Zn katkı oranı grafiği .....	146
Şekil 4.68	Katkısız kil numunesinin e-log P grafiği.....	147
Şekil 4.69	%20 oranında Pb-Zn katkılı kil numunesinin e-logP grafiği .....	147
Şekil 4.70	%40 oranında Pb-Zn katkılı kil numunesinin e-logP grafiği .....	148
Şekil 4.71	%60 oranında Pb-Zn katkılı kil numunesinin e-logP grafiği .....	148
Şekil 4.72	%80 oranında Pb-Zn katkılı kil numunesinin e-logP grafiği .....	148
Şekil 4.73	Katkısız Pb-Zn numunesinin e-logP grafiği.....	149
Şekil 4.74	%5 oranında uçucu kül ve %20 oranında Pb-Zn katkılı kil numunesinin e-logP grafiği.....	149
Şekil 4.75	Pb-Zn katkılı kil numunelerinin sıkışabilirlik katsayısı – Pb-Zn katkı oranı grafiği .....	150
Şekil 4.76	Pb-Zn katkılı kil numunelerinin hacimsel sıkışabilirlik katsayısı – Pb-Zn katkı oranı grafiği .....	150
Şekil 4.77	Pb-Zn katkılı kil numunelerinin sıkışma indisi – Pb-Zn katkı oranı grafiği..	151
Şekil 4.78	Pb-Zn katkılı kil numunelerinin şişme indisi – Pb-Zn katkı oranı grafiği ....	151
Şekil 4.79	Pb-Zn, uçucu kül ve çimento katkılı kil numunelerinin 10000x boyutundaki SEM görüntüleri .....	154

## ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 1.1	Hamble kilindeki ortalama drenajsız kayma mukavemeti değerleri ..... 3
Çizelge 1.2	Farklı oranlarda mermer tozuyla harmanlanmış kil numunelerinin dayanım, optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri ..... 6
Çizelge 1.3	Mermer tozu katkılı kil+bentonit karışım numunelerinin serbest basınç mukavemet deneyi ve iyileşme oranı değerleri ..... 8
Çizelge 1.4	Kaolen - İYA karışımlarının mukavemet ve kıvam deneyi değerleri ..... 11
Çizelge 1.5	Öğütülmüş gazbeton içeren karışım numunelerinin kıvam, kompaksiyon ve serbest basınç deney sonucu elde edilen parametreleri ..... 14
Çizelge 1.6	Kırmızı Çamur Atığı ile harmanlanan karışım numunelerinin kıvam ve serbest basınç mukavemet deney sonuçları ..... 16
Çizelge 2.1	Bazı kil minerallerinin fiziksel özellikleri ..... 24
Çizelge 2.2	Şişen zeminlerin sınıflandırılması ..... 26
Çizelge 3.1	Kilin Fiziksel Özellikleri ..... 51
Çizelge 3.2	Kurşun-Çinko malzemesinin elementel analizi ..... 53
Çizelge 3.3	Kurşun-Çinko maden atık malzemesinin fiziksel özellikleri ..... 54
Çizelge 3.4	Uçucu kül malzemesinin elementel analizi ..... 56
Çizelge 3.5	Çimento malzemesinin elementel analizi ..... 57
Çizelge 4.1	Kil ve Pb-Zn karışım numuneleri ..... 81
Çizelge 4.2	Pb-Zn katkılı kil numunelerinin özgül ağırlık değerleri ..... 82
Çizelge 4.3	Kil ve Pb-Zn karışım numunelerinin kıvam limit değerleri ..... 85
Çizelge 4.4	Kil, Pb-Zn ve Uçucu Kül malzemelerinin standart proktor kompaksiyon deneyi sonucu elde edilen veriler ..... 86
Çizelge 4.5	Kil-Pb-Zn karışım numunelerinin optimum su muhteva – maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri ..... 89
Çizelge 4.6	Pb-Zn katkılı kil numunelerinin serbest basınç mukavemet değerleri .... 93
Çizelge 4.7	Pb-Zn katkılı kil numunelerinin üç eksenli basınç deneyi sonucunda elde edilen deney sonuç verileri ..... 98
Çizelge 4.8	Pb-Zn katkılı kil numunelerinin kesme kutusu deneyi sonucunda elde edilen kayma direnci, kohezyon ve içsel sürtünme açı değerleri ..... 102
Çizelge 4.9	Uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numuneleri ..... 103
Çizelge 4.10	%10 oranında uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin plastisite kartındaki kıvam değerleri ..... 105
Çizelge 4.11	Uçucu Kül malzemesinin standart proktor kompaksiyon deneyi sonucu elde edilen deney sonuç verileri ..... 106



Çizelge 4.12	Uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri.....	109
Çizelge 4.13	Uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerin serbest basınç mukavemet değerleri .....	111
Çizelge 4.14	Uçucu kül ile harmanlanmış Pb-Zn katkılı kil numunelerinin üç eksenli basınç deneyi sonucunda elde edilen parametreleri .....	117
Çizelge 4.15	Çimento ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numuneleri .....	118
Çizelge 4.16	%1, %2 ve %3 oranlarında çimento ile harmanlanan %20 Pb-Zn katkılı karışım numunelerinin, 1 gün kür süresi sonundaki serbest basınç mukavemet değerleri .....	119
Çizelge 4.17	%1, %2 ve %3 oranlarında çimento ile harmanlanan %20 Pb-Zn katkılı karışım numunelerinin, 7 gün kür süresi sonundaki serbest basınç mukavemet değerleri .....	120
Çizelge 4.18	Çimento ilaveli Pb-Zn katkılı kil numunelerin 1 ve 7 gün kürlenme süresi sonundaki serbest basınç mukavemet ve iyileşme oranı değerleri .....	121
Çizelge 4.19	Çimento ile harmanlanmış %20 oranında Pb-Zn katkılı kil numunelerinin üç eksenli basınç deneyi sonucunda elde edilen parametreleri .....	124
Çizelge 4.20	Çimento ve uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numuneleri ...	125
Çizelge 4.21	Çimento ve uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunesinin serbest basınç mukavemet değerleri .....	126
Çizelge 4.22	Çimento ve uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin üç eksenli basınç deneyi sonucunda elde edilen parametreleri.....	129
Çizelge 4.23	Uçucu kül ve çimento ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin serbest basınç mukavemet ve katkısız kile göre iyileşme oranı değerleri .....	133
Çizelge 4.24	Uçucu kül ve çimento ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin üç eksenli basınç deneyi parametreleri ve katkısız kile göre iyileşme oranı değerleri .....	134
Çizelge 4.25	Uçucu kül ve çimento ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri .....	135
Çizelge 4.26	Pb-Zn katkılı kil numunelerinin üç eksenli basınç deneyi sonuçları.....	140
Çizelge 4.27	Pb-Zn katkılı kil numunelerin üç eksenli basınç deneyinden elde edilen sonuçlar .....	143
Çizelge 4.28	Kil, uçucu kül ve çimento ile harmanlanan Pb-Zn numunelerinin serbest basınç mukavemet ve katkısız Pb-Zn malzemesine göre iyileşme oranı değerleri .....	144
Çizelge 4.29	Kil, uçucu kül ve çimento ile harmanlanan Pb-Zn numunelerinin üç eksenli basınç deneyi parametreleri ve katkısız Pb-Zn'ye göre iyileşme oranı değerleri.....	145
Çizelge 4.30	Farklı oranlarda harmanlanan zemin numunelerinin şişme basıncı değerleri .....	146
Çizelge 4.31	Pb-Zn katkılı kil numunelerinin konsolidasyon parametreleri.....	152
Çizelge 4.32	SEM analizi uygulanan numune grupları .....	152

## KURŞUN-ÇİNKO MADEN ATIĞININ ZEMİN STABİLİZASYONUNDA DEĞERLENDİRİLMESİ

Fatih BALATAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Suat AKBULUT

Günümüzde maden yataklarından çıkarılan hammaddenin işlenmesi sonucunda ortaya çıkan maden atıklarının depolanması ya da bertaraf edilmesi ciddi maliyet gerektirmekte ve çevre sorunlarına sebep olmaktadır. Bu nedenle birçok ülkede, maden atıkları düzenli depolanmakta ve atıkların gelecekte tekrar kullanılabilirliği üzerine pek çok araştırma yapılmaktadır. Diğer yandan, maden atıklarının zeminlerin stabilizasyonunda katkı malzemesi olarak değerlendirilmesi geoteknik mühendisliğinde oldukça güncel olup, pek çok akademik araştırmanın konusunu oluşturmaktadır.

Zeminlerin stabilizasyonunda başlıca çimento ve kireç olmak üzere bunların yanında farklı maden ve endüstriyel atık ürünlerin kullanılabilirliği üzerine yapılmış çok sayıda araştırma literatürde mevcuttur. Zemin stabilizasyonunda değerlendirilen katkılara uçucu kül, silis dumanı, mermer/granit tozu, kırmızı çamur, inşaat atıkları, demir cürufu, polipropilen gibi petrol türevi sentetik ürünler ve saman lifleri, hint keneviri, reçine gibi doğal atıklar örnek verilebilir. Tez kapsamında Balıkesir yöresinden elde olunan kurşun-çinko maden atığının, kil zeminlerin stabilizasyonunda katkı malzemesi olarak değerlendirilmesi amaç edinilmiştir. Bu maksatla, çalışmada kurşun-çinko maden katkısı, uçucu kül ve çimento ile beraber kil zeminlere farklı oranlarda ilave edilerek katkılı kil numuneler elde olunmuştur.

Deneyisel çalışmalarda %5, %10, %20, %30, %40, %60 ve %80 oranlarında kurşun-çinko maden atığı, %5, %10 ve %20 oranlarında uçucu kül ve %1, %2, %3 ve %5 oranlarında imento ağırlıkça kil zeminlere katkı olarak eklenmiş ve katkılı kil numuneler üzerinde kıvam, elek analizi, serbest basınç, u eksenli basınç, kesme ve ödometre deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre sırası ile %20 kurşun-çinko maden katkı, %20 kurşun-çinko - %5 uçucu kül katkı, %20 kurşun-çinko - %3 imento ve %20 kurşun-çinko - %5 uçucu kül - %2 imento katkılı kil numunelerde en yüksek mukavemet değerlerine ulaşılmıştır. Sonuçlar göreceli olarak değerlendirildiğinde, kurşun-çinko maden atık katkısının hem tek başına hem de uçucu kül ve imento katkıları ile beraber killerin stabilizasyonunda kullanılabilme potansiyeline sahip olduğu ortaya konulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Zemin stabilizasyonu, kil, maden atıkları, kurşun-inko atığı, uucu kl, imento



**EVALUATION OF LEAD-ZINC MINING WASTE IN SOIL STABILIZATION**

Fatih BALATAN

Department of Civil Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Suat AKBULUT

Nowadays, disposal and storage of mining waste which is resulting from processing of raw material, extracted from mineral deposits requires big costs and causes environmental problems. For this reason, in many countries, mining waste is being stored regularly and many studies are being carried out on reusing of waste in the future. On the other hand, the utilization of mining waste as additives in soil stabilization is highly up to date in geotechnical engineering and is being constituted a subject of many academic researches.

Numerous studies on the utilization of different mining and industrial waste products, mainly cement and lime, are available for soil stabilization in the literature. The additives which are being evaluated in soil stabilization, include fly ash, silica fume marble / granite powder, red mud, construction waste, iron slag, petroleum-derived synthetic products such as polypropylene and natural waste such as straw fibers, jute, and resin can be exemplified. Within the scope of the thesis, it is aimed to evaluate the lead-zinc mining waste which is obtained from Balıkesir region as an additive material for soil stabilization. For this purpose, lead-zinc mining waste, fly ash and cement were blended with clay soils in different ratios and were obtained clay samples with additives.

In experimental studies 5%, 10%, 20%, 30%, 40%, 60% and 80% ratios lead-zinc mining waste, 5%, 10% and 20% ratios fly ash and 1%, 2%, 3% and 5% ratios cement as an

additive were blended with clay by weight of soil. A series of consistency, sieve analysis, Proctor compaction, unconfined compression strength, triaxial compression strength, direct shear strength and oedometer tests were performed to clay samples according to ASTM Standards. According to the results of the experiments, the highest strength values were obtained in clay samples with 20% lead-zinc mining additive, 20% lead-zinc-5% fly ash additive, 20% lead-zinc-3% cement additive and 20% lead-zinc-5% fly ash-2% cement additive clay samples. When the results were evaluated relatively, it was revealed that lead-zinc mining waste has the potential to be used both alone and combination with fly ash and cement additives on clay stabilization.

**Keywords:** Soil stabilization, clay, mining waste, lead-zinc waste, fly ash, cement



#### 1.1 Literatür

Geoteknik mühendisliğinde zemin iyileştirme yöntemleri, ayrı bir alan olarak incelenmekte olup, günümüzde bu alanda birçok bilimsel araştırma yapılmaktadır. Zemin iyileştirme yöntemleri içerisinde katkı zemin stabilizasyonu konusu da birçok geoteknik mühendisi tarafından incelenmekte ve yeni katkı malzemelerinin zemin iyileştirilmesinde kullanımı araştırılmaktadır. Katkı malzemelerinin zeminlere ilave edilerek kullanılması ve zeminin mukavemet özelliklerini iyileştirmesi sonucu, endüstriyel tesislerden çıkan atıkların, zemin iyileştirilmesi alanında kullanılması son yıllarda birçok akademik çalışmanın konusu olmuştur. Yapılan çalışmalar sonucu uçucu kül, silis dumanı, fırın cürufu, mermer tozu ve son yıllarda birçok yapının yıkılıp tekrar yapılması sonucu oluşan inşaat yıkıntı atıklarının zeminlere katılıp, zeminlerin mukavemet özelliklerini iyileştirdiği sonucuna varılmıştır.

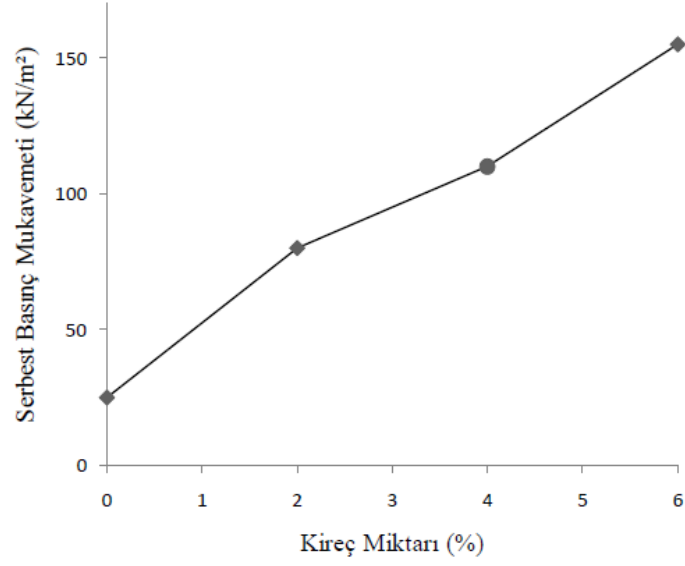
Katkılı zemin stabilizasyon yöntemleri ilk olarak ulaşım yapılarında görülmüş olup, daha sonra su yapıları ve hafif bina temellerinin sertleştirilmesinde kullanılmıştır [1]. Geçen zaman içerisinde kireç, çimento ve biyopolimer gibi yapı malzemeleri ya da uçucu kül, silis dumanı, mermer tozu, fırın cürufu, kırmızı çamur gibi endüstriyel atıkların da alternatif inşaat malzemesi olarak geoteknik alanında kullanımı yaygınlaşmış, bu malzemelerin zeminlere ilave edilerek zemin kohezyon değerlerinin artırılması ve zemin permeabilitesinin azaltılması amaçlanmıştır [2]. Ayrıca, inşaat maliyetlerinin azalmasını ve endüstriyel atıkların doğadan bertaraf edilmesini de sağlamıştır.

Sanayi tesisleri ve maden işletmelerinin sayısındaki artış yüksek oranda endüstriyel atıkların oluşmasına neden olmuştur. Yüksek oranda oluşan toz atıkların doğaya salınımı, ciddi çevre sorunları yaratmış olup, bu atıkların bertaraf edilmesi için kalıcı ve ekolojik çözümlerin oluşmasına neden olmuştur. Günümüzde endüstriyel atıkların çevre kirliliğine sebebiyet vermesi ve atık depolama alanlarının az sayıda olmasından dolayı, bu atıkların mühendislik yapılarında değerlendirilmesi büyük önem kazanmıştır. Bu durum geoteknik mühendislerini, zeminlerin stabilizasyonunda endüstriyel atıkların kullanımı konusundaki akademik çalışmalara yönlendirmiştir.

Yapılan araştırmalarda endüstriyel atıklar, %5 - %50 oran aralıklarında ve genellikle toz halde zeminlere ilave edilerek, zemin kayma mukavemeti değerlerinin artırılması, permeabilite ve şişme basıncı değerlerinin azaltılması hedeflenmiştir. İlave edilen atık oranlarının belirlenmesinde de atığın kimyasal ve fiziksel yapısı etkin rol oynamıştır.

Katkılı zemin stabilizasyonunda, kil zeminlere genellikle toz halde bulunan çimento, uçucu kül, silis dumanı, mermer tozu gibi katkıları ilave edilerek mukavemet özellikleri deneysel olarak incelenmiş olup, konuyla ilgili yapılan akademik çalışmalara aşağıda yer verilmiştir.

Neubauer ve Thompson [3], Vicksburg kiline %2, %4 ve %6 oranlarında kireç ilave etmiş ve kireç oranı arttıkça, serbest basınç mukavemet değerinin de artış gösterdiği gözlenmiştir (Şekil 1.1). Bu da kireç malzemesinin zeminlerin stabilizasyonunda kullanılabilir bir malzeme olduğunu ortaya koymaktadır.



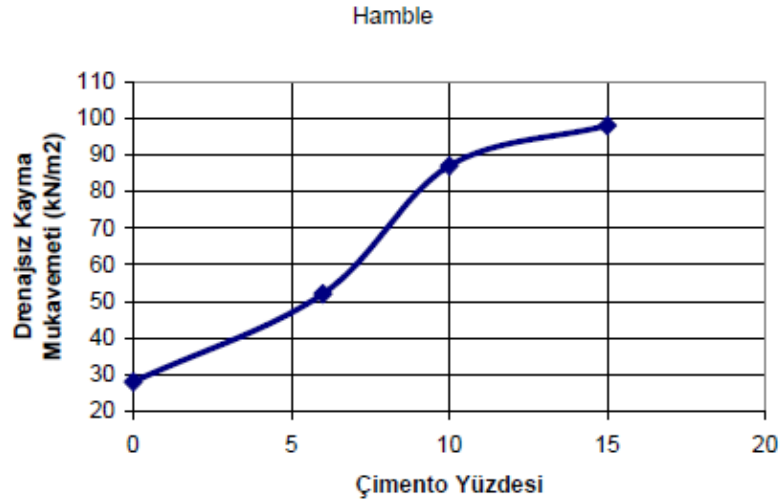
Şekil 1.1 Kireç Malzemesinin Serbest Basınç Mukavemetine Etkisi [3]

Kılıç [4] deneysel çalışmasında, İngiltere’de bulunan Hamble kiline %6, %10 ve %15 oranlarında çimento ilave ederek, üç eksenli basınç deneyi uygulamıştır. Hamble kiline uygulanan deney sonuçlarına göre çimento oranı arttıkça, drenajsız kayma mukavemeti değerlerinin de artış gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır (Şekil 1.2).

Çizelge 1.1 Hamble kilindeki ortalama drenajsız kayma mukavemeti değerleri [4]

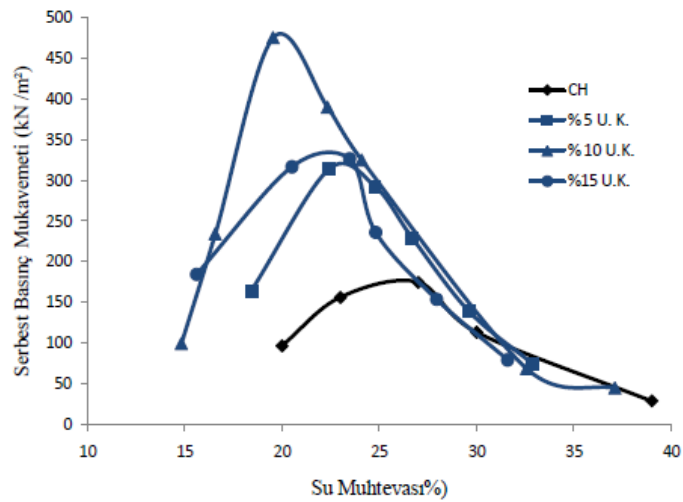
Kil + % 0 çimento → 28 $kN/m^2$	Ortalama Drenajsız Kayma Mukavemeti
Kil + % 6 çimento → 52 $kN/m^2$	Ortalama Drenajsız Kayma Mukavemeti
Kil + % 10 çimento → 87 $kN/m^2$	Ortalama Drenajsız Kayma Mukavemeti
Kil + % 15 çimento → 98 $kN/m^2$	Ortalama Drenajsız Kayma Mukavemeti



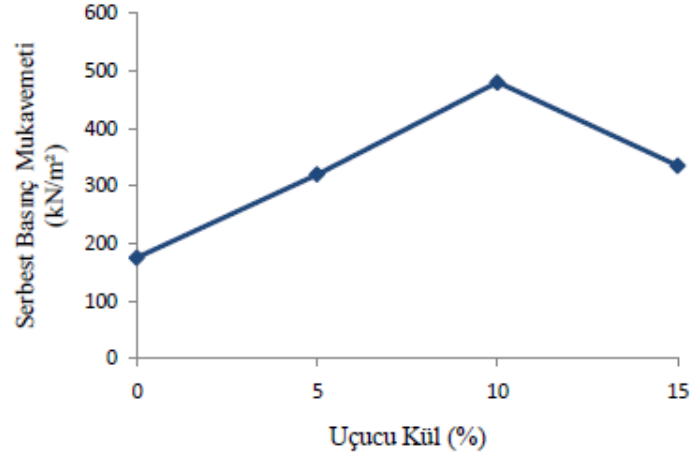


Şekil 1.2 Hamble kilinin drenajsız kayma mukavemetinin 4 farklı çimento yüzdesi ile değişimi [4]

Çetin [5] yaptığı deneysel çalışmalarda, bir kil zemine %5, %10 ve %15 oranlarında uçucu kül ilave ederek, serbest basınç mukavemeti ve optimum su muhtevası parametrelerindeki değişimi incelemiştir. Deneysel çalışma sonucu, uçucu kül oranındaki artış, karışım numunelerinin serbest basınç mukavemet değerlerinde iyileşme etkisi göstermiş olup, uçucu kül oranının yükselmesiyle de, numunelerin serbest basınç mukavemet değerlerinde düşüş gözlenmiştir (Şekil 1.3). En yüksek serbest basınç mukavemet değerine, %10 oranında uçucu kül katkılı zemin numunesinde ulaşılmıştır (Şekil 1.4).

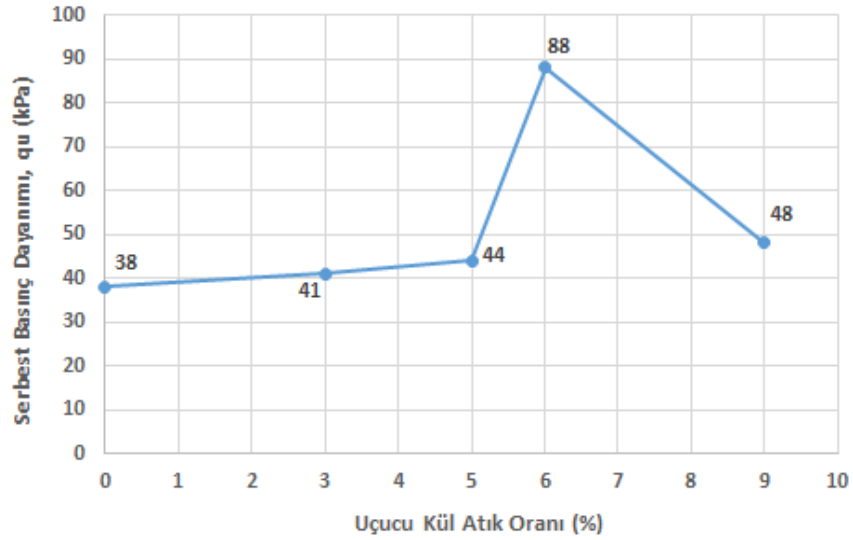


Şekil 1.3 Kil ve Uçucu Kül ilave edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemet – su muhtevası grafiği [5]



Şekil 1.4 Uçucu kül oranının serbest basınç mukavemet değerleri üzerindeki etkisi [5]

Phanikumar ve Sharma [6] bir kil zemine %3, %5, %6 ve %9 oranlarında uçucu kül ilave ederek zemin mukavemet parametrelerini analiz etmişlerdir. Deneysel çalışma sonucunda, %3 ve %5 oranlarında uçucu kül içeren karışım numunelerinin serbest basınç mukavemet değeri katkısız kile göre %12; %6 oranında uçucu kül içeren karışım numunesinde ise %125 oranında mukavemet artışı gözlenmiştir. %9 oranında uçucu kül içeren karışım numunesinin serbest basınç mukavemet değeri ise yüksek oranda azalmış ve %5 oranında uçucu kül içeren karışım numunesinin mukavemet değerine yaklaşmıştır (Şekil 1.5).



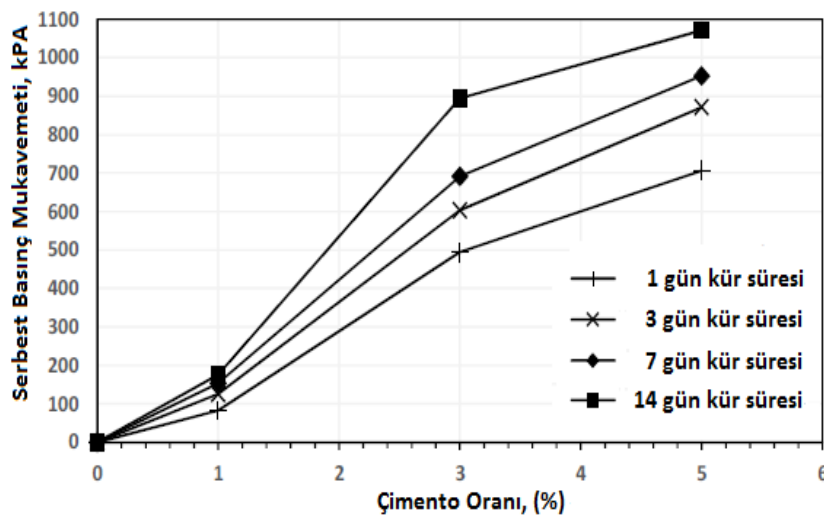
Şekil 1.5 Serbest Basınç Mukavemeti – Uçucu Kül Atık Oranı Grafiği [6]

Görgün ve Ural [7] çalışmalarında bir kil zemine %10 ve %20 oranlarında mermer tozu ilave ederek, zemin mukavemet özelliklerini incelemişlerdir. Deney sonuçlarına göre, mermer tozu ilave oranı arttıkça optimum su muhtevası değerlerinde düşüş; maksimum kuru birim hacim ağırlık ve serbest basınç mukavemet değerlerinde de artış gözlenmiştir. Serbest basınç mukavemetinin en yüksek olduğu değere, %20 mermer tozu ile harmanlanmış kil numunelerinde ulaşıldığı sonucuna varılmıştır (Çizelge 1.2).

Çizelge 1.2 Farklı oranlarda mermer tozuyla harmanlanmış kil numunelerinin dayanım, optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri [7]

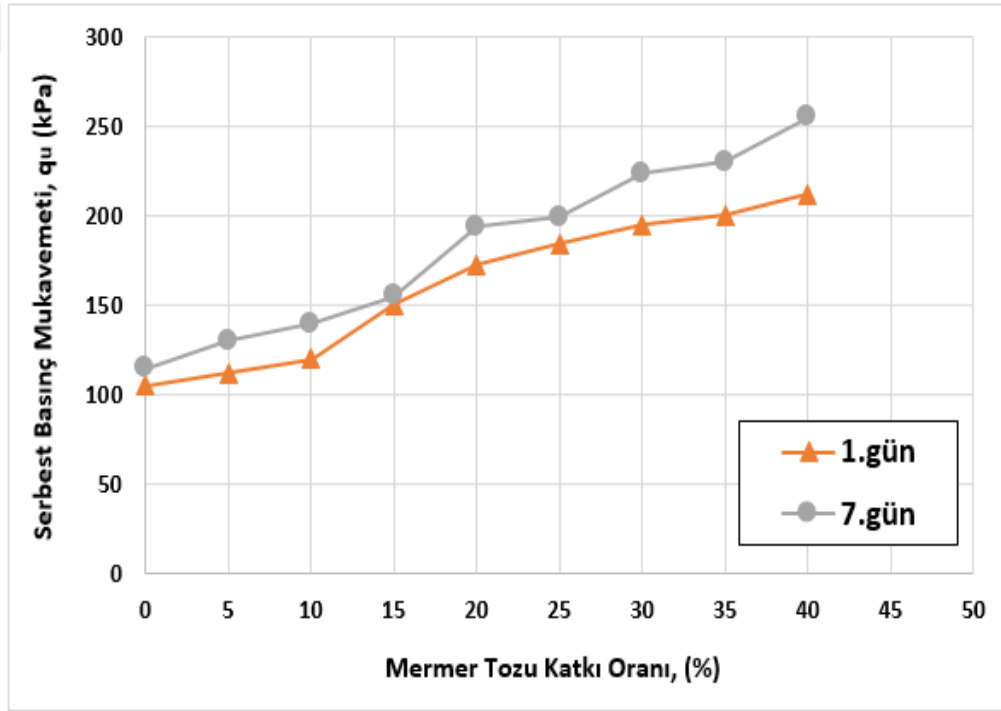
Deney Grupları	Optimum Su Muhtevası	Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık	Serbest Basınç Mukavemeti
%	%	kN/m <sup>3</sup>	kPa
%100 Kil	36	13,10	112
%10 Mermer Tozu + %90 Kil	28	13,60	140
%20 Mermer Tozu + %80 Kil	24	13,80	173

Pandey ve Rabbani [8] deneysel çalışmalarında, yüksek plastisiteli bir kil zemine %1, %3 ve %5 oranlarında çimento ilave ederek hazırladıkları silindirik karışım numunelerini 1, 3, 7 ve 14 gün süresince desikatörde muhafaza ederek kürlemişlerdir. Kürlenen karışım numunelerine serbest basınç deneyi uygulanmıştır. Deney sonuçlarında, çimento oranı ve kür süresinin artış göstermesiyle, karışım numunelerinin serbest basınç mukavemet değerlerinde artış gözlenmiştir (Şekil 1.6).



Şekil 1.6 Çimento katkılı karışım numunelerinin kür süresine göre serbest basınç mukavemet – çimento [8]

Yılmaz ve Yurdakul [9] yapmış oldukları deneysel çalışmada, yüksek plastisiteli bir kil ile bentonit malzemesini harmanlayarak hazırlamış oldukları karışım numunelerine %5, %10, %15, %20, %20, %25, %30, %35 ve %40 oranlarında mermer tozu ilave edip, elde edilen karışım numuneleri desikatörde 1 ve 7 gün süresince kür edildikten sonra serbest basınç mukavemet deneyi uygulanmıştır. Deney sonuçlarına göre mermer tozu ve kür süresi artış gösterdikçe, serbest basınç mukavemet değerlerinde de artış gözlenmiştir (Şekil 1.7). %40 oranında mermer tozu katkılı 1 gün kür süreli karışım numunesinin, katkısız kil-bentonit karışım numunesine göre iyileşme oranı %101,90 ; %40 oranında mermer tozu katkılı 7 gün kür süreli karışım numunesinin de katkısız kil-bentonite göre iyileşme oranı %121,73 olarak tayin edilmiştir (Çizelge 1.3).

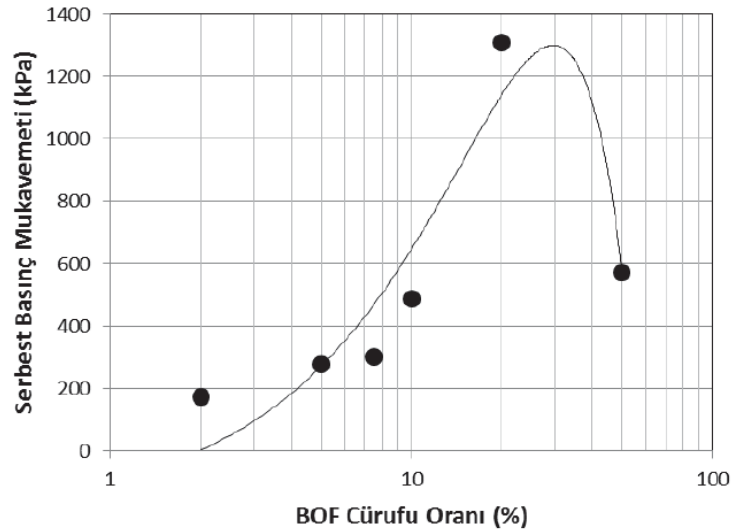


Şekil 1.7 Farklı oranlarda mermer tozu ile harmanlanan kil + bentonit karışım numunelerinin 1 ve 7 gün kür süreli serbest basınç mukavemet – katkı oranı grafiği [9]

Çizelge 1.3 Mermer tozu katkılı kil+bentonit karışım numunelerinin serbest basınç mukavemet deneyi ve iyileşme oranı değerleri [9]

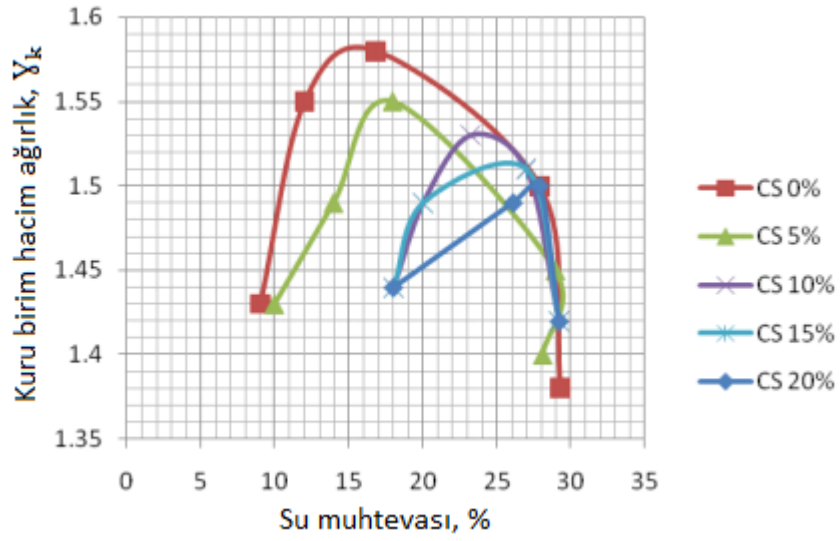
Numune Grupları	Serbest Basınç Mukavemeti (kPa)		Katkısız karışım numunesine göre iyileşme oranı, (%)	
	1.gün	7.gün	1.gün	7.gün
ZB	105	115	-	-
ZB + % 5 MT	112	130	7	13
ZB + %10 MT	120	140	14	22
ZB + %15 MT	150	155	43	35
ZB + %20 MT	173	194	65	69
ZB + %25 MT	184	199	75	73
ZB + %30 MT	195	224	86	95
ZB + %35 MT	200	230	90	100
ZB + %40 MT	212	255	102	122

Selekoğlu [10] deneysel çalışmasında kullanmış olduğu kil zemine %2.5, %5, %7.5, %10, %20, %50 ve %95 oranlarında cüruf atığı (BOF) ilave ederek, karışım numunelerinin mukavemet özelliklerini incelemiştir. Deneysel çalışma sonuçlarına göre BOF oranının artışıyla, maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinde artış; optimum su muhtevası değerlerinde ise düşüş gözlenmiştir. Serbest basınç deney sonuçlarına göre %30 oranında BOF ile harmanlanan karışım numunesinin serbest basınç mukavemeti en yüksek değere ulaşmış olup, atık oranının artışıyla mukavemet değerinde düşüş meydana gelmiştir (Şekil 1.8).

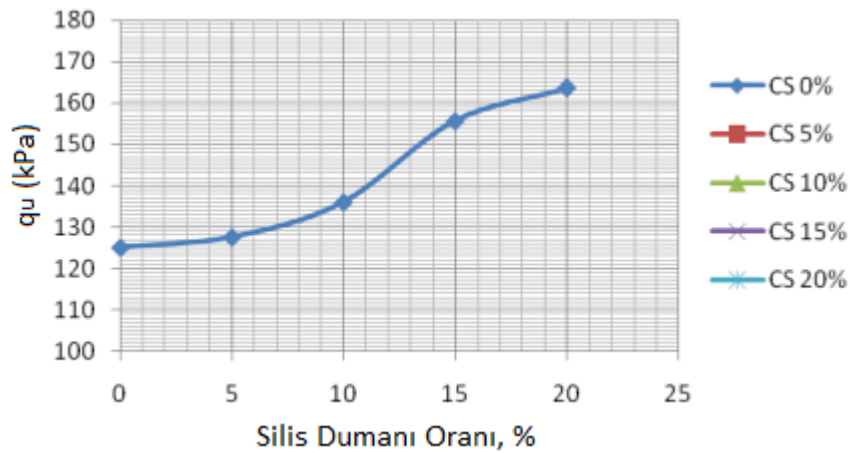


Şekil 1.8 BOF Cüruf Oranı - Serbest Basınç Mukavemet Grafiği [10]

Negi, Yadav ve Singhai [11] deneysel çalışmalarında, yüksek plastisiteli bir kil zemine %5, %10, %15 ve %20 oranlarında silis dumanı ilave ederek, zeminin mukavemet özelliklerini incelemiştir. Çalışma sonucunda, karışım numunelerinde silis dumanı oranının artırılması sonucu optimum su muhtevası ve serbest basınç mukavemet değerlerinde artış ; maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinde ise düşüş gözlenmiştir. Katkısız kil numunesinin serbest basınç mukavemet değeri 125.1 kPa, %20 oranında silis dumanı içeren karışım numunesinin ise 163.6 kPa olarak bulunmuş olup, katkısız kile göre mukavemet değerinde %31 oranında iyileşme meydana gelmiştir (Şekil 1.9).



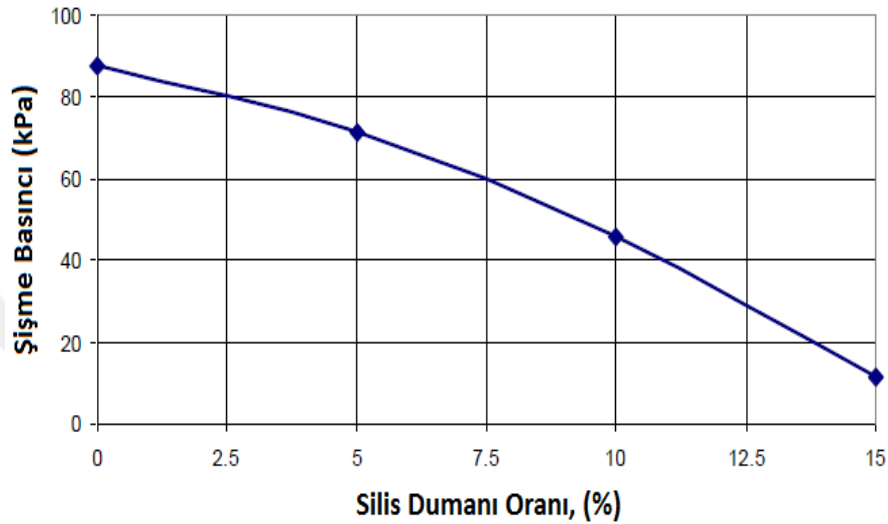
(a)



(b)

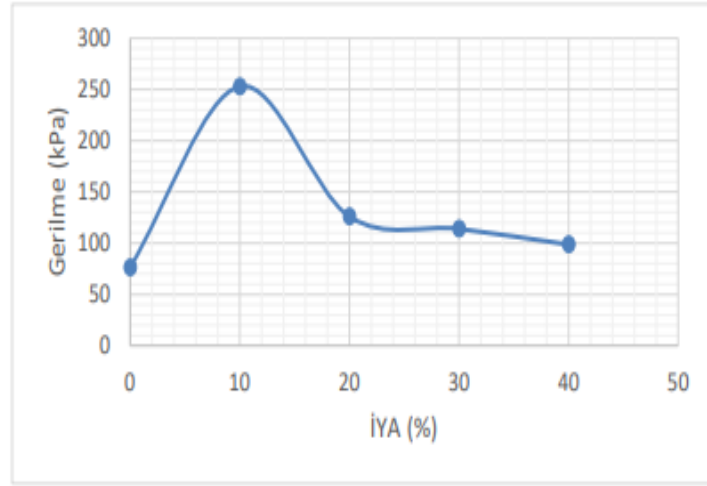
Şekil 1.9 Silis dumanı ile harmanlanmış kil karışım numunelerinin kompaksiyon (a) ve serbest basınç mukavemet – silis dumanı katkı oranı (b) grafipleri [11]

Azzawi, Daud ve Sattar [12] deneysel çalışmalarında, yüksek plastisiteli bir kil zemine %5, %10 ve %15 oranlarında silis dumanı ilave ederek oluşturdukları karışım numunelerinin şişme basıncı değerlerini incelemişlerdir. Şişme basıncı deneyi sonuçlarına göre %5, %10 ve %15 oranlarında silis dumanı ile harmanlanan karışım numunelerinin şişme basıncı değerleri, katkısız kil karışım numunesine göre %18, %48 ve %87 oranlarında düşüş göstermiştir (Şekil 1.10).



Şekil 1.10 Şişme Basıncı – Silis Dumanı Oranı Grafiği [12]

Vural, Akgül ve Aydın [13] doğal zemin numunesi olarak kabul edilen kaolen kiline farklı oranlarda inşaat yıkıntı atığı ilave ederek zeminin kıvam, kuru birim hacim ağırlık ve serbest basınç mukavemet değerlerini incelemişlerdir. Deneysel çalışmada, kaolen kiline %10, %20, %60 ve %70 oranlarında inşaat yıkıntı atığı ilave edildiğinde, katkısız kaolen kiline göre %230.71, %64.70, %49.01 ve %29.01 oranlarında iyileşme meydana gelmiştir. En yüksek serbest basınç mukavemeti olan 253 kPa değerine %10 oranında inşaat yıkıntı atığı içeren karışım numunesinde ulaşılmıştır (Çizelge 1.4). %10 değerinden daha yüksek oranda inşaat yıkıntı atığı içeren karışım numunelerinde, atık oranı artış gösterdikçe, serbest basınç mukavemet değerlerinde azalma gözlenmiştir (Şekil. 1.11).



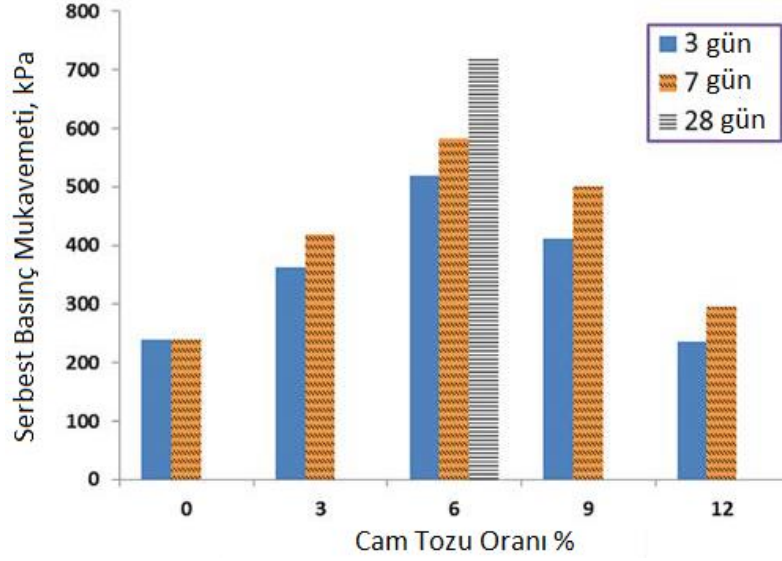
Şekil 1.11 Kaolen kili ile farklı oranlarda harmanlanan inşaat yıkıntı atığının serbest basınç mukavemet değer grafiği [13]

Çizelge 1.4 Kaolen - İYA karışımlarının mukavemet ve kıvam deneyi değerleri [13]

Malzemeler (%)		$q_u$	Likit Limit	Plastik Limit	Plastisite İndisi
Kaolen	İnşaat Yıkıntı Atığı	kPa	%	%	%
100	0	76,5	55,37	25,81	29,56
90	10	253	54,17	39,95	14,22
80	20	126	53,93	40,53	13,40
30	70	114	53,25	40,70	12,55
40	60	98,7	52,98	40,84	12,14

Al-Kaki, Çanakçı ve Çelik [14], bir kil zemine %3, %6, %9 ve %12 oranlarında cam tozu ilave ederek zeminin mukavemet, kıvam, şişme potansiyeli ve CBR değerlerini deneysel olarak araştırmışlardır. Bu çalışmada öncelikle soda cam tozu 200 No'lu elekten geçecek kadar toz hale getirildikten sonra zeminlere ilave edilmiştir. Ayrıca, belirtilen oranlarda hazırlanan zemin numuneleri 3, 7 ve 28 gün boyunca desikatörde kür edildikten sonra serbest basınç mukavemet deneyi uygulanmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda, soda cam tozu malzemesinin ilave edilmesi durumunda şişme potansiyeli ve plastisite indeksi değerlerinde düşüş gözlenmiştir. Serbest basınç deneyinde ise en yüksek mukavemet değerine %6 oranında soda cam tozu katkılı zemin numunelerinde ulaşılmıştır. %6 oranından yüksek miktarda soda cam tozu içeren karışım numunelerinin serbest basınç mukavemet değerinde düşüş gözlenmiştir (Şekil 1.12). Bu çalışmada, endüstriyel atık malzemesi olan soda camlarının toz hale getirilip zeminlere ilave edilerek, zemin mukavemet özelliklerini iyileştirdiği sonucuna ulaşılmıştır.

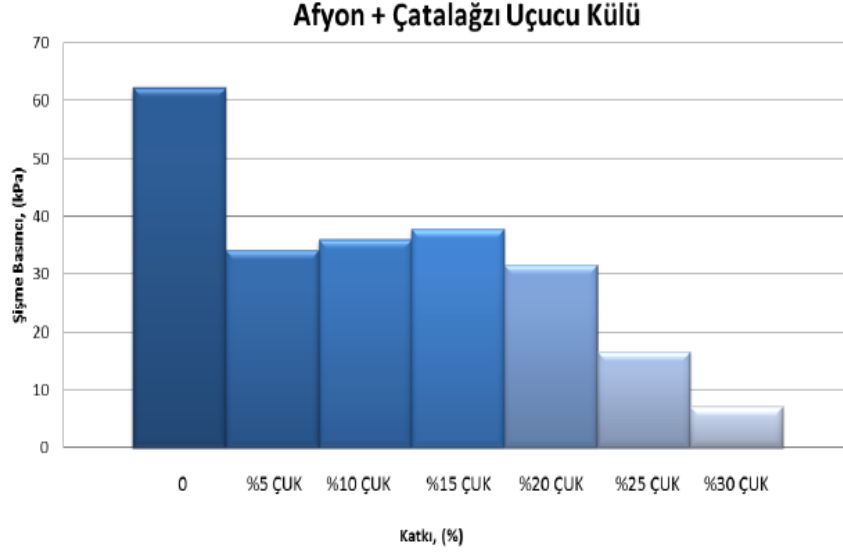




Şekil 1.12 Cam Tozu Oranı ve Serbest Basınç Mukavemet İlişkisi Grafiği [14]

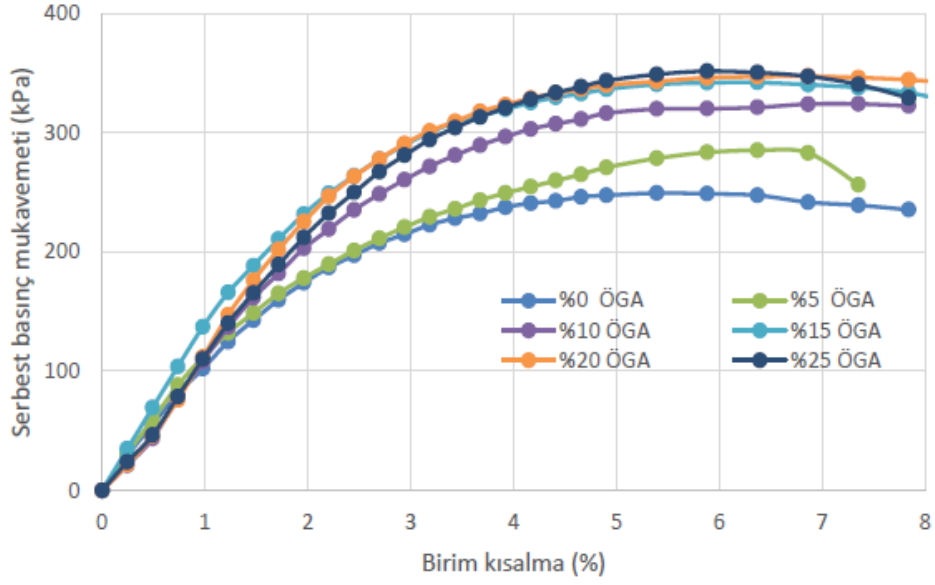
Rathan Raj, Banupriya ve Dharani [15] yapmış oldukları deneysel çalışmada, alüvyal ve kil zeminlere %10, %20, %30, %50 ve %80 oranlarında pirinç kabuğu külü ilave ederek, kesme kutusu deneyi uygulamışlardır. Deney sonuçlarına göre katkı oranı arttıkça, zemin numunelerinin kohezyon değerlerinde düşüş; kayma mukavemeti açılış değerlerinde ise artış gözlenmiştir.

Ünver [16] deneysel çalışmasında, Afyon kiline %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında Çatalağzı uçucu külü ilave ederek elde ettiği karışım numunelerinin, serbest basınç mukavemet ve şişme basıncı değerlerini incelemiştir. Deneyler sonucunda, karışım numunelerindeki uçucu kül oranının artışıyla, serbest basınç mukavemet değerleri de artış göstermiştir. Aynı karışım numunelerine şişme basıncı deneyi uygulandığında, uçucu kül oranının artış göstermesiyle, numunelerin şişme basıncı değerlerinde düşüş gözlenmiştir (Şekil 1.13).



Şekil 1.13 Farklı oranlarda Çatalağzı uçucu külü ile harmanlanan Afyon kili karışım numunelerinin şişme basıncı değişimi [16]

Alpyürür ve Şenol [17] deneysel çalışmalarında, yüksek plastisiteli bir kil olan bentonite %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında öğütülmüş gazbeton ilave ederek kıvam, kompaksiyon ve serbest basınç mukavemet deneyleri yapmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda, karışım numunelerinde gazbeton oranı arttıkça plastik limit değerlerinde artış, likit limit ve plastisite indisi değerlerinde ise azalış gözlenmiştir. %25 oranında gazbeton içeren karışım numunesinin plastisite değeri, katkısız bentonit kilinin plastisite değerine göre %33 oranında azalmıştır. Kompaksiyon deneylerinde, atık gazbeton oranı arttıkça optimum su muhteva değerlerinde artış, maksimum kuru birim hacim değerlerinde ise ihmal edilecek derecede düşüş gözlenmiştir (Çizelge 1.5). Serbest basınç mukavemet deneylerine göre karışım numunelerinde, öğütülmüş gazbeton oranının artışıyla, mukavemet değerleri sürekli artış göstermiştir. Bentonit kilinin serbest basınç mukavemet değeri 249 kPa, %25 oranında gazbeton katkılı karışım numunesinde bu değer 351 kPa olduğu saptanmıştır. Bu da %25 oranında gazbeton içeren karışım numunesinin, katkısız bentonit kiline göre mukavemet artışının %41 oranında olduğunu ortaya koymaktadır (Şekil 1.14).

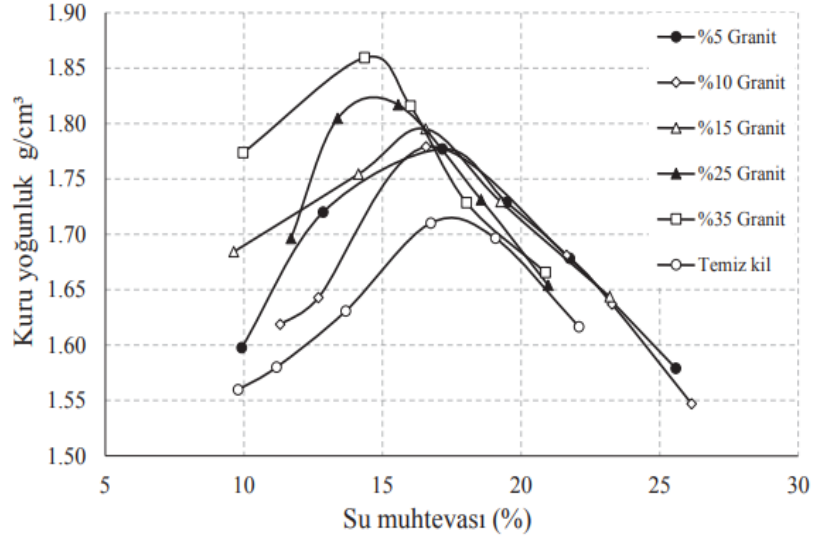


Şekil 1.14 Kil – öğütülmüş gazbeton karışım numunelerinin serbest basınç mukavemet – birim deformasyon grafiği [17]

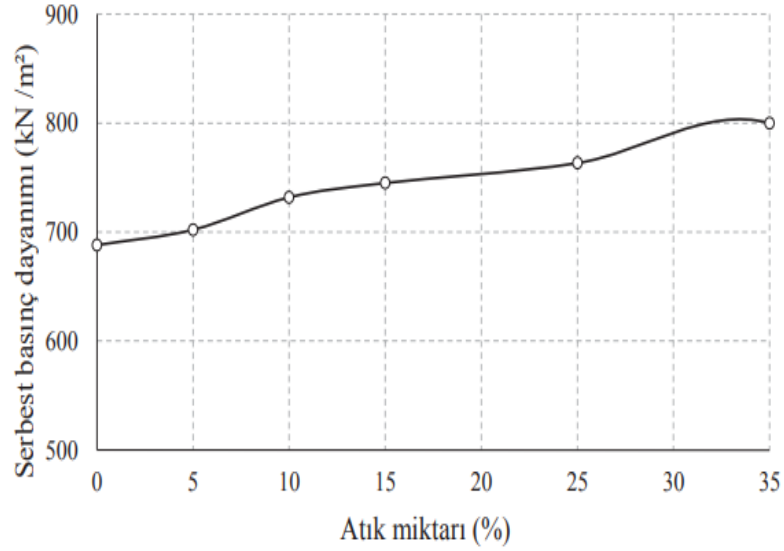
Çizelge 1.5 Öğütülmüş gazbeton içeren karışım numunelerinin kıvam, kompaksiyon ve serbest basınç deney sonucu elde edilen parametreleri [17]

Numune	$w_L$ (%)	$w_P$ (%)	$I_p$ (%)	$w_{opt}$ (%)	$\gamma_{maks}$ ( $kN/m^3$ )	$q_u$ (kPa)
% 100 ÖGA	-	-	-	55	8.3	-
% 100 CH	274	44	230	36	12.6	249
% 95 CH + % 5 ÖGA	244	46	198	37	12.2	285
% 90 CH + % 10 ÖGA	220	47	173	37	12.2	324
% 85 CH + % 15 ÖGA	212	47	165	40	11.7	342
% 80 CH + % 20 ÖGA	186	48	138	41	11.9	347
% 75 CH + % 25 ÖGA	140	48	92	40	12.1	351

Hassan, Çabalar ve Akbulut [18] CL sınıfı bir kil zemine %5, %10, %15, %25 ve %35 oranlarında atık granit kırıkları ilave ederek, zeminin mukavemet özelliklerini incelemiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda, karışım numunelerinde atık granit kırık oranı arttıkça, optimum su muhtevası değerlerinde düşüş, maksimum kuru birim hacim ağırlık ve serbest basınç mukavemet değerlerinde ise artış gözlenmiştir (Şekil 1.15).



(a)

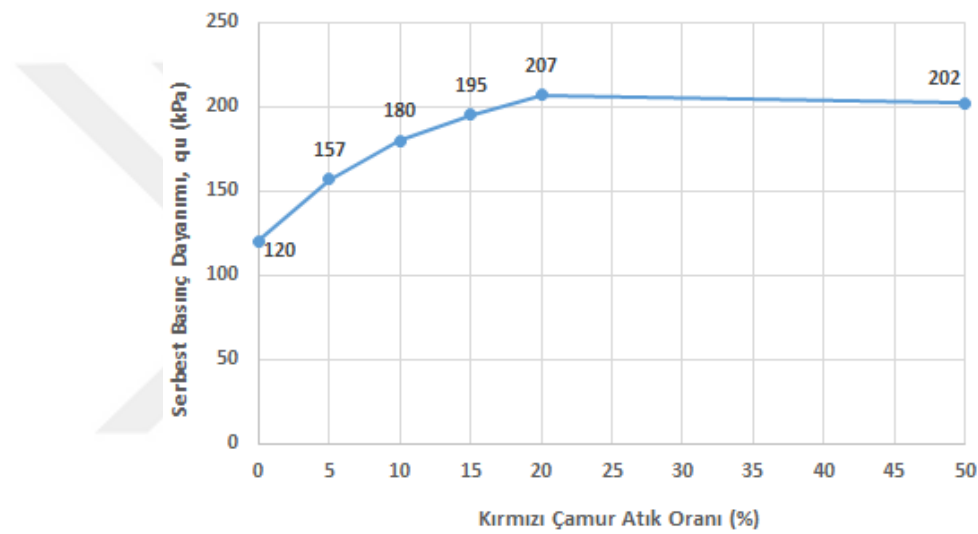


(b)

Şekil 1.15 Maksimum kuru birim hacim ağırlık – Su muhtevası (a) ve Serbest basınç mukavemet (b) grafiği [18]

Kalkan [19] deneysel çalışmasında, Erzurum ili Oltu Bölgesi'nden getirilen yüksek plastisiteli bir kil zemine %5, %10, %15, %20 ve %50 oranlarında bayer prosesi sonucu açığa çıkan kırmızı çamur atığı ilave ederek, zeminin kıvam ve mukavemet değerlerini deneysel olarak incelemiştir. Deneysel olarak, karışım numunelerinde kırmızı çamur atık oranının artışıyla, likit limit ve plastisite indisi değerlerinde düşüş ; plastik limit değerlerinde de artış gözlenmiştir (Çizelge 1.6). Serbest basınç deneylerinde katkısız kilin

mukavemet değeri 120 kPa, %20 oranında kırmızı çamur atığı içeren karışım numunesinin mukavemet değeri ise 207 kPa olarak tayin edilerek, %72 oranında mukavemet artışı gözlenmiştir (Şekil 1.16). %50 oranında atık içeren karışım numunesinde mukavemet değeri 202 kPa olarak bulunmuş, ancak bu değerde bile karışım numunesi, katkısız kile göre yüksek oranda mukavemet değerine ulaşmış durumdadır (Çizelge 1.6). Bu durum, %50 oranında kırmızı çamur atığının, karışım numunelerinde kullanılmasının uygun olduğunu göstermiş ve yüksek oranda kırmızı çamur atığının zemin stabilizasyon işlemlerinde kullanılarak, doğadan bertaraf edilmesini sağlamıştır.

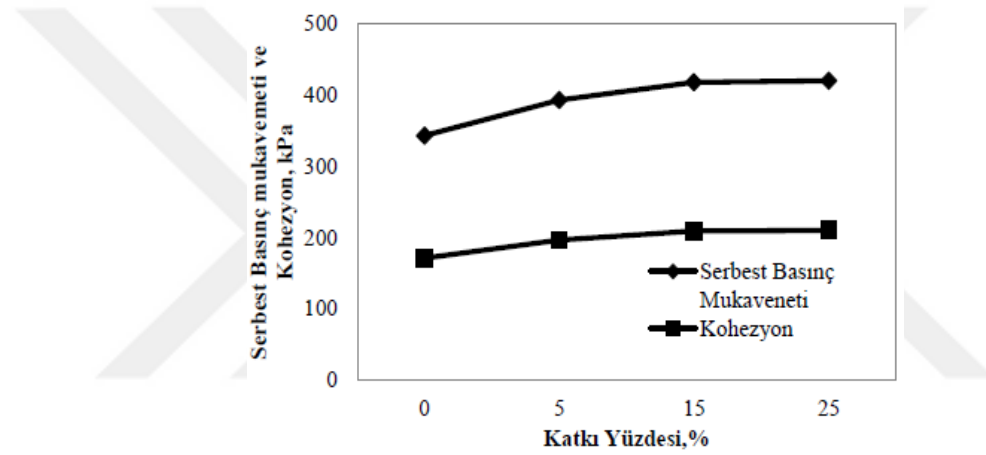


Şekil 1.16 Serbest Basınç Mukavemet – Kırmızı Çamur Oranı Atık Grafiği [19]

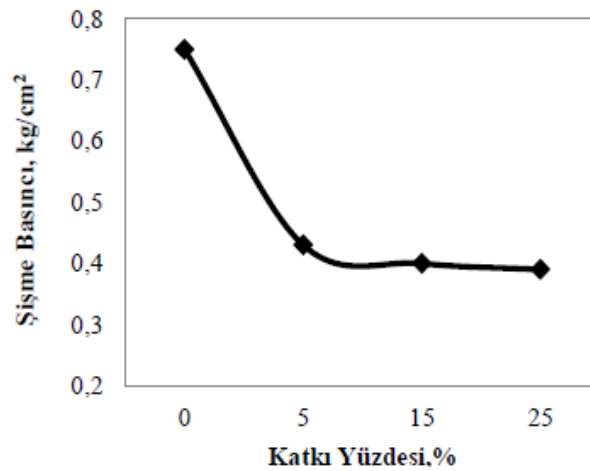
Çizelge 1.6 Kırmızı Çamur Atığı ile harmanlanan karışım numunelerinin kıvam ve serbest basınç mukavemet deney sonuçları [19]

Malzemeler (%)		$q_u$	Likit Limit	Plastik Limit	Plastisite İndisi
Kil	Kırmızı Çamur Atığı	kPa	%	%	%
100	0	120	66	31	35
95	5	157	65	32	33
90	10	180	64	33	31
85	15	195	63	34	29
80	20	207	62	35	27
50	50	202	58	36	22

Pekdemir [20] yüksek plastisiteli bir kil zemine %5, %15 ve %25 oranlarında kırmızı çamur atığı ilave ederek, karışım numunelerinin mukavemet ve şişme özelliklerini incelemiştir. Deneysel çalışmalarda %5, %15 ve %25 oranlarında kırmızı çamur atık malzemesi ile harmanlanan karışım numunelerinin, katkısız kil numunesine göre mukavemet değeri artış oranı sırasıyla %15, %22 ve %23 olarak tayin edilmiştir (Şekil 1.17). Şişme basıncı deneyinde, aynı karışım numuneleri için ödometre deney cihazı kullanılarak, karışım numunelerinin şişmesine engel olan basınç değeri bulunmuştur. %5, %15 ve %25 oranlarında kırmızı çamur ile harmanlanan karışım numunelerinin şişme basıncı değerleri, katkısız kil numunesine göre sırasıyla %43, %47 ve %48 oranlarında düşüş göstermiştir (Şekil 1.18).

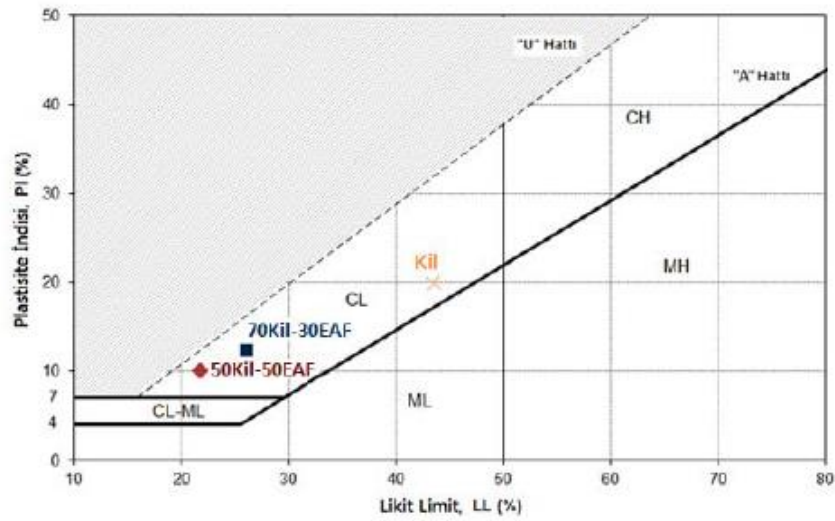


Şekil 1.17 Kırmızı çamur katkılı karışım numunelerinin serbest basınç mukavemet ve kohezyon – katkı yüzdesi grafiği

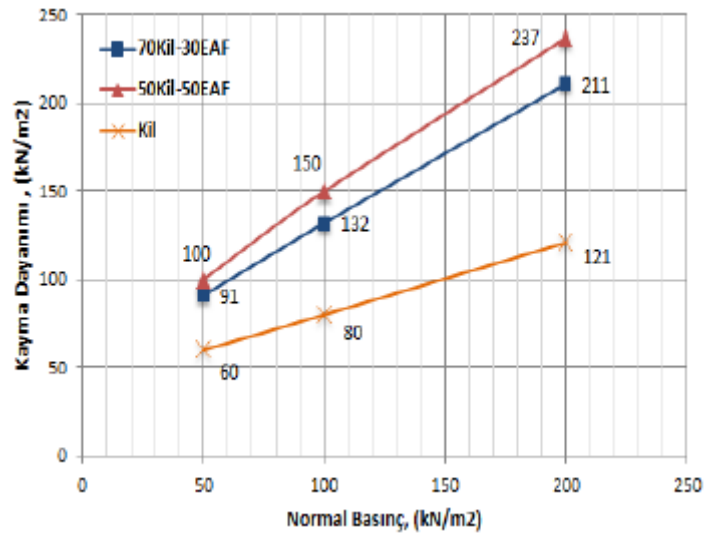


Şekil 1.18 Kırmızı çamur katkılı kil numunelerinin şişme basıncı – katkı yüzdesi grafiği

Mahmoudi ve Altun [21] yapmış oldukları deneysel çalışmada, kohezyonlu bir zemine %30 ve %50 oranlarında elektrik ark fırını (EAF) cürufu ilave ederek, kohezyonlu zeminlerin mühendislik özelliklerini ve dayanım parametrelerini incelemiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda, karışım numunelerinde EAF cüruf oranının artış göstermesi ile likit limit, plastik limit ve plastisite indisi değerlerinde düşüş gözlenmiştir. Kesme kutusu deneylerinde ise EAF cüruf oranının artışı sonucu, katkısız kile göre kohezyon değerlerinde düşüş, kayma mukavemeti açısı değerlerinde artış görülmüştür.



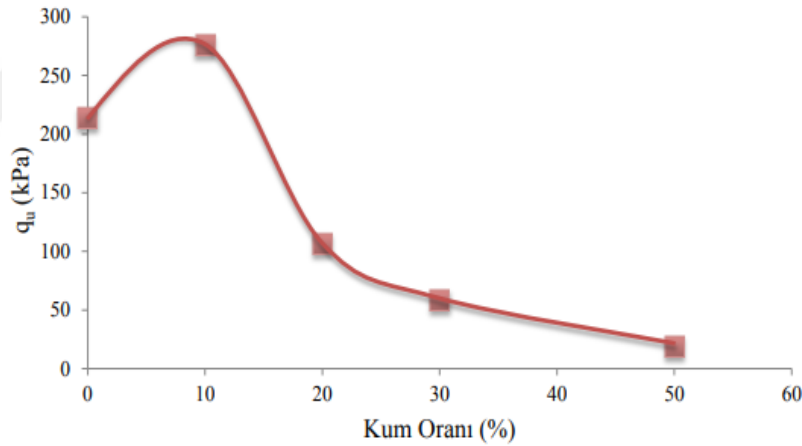
(a)



(b)

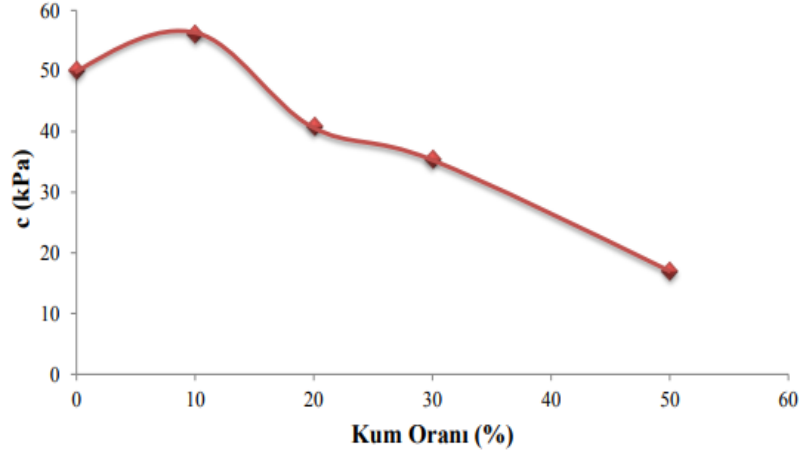
Şekil 1.19 EAF Cüruf katkılı kil numunelerinin kıvam ve kayma dayanımı-normal basınç grafiği

Batman [22] deneysel çalışmasında, yüksek plastisiteli bir kırmızı kile %10, %20, %30 ve %50 oranlarında kuvars kumu ilave ederek oluşturduğu karışım numunelerine serbest basınç ve kesme kutusu deneyleri uygulamıştır. Deneyler sonucunda, %10 oranında kuvars kumu ile harmanlanan karışım numunesinin serbest basınç mukavemet değerinde, katkısız kile göre %30 oranında artış gözlenmiştir. Ancak %20, %30 ve %50 oranlarında kuvars kumu içeren karışım numunelerinde, katkı oranı arttıkça serbest basınç mukavemet değeri düşüş göstermiştir (Şekil 1.19). Aynı karışım numunelerine kesme kutusu deneyi uygulandığında, %10 oranında kuvars kumu içeren karışım numunesinin kohezyon ve kayma mukavemeti açısı değeri, katkısız kile göre artış göstermiş, daha yüksek oranlarda kuvars kumu içeren karışım numunelerinde kohezyon değerlerinde düşüş, kayma mukavemeti açısı değerlerinde ise düşük oranlarda azalma ve artış gözlenmiştir (Şekil 1.20). Bu durum, zeminlerin iyileştirilmesinde, belirli orandaki kuvars kumunun, kil zeminlere ilave edilerek, zemin mukavemet özelliklerinin iyileştirilebileceğini deneysel olarak ortaya koymuştur.

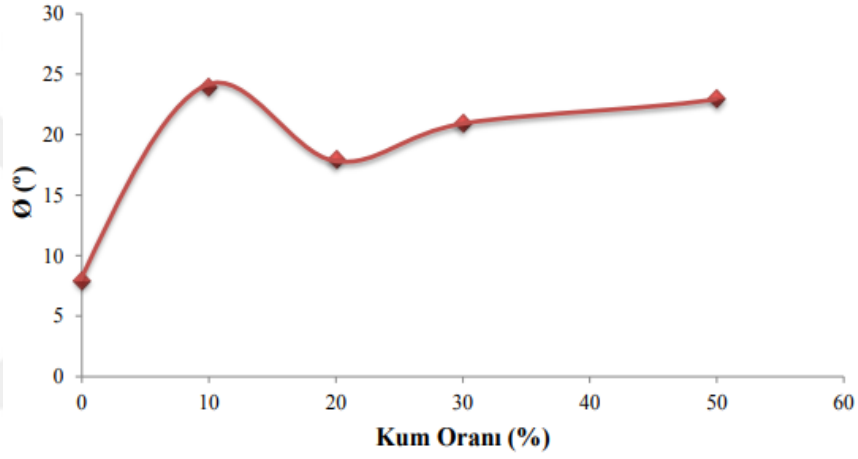


Şekil 1.20 Kuvars kumu ile harmanlanan kırmızı kil karışım numunelerinin serbest basınç mukavemet – kum oranı grafiği [20]





(a)

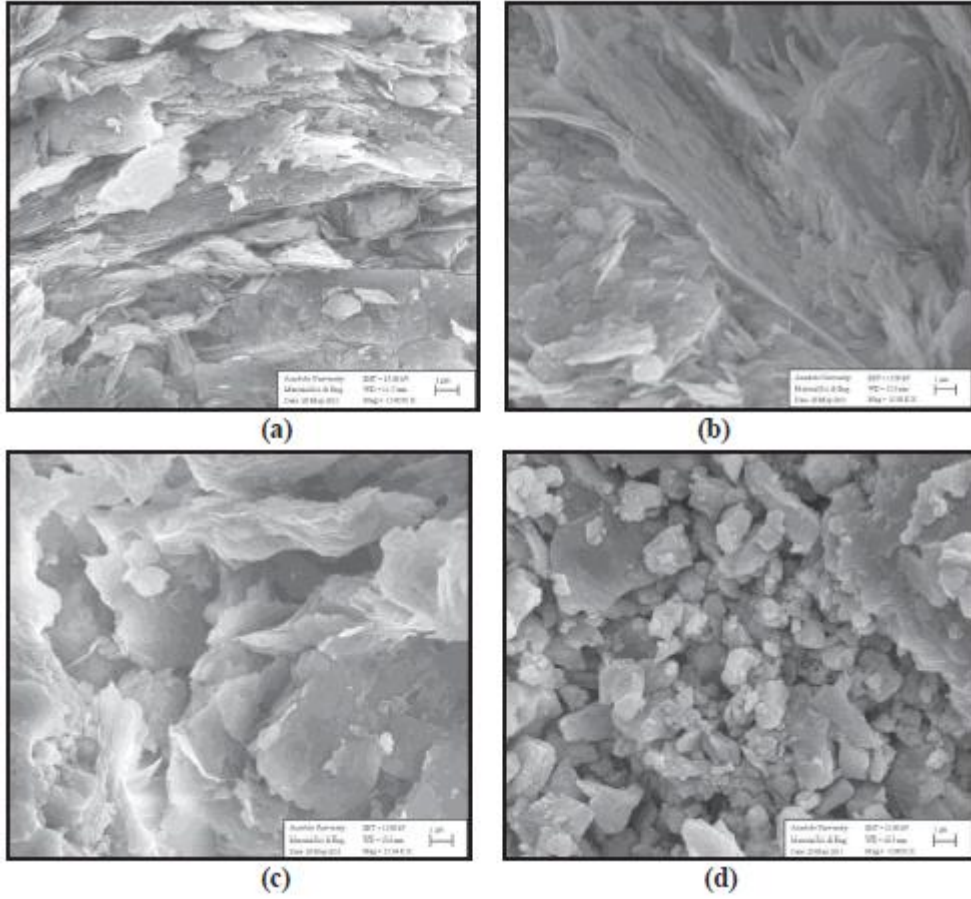


(b)

Şekil 1.21 Kuvars kumu - kırmızı kil numunelerinin kesme kutusu deneyi sonucunda elde edilen kohezyon (a) ve içsel sürtünme açısı (b) – kum oranı grafikleri [20]

Cömert ve Ural [23] şişme davranışı gösteren bir kil zemine %5, %10 ve %20 oranlarında mermer tozu ilave ederek zeminin mukavemet özelliklerini araştırmışlardır. Deney sonuçlarına göre %5 oranında mermer tozu içeren karışım numunesinde en yüksek serbest basınç mukavemet değerine ulaşılmıştır. Ayrıca, hazırlanan karışım numunelerinin mikroyapılarının analiz edilmesi amacıyla katkısız kil ve mermer katkılı numunelere SEM analizi uygulanmıştır. Bu analize göre, optimum su muhtevasında sıkıştırılmış katkısız kil zemin numunesindeki kaolin ve bentonit plakalarının arasında ince boşluk tabakaları ve bu tabakaların sırasıyla düz ve karışık katmanlar halinde üst üste geldiği heterojen bir yapıda olduğu görülmüştür. %5 oranında mermer tozu katkılı numunenin yapısının daha sıkı, boşluksuz, sürekli kaolin ve bentonit tabakalarının

olduğu ve tabakalar arası boşluk olmayan bir yapıda olduğu gözlenmiştir. Karışım numunelerindeki mermer tozu oranının artışıyla, zemin numunelerinin az boşluklu, az daneli, kaolin ve bentonit tabakalarının yarı süreklı düzlemler halinde uzandığı bir yapı meydana gelmiştir (Şekil 1.21).



Şekil 1.22 Mermer katkılı zemin numunelerinin SEM görüntüleri - (a) Katkısız Kil, (b) %5 MT+%95 Kil, (c) %10 MT+%90 Kil, (d) %15 MT+%85 Kil [21]

## **1.2 Tezin Amacı ve Kapsamı**

Bu tez çalışmasında, kil zemine toz halde, farklı oranlarda kurşun-çinko maden atığı ilave edilerek zeminin mukavemet özellikleri incelenmiş olup, optimum katkı oranının bulunması amaçlanmıştır. Ayrıca, optimum oranda katkı içeren numunelere belirli oranlarda uçucu kül ve çimento ilave edilerek, kurşun-çinko katkılı kil numunelerinin mukavemet özelliklerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir.

Bu kapsamda, yüksek plastisiteli bir kil zemine, zemin ağırlığının %5, %10, %20, %30, %40, %50, %60, %70, %80 ve %100 oranlarında kurşun-çinko katkısı ilave edilerek zeminin mukavemet özellikleri incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda ilk olarak iyileştirilmesi gereken zemin numunesi için sınıflandırma ve kıvam deneyleri yapılarak, zeminin cinsi belirlenmiş olup, daha sonra belirtilen oranlarda Pb-Zn katkısı ilave edilerek serbest basınç, kesme kutusu, üç eksenli basınç, şişme basıncı ve konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Yapılan deney sonuçlarına göre %20 oranında Pb-Zn katkılı kil numunelerde en yüksek mukavemet değerine ulaşılmıştır. %20 değerinden yüksek oranında Pb-Zn katkılı kil numunelerinde mukavemet değeri düşüş göstermiştir.

Deneysel çalışmada ayrıca, doğal kurşun-çinko maden katkı malzemesi, kil zeminle farklı oranlarda harmanlanarak, katkının mukavemet özelliklerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Kil ile mukavemet özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanan Pb-Zn katkı malzemesine ilave olarak da çimento ve uçucu kül ilave edilerek, katkının yüksek oranlarda iyileştirilmesi sağlanmıştır.

## **1.3 Hipotez**

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, tayin edilen optimum katkı oranlarında, Pb-Zn katkısı ile beraber zemine %5, %10 ve %20 oranlarında uçucu kül ve %1, %2, %3 ve %5 oranlarında çimento ilave edilerek, zeminde daha yüksek mukavemet elde edilmiştir. Ayrıca, kurşun-çinko katkısının zeminin mukavemet özelliklerini iyileştirebileceği ve zeminlerin stabilizasyonunda kullanılabilirliği ortaya konmuştur.

### ZEMİNLERİN STABİLİZASYONU

#### 2.1 Killer

Mühendislik uygulamalarında, yeryüzünde genellikle kil zeminlerle karşılaşmaktadır. Fiziksel ve kimyasal özellikleri açısından killer, diğer zemin türlerinden ayrılırlar. Kil daneleri mikroskobik veya daha küçük daneleri içeren, 0.002 mm'den (2 mikron) daha küçük çaplı, ana kayanın ayrışması sırasında, hidratlanmış alümino-silikat kimyasal yapısını oluşturan zemin türüdür. Plaka şeklindeki kil danelerinin yüzeylerinde negatif elektrik şarjları, kenarlarında ise negatif veya pozitif elektrik şarjları bulunmaktadır. Kil partikülleri plaka veya iğne şeklinde olup negatif yüklüdür.

Kil mineralleri, kayaçların yapısında bulunan feldspat, mika ve diğer silikat minerallerinin kimyasal olarak ayrışması sonucu oluşan kristalleşmiş malzemelerdir. Diğer bir ifadeyle, kimyasal olarak sulu alüminyum silikatların diğer metalik iyonlarla birleşmesi sonucu oluşup, fillosilikat sınıfı mineral grubu olarak isimlendirilirler. Çapları 1 mikrondan daha az, koloidal boyutta kristal yapıya sahip olup, ince plaka ya da levha şeklindedirler.

Tüm kil mineralleri belirli tür katyona sahip dörtyüzlü ve sekizyüzlü yapıda olup, belirli bir düzende ve farklı şekillerde birbirlerine bağlanan iki temel levhadan meydana gelmektedirler. Farklı kil mineralleri, bu iki temel levhanın yapısındaki değişiklikler sonucu oluşmaktadırlar. Dörtyüzlü levha, köşelerindeki dört oksijen atomunun tek bir silika atomunu çevrelemesiyle oluşan dörtyüzlü silika birimlerinin; sekizyüzlü levha ise altı oksijen ya da hidroksilin alüminyum, magnezyum, demir ya da diğer metalik

atomlarla çevrenmesiyle oluşan sekizyüzlü birimlerinin bir araya gelmesiyle oluşurlar [24].

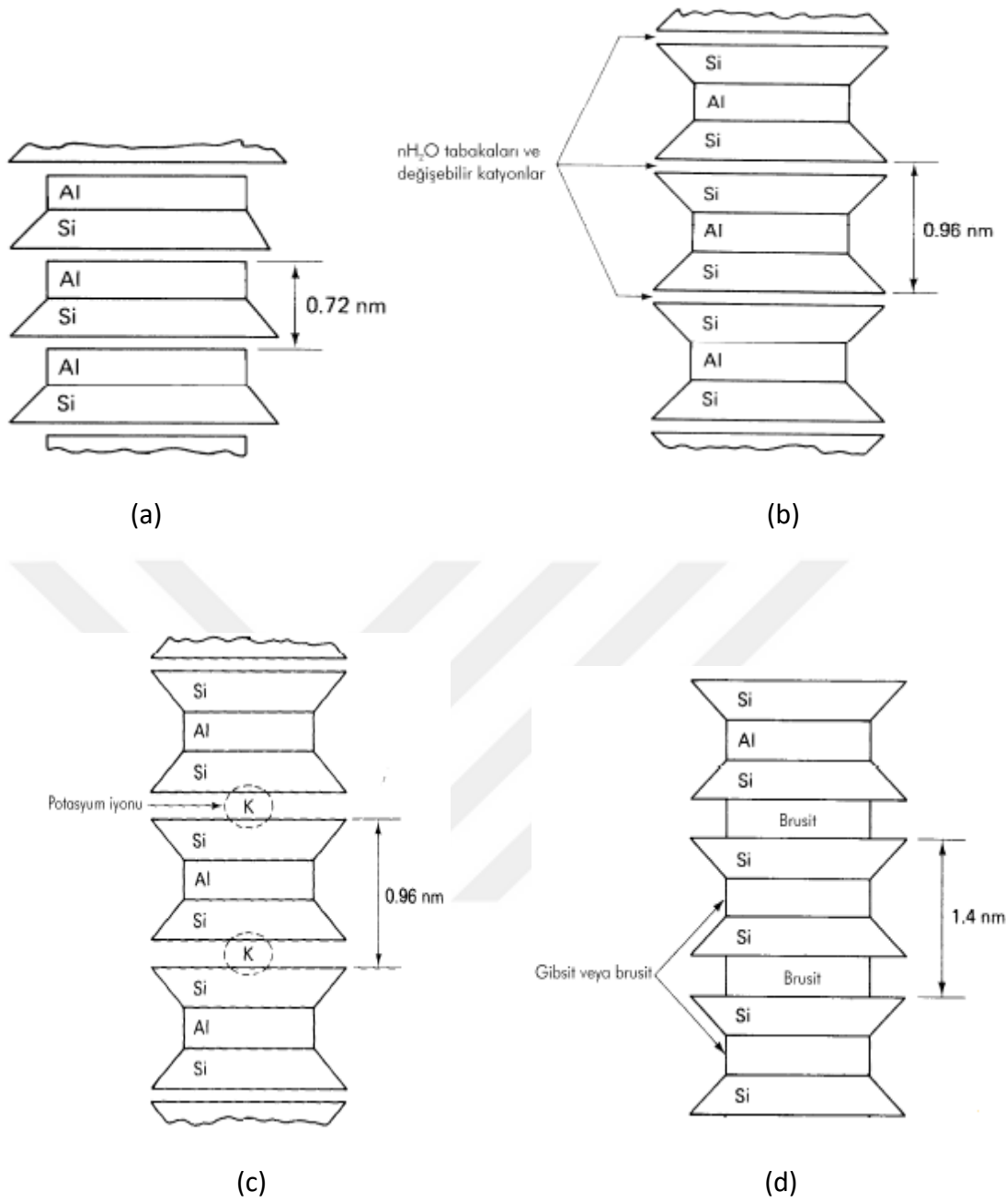
Kil minerallerinin bileşimi, esas olarak sulu alüminyum silikatlardan oluşmaktadır. Burada  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  kristal yapıları (tetragonlar ve oktahedronlar), tabakaları meydana getirmek üzere çeşitli şekillerde birleşir ve çeşitli özellikte kil minerallerini meydana getirir. Bu kil mineralleri kaolinit, klorit, illit ve montmorillonit olarak adlandırılırlar (Şekil 2.1). Bu mineraller, ince plakalardan oluşan kristal bir yapıya sahiptir. Bu plakaların genişlik, uzunluk ve kalınlık oranları mineral yapılarına bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Yaygın olarak bilinen kil minerallerinin kalınlık, çap ve spesifik yüzey alanları Çizelge 2.1’de belirtilmiştir.

Çizelge 2.1 Bazı kil minerallerinin fiziksel özellikleri [24]

Mineral	Tipik Kalınlık (nm)	Tipik Çap (nm)	Spesifik Yüzey Alanı ( $\text{km}^2/\text{kg}$ )
Montmorillonit	3	100-1000	0,8
İllit	30	10000	0,08
Klorit	30	10000	0,08
Kaolinit	50-2000	300-4000	0,015

Kristalin yapıda olan kil mineralleri iki tabakalı ve üç tabakalı olmak üzere iki gruba ayrılırlar. İki tabakalı kil mineralleri, bir katmanın iki levhanın birer danesinden meydana gelmiş olmasından dolayı 1:1 minerali olarak adlandırılırlar. Bu gruba boyutları eşit olan kaolinit grubu ve uzun çubuk şekilli halloysit grubu kil mineralleri dahildir. Üç tabakalı olan kil mineralleri ise 2:1 yapısında olup, genişleyen kafes yapıya sahip olan montmorillonit grubu ve genişlemeyen kafes yapısına sahip olan illit grubundan meydana gelirler [24]

Montmorillonit grubu kil mineralleri 2:1 tabaka yapısına sahip olup, smektit olarak da adlandırılabilirler. Su ile temas ettiklerinde, su, üniteler arasındaki boşluğa girerek kilin şişmesine neden olur. Su ve iyon adsorpsiyonu için büyük yüzey alanına sahip olmaları sebebiyle yüksek oranda katyon değişim kapasitesine sahiptirler. Bu değer 80-120 meq/100 gram olarak ifade edilir.



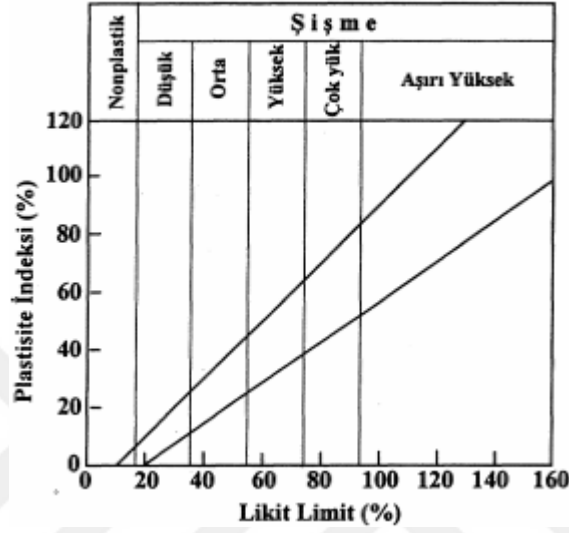
Şekil 2.1 Bazı kil minerallerinin şematik diyagramları- Kaolinit (a), Montmorillonit (b), İllit (c), Klorit (d) [25]

Zeminler farklı minerolojik, kimyasal, dokusal ve konsolidasyon özelliklerine bağlı olarak farklı değerlerde şişme yüzdesi ve şişme basıncına sahiplerdir. Kil zeminlerde şişme basıncı basit ödometre konsolidasyon deneyi; şişme potansiyeli değerleri de kıvam deneyleri ile belirlenir. Bu değerler ile ilgili abaklar Çizelge 2.2 ve Şekil 2.2'de belirtilmiştir.

Çizelge 2.2 Şişen zeminlerin sınıflandırılması [26]

Likit Limit	Plastisite İndeksi	Şişme Potansiyeli	Şişme Potansiyeli Sınıflaması
<50	<25	<0.5	Düşük
50-60	25-35	0.5-1.5	Orta
>60	>35	>1.5	Yüksek

Şişme Potansiyeli= Örtü basıncına eşit basınç altındaki düşey şişme



Şekil 2.2 Şişme potansiyelinin belirlenmesinde kullanılan abak [27]

Bazı killerin yüksek plastisiteli yapıda, düşük mukavemete ve yüksek oranda şişme basıncına sahip olması üzerinde bulundurduğu inşaat yapılarına birçok yönden zarar verebilmektedir. Bu zararları, inşaat yapılarında çatlama, yapının oturması ve yapının eğilmesi olarak sıralayabiliriz. Ayrıca, deprem ya da doğal sebeplerle oluşan heyelanlar da zeminlerin özelliklerine bağlı olup, ciddi can ve maddi kayıplara sebep olmaktadır. Bu sebeple geoteknik disiplini, zeminlerin stabilizasyonu konusunu ayrı bir alan olarak görmekte ve önem vermekte olup, birçok gözleme dayalı ve deneysel araştırmalar yapılmasını gerekli görmektedir.

## 2.2 Zeminlerin Stabilizasyonu

Geoteknik disiplininin, kapsamlı araştırmalarını sürdürdüğü bir diğer önemli alan, zeminlerin iyileştirilmesi ya da diğer bir tabirle zeminlerin stabilizasyonudur. En genel anlamda, zeminlerin sahip olduğu özelliklerin amaca uygun hale getirilmesine zeminlerin iyileştirilmesi adı verilmektedir. Zeminlerin iyileştirilmesi yerine zemin ıslahı, stabilizasyonu ve modifikasyonu gibi terimler de kullanılmaktadır.

Zemin stabilizasyonu terimi ve anlamı, bazı ülkelerde değişiklik göstermektedir. Örneğin, Amerikan Yol İnşaatı Stabilizasyon Komitesi, stabilizasyon kavramını, sağlamlık derecesi veya malzemelerin bazı maddeler ile karıştırılarak iyileştirilmesi, zemin kütesinin kayma direncini, dayanıklılığını arttıran geçirimsizlik ve hacimsel değişim yeteneğini azaltan her türlü işlem olarak tanımlamaktadır [28].

Zemin stabilizasyonu, zeminlerin belirli özelliklerinin, amaçlanan bir mühendislik uygulamasına yönelik olarak farklı fiziksel, kimyasal ve biyolojik yöntemler kullanılarak iyileştirilmesi olarak tanımlanabilir. Zemin iyileştirme yöntemleri son yıllarda büyük önem kazanmıştır. Hızla artan şehirleşme sonucu uygun yerleşim alanlarının azalması, yüksek arsa maliyetleri, komşu yapıların güvenliğini koruma ve yapıların giderek artan boyutlarının getirdiği büyük gerilme limitleri gibi durumlar, iyileştirme yöntemlerinin gelişmesine katkı sağlamıştır.

İnşaat yapılarının zemin üzerindeki projelendirilmesi sırasında, zemin özellikleri büyük önem taşımaktadır. Bu projelendirme safhasında, zeminlerin geoteknik özellikleri analiz edilerek, yapı güvenliği ve yapının inşaatından sonraki zemin davranışı geoteknik mühendisleri tarafından hesaplanır. İnşaat projesinin yapılacağı bölgedeki zemin mukavemetinin düşük olması durumunda, inşaat bölgesindeki zeminin bertaraf edilmesi ekonomik açıdan uygun olmadığından, bu durum karşısında geoteknik mühendisleri zeminin yerinde iyileştirilmesi yöntemine yönelirler.

Arazideki zemin özellikleri, inşaatı planlanan yapının geoteknik şartlarına uymadığı takdirde, geoteknik mühendislerinin yapmış olacakları ilk çalışma, zemini yerinde ıslah ederek, mühendislik açıdan uygun hale getirmektir. Bu durumda, öncelikle zemin içerisindeki mevcut boşlukların mekanik araçlar yardımıyla azaltılması, bu boşlukların farklı karışımlarla doldurulması, yeraltı su seviyesinin düşürülmesi, zeminin su içeriğinin



azaltılması ve çeşitli endüstriyel, madensel, organik atıklarla zeminin kayma mukavemetinin güçlendirilmesi amaçlanmaktadır.

Zemin iyileştirilmesindeki esas amaçları ;

- Zeminlerin kayma mukavemetini arttırmak
- Oturmayı azaltmak ve konsolidasyon sürecini hızlandırmak
- Dolgu ve şevlerin stabilitesini oluşturmak
- Zemini iksa duvarı gibi çalıştırmak
- Zeminin geçirimliliği ve sıvılaşma potansiyelini azaltmak olarak sıralayabiliriz.

### **2.3 Zemin stabilizasyon yöntemleri**

Zemin stabilizasyon yöntemleri, inşaat alanındaki mevcut geoteknik soruna, stabilize edilmesi istenen zemin derinliğine ve zemin özelliklerine göre değişkenlik gösterirler. Uygulama aşamasında, bu yöntemler üç ana grupta toplanırlar ;

- İnşaat alanında uygulanan geçici iyileştirme yöntemleri : yeraltı su seviyesinin düşürülmesi, ısıtma işlemleri (zeminin dondurulması) ve elektro-osmoz teknikleri.
- Zeminlere herhangi bir katkı ilave edilmeden yapılan kalıcı iyileştirme yöntemleri: yüzey kompaksiyonu, patlama ile sıkıştırma, vibro kompaksiyon ve dinamik konsolidasyon.
- Zeminlere katkı ilave edilerek yapılan kalıcı iyileştirme yöntemleri : kireç, uçucu kül, çimento, silis dumanı, bitüm gibi malzemelerin zemine ilave edilerek zeminin üniform bir şekilde karıştırılması, enjeksiyon ve geotekstil malzemelerinin kullanılarak zeminin iyileştirilmesi.

Zemin iyileştirme yöntemleri iki ana grup içerisinde incelenebilir. Birinci grup olarak toprak dolgularda kullanılacak zeminlerin malzeme özelliklerinin iyileştirilmesi ve uygun dolgu hazırlama teknikleri olarak sıralayabiliriz. Bu grup için uygun olan başlıca iki yöntem, sıkıştırma (kompaksiyon) yöntemleri ve katkı malzemelerinin (kireç, çimento, baca külü, uçucu kül, asfalt, kimyasal katkıları) kullanılması ile zemin özelliklerinin iyileştirilmesidir. İkinci grup olarak da doğal zemin tabakalarının özelliklerinin yerinde

iyileştirilmesidir. Bu iyileştirme yönteminde kullanılacak yöntemler aşağıdaki gibi sıralanır [29]

- Mekanik yöntemler - değişik sıkıştırma (kompaksiyon) teknikleri
- Hidrolik yöntemler - yeraltı suyu kontrolü, drenaj, zemin suyunun çıkarılması (konsolidasyon), ön yükleme
- Fiziko-Kimyasal yöntemler – katkı malzemeleri, enjeksiyon yöntemleri, elektrostabilizasyon, ısı işlemler/ısıtma-soğutma (dondurma)
- Hafif malzemelerin kullanımı (ağırlık azaltma)
- Donatılı zemin-çelik veya geosentetik donatılar

Zeminlerin stabilizasyonu, günümüzde inşaat teknolojisinin gelişmesine paralel olarak daha hızlı ve daha çeşitli yöntemlerle yapılabilmektedir. Bu yöntemler katkısız ve katkılı stabilizasyon olarak ikiye ayrılır. Katkılı stabilizasyonda, birçok katkı malzemesi, inşaat makineleri yardımı ile zeminlere enjekte edilip, zeminin mukavemet özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanır.

Günümüzde endüstriyel projelerin yaygınlaşması, endüstriyel imalat sonucu ortaya çıkan atıkların depolanması veya doğaya terk edilmesi, yeni çevresel problemleri de beraberinde getirmektedir. Ülkemiz uçucu kül,mermer ve granit gibi maden kaynakları açısından önemli bir yere sahiptir. Bu madenlerin işlenmesi sırasında, büyük miktarda endüstriyel atık oluşmakta olup, bu atık malzemelerin depolanması hem insan sağlığını hem de doğayı olumsuz yönde etkilemektedir. Bu da, endüstriyel atık malzemelerinin depolanması ya da bertaraf edilmesi için birçok çevre kuruluşu ve mühendislerin bu konuda çok sayıda araştırma yapmasına sebep olmuştur.

## 2.4 Katkılı Zemin Stabilizasyonu

Zeminlerin iyileştirilmesinde katkı malzemelerinin kullanımı, çok eski medeniyetlerden beri kullanılan bir yöntemdir. Roma İmparatorluğu'nda ilk kez yollara çeşitli bitki kökleri, kireç gibi malzemeler ilave edilerek, yolların altındaki zeminin dayanım özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

Günümüzde, endüstriyel ve kimyasal katkıların kullanımıyla zeminlerin mukavemet özellikleri iyileştirilmekte ve bu alanda birçok yeni yöntemler keşfedilmektedir. Böylece, çevre kirliliğine sebep olacak atık malzemelerin bertaraf edilmesi ve bu malzemelerin inşaat projelerinde kullanılmasıyla düşük maliyetler elde edilmektedir [30]

Katkılı zemin stabilizasyonunda kullanılacak olan katkı malzemesi seçiminde, genel olarak zemin cinsi, seçilen katkının zemin ile olan etkileşimi, zeminin dayanım özelliklerine olumlu etkisi, katkı malzemesi ile iyileştirilmiş zeminin geoteknik özelliklerinin laboratuvar deneyleriyle incelenmesi ve maliyet analizi gibi hususlar daima göz önünde tutulmalıdır. Bu yöntemde genellikle zeminlere toz halde bulunan uçucu kül, silis dumanı, çimento, mermer tozu, kireç vb. gibi malzemeler ilave edilir.

Günümüzde maden atıklarının fazlalaşması ve depolama alanlarında karşılaşılan zorluklar, bu atıkların tekrar doğaya kazandırılması ve kullanımı büyük önem kazanmıştır. Madensel atıkların fiziksel özelliklerinin zemin yapısına uygun olması, geoteknik mühendislerini, bu atıkların zemin stabilizasyonundaki kullanımı konusunda akademik çalışmalara yönlendirmiştir. Yapılan akademik çalışmalar sonucunda, bazı maden ve endüstriyel atıkların zeminlere katılarak, zemin dayanım özelliklerini arttırdığı ve katkı zemin stabilizasyonunda fayda sağladığı gözlenmiştir.

Katkılı stabilizasyon yönteminde, zemin geoteknik özelliklerinin, ucuz ve zeminlerin dayanımını arttıran doğal malzemelerle iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu yöntem ağırlıklı olarak ulaştırma, su ve katı atık depolama projelerinde görülmüş olup, katkı malzemesi olarak genellikle çimento, uçucu kül, bitüm, klorit ve bazı özel kimyasal bileşikler kullanılmaktadır [31]

Zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılacak olan endüstriyel ya da madensel atıkların, genellikle yüksek miktarda açığa çıkan ve temin edilmesi hızlı olan malzemelerden seçilmesi daha uygundur [32]

#### 2.4.1 Kireç ile Zemin Stabilizasyonu

Zeminlerin kireçle stabilizasyonu, kireç ile yüksek plastisiteli kil arasındaki katyon değişimi esasına dayanan gelişmiş bir yöntem ve ileri bir zemin iyileştirme metodudur. Kireç ile zemin güçlendirmesi, mevcut zemin malzemesi ile kireç tozu ya da kireç çamurunun karıştırılması ve zeminin gerekli olan yoğunluk kadar sıkıştırılması ile gerçekleşmektedir. Kireç, kalsiyum hidroksit ya da kalsiyum magnezyum hidroksit ve magnezyum oksit karışımlarını içermektedir. Zemin ile karıştırılan bu malzeme su ile tepkimeye girdiği zaman kimyasal reaksiyon göstermektedir.

Killi bir zemine kireç katılması sonucu başlayan kimyasal reaksiyonlar sonucu katyon değişimi, topaklaşma ve çimentolaşma meydana gelmekte, puzolanik etkileşim görülmektedir. Katyon değişimi sonucunda genel olarak killerle birleşen tek değerli katyonlar çift değerli kalsiyum iyonlarla yer değiştirirler. Topaklaşma sonucu kil parçacıkları birleşerek, daha büyük parçacıkları oluştururlar ve bu durum killi zeminlerin yapısında değişikliğe sebep olur. Kil parçacıkları da kendi aralarında birleşerek daha büyük boyutlu parçacıkları meydana getirirler [33]



Şekil 2.3 Farklı Dane Boyutundaki Kireçler [34]

Kireç stabilizasyon işlemi yaygın olarak şişme potansiyeline sahip killi zeminlerde kullanılır. Şişme potansiyeline sahip killere, kireç katkısıyla stabilizasyon işlemi uygulanarak zeminde oluşacak şişmenin en düşük seviyeye indirilmesi ve zeminin işlenebilirliğinin artırılması sağlanmıştır. Bu uygulama en çok karayolu projelerinde gerçekleştirilir. Kireç ile stabilize edilen zeminin mühendislik özelliklerinden sorumlu mekanizmalar için çok sayıda araştırma ve açıklama yapılmıştır. Bu mekanizmalar katyon değişimi, kilin folokülasyonu ve puzolanik reaksiyonları içerir. İlk iki reaksiyon hızlı olup, kürsüz dayanım ve yük deformasyon özelliklerine ilaveten plastisite, işlenebilirlik ve şişme özelliklerinde ani değişimlere neden olur. Oluşan diğer reaksiyon puzolanik veya bağlayıcı reaksiyon olup zamana bağımlıdır [35]. Aglomerasyon sonucunda artan yapı

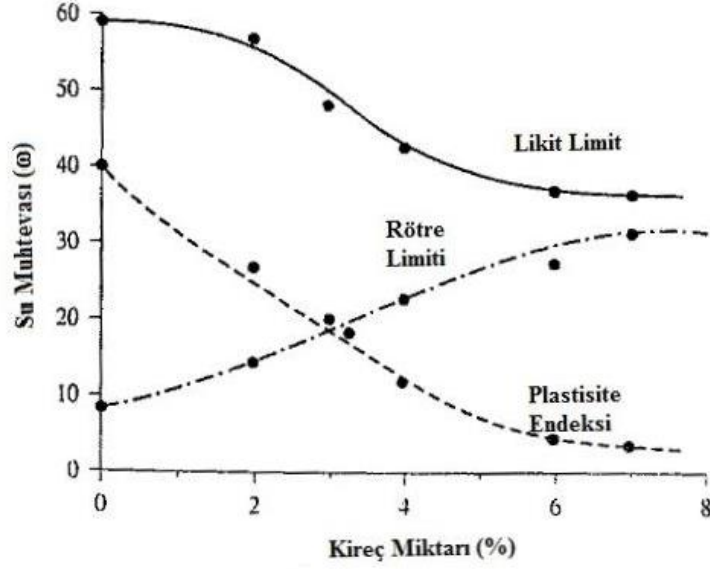
bütünlüğü zeminin ilave su tutma kabiliyetinde düşüğe sebep olarak, şişme potansiyelinin düşmesine neden olur [36]

Kireç ile karıştırılması gereken zemin bileşenleri hızla ve homojen bir şekilde karıştırılmalıdır. Karışım esnasında zemin rutubeti kontrol edilmeli ve karışım işleminden sonra zeminde sıkıştırma işlemi başlatılmalıdır. Tüm ince daneli zeminler kireç kullanımı sayesinde daha düşük plastisiteye ve daha iyi işlenebilirliğe ulaşmaktadır. Kireçle işleme tabi tutulmuş zemin dayanım karakteristikleri esas itibariyle zemin cinsine, kullanılan kirecin tipine, kireç yüzdesine ve kür koşullarına bağlıdır. Zeminin PH derecesi , organik madde miktarı, drenaj koşulları ve su muhtevası gibi birçok faktör, zemin-kireç reaksiyonunu etkilemektedir.



Şekil 2.4 Kireç ile Zemin İyileştirme Uygulaması [37]

Kil zeminlere ilave edilen kireç malzemesi, puzolanik reaksiyon sonucu kil minerallerinin yapısal değişiklik geçirmelerine sebep olur. Bu kil minerallerinin de bir araya gelerek daha büyük daneleri oluşturduğu ortaya konmuştur. Bu etkileşim sonucunda likit limit ve plastisite indisinin düşüş ; plastik limit, rötne limit, işlenebilirlik ve mukavemet özelliklerinin de artış gösterdiği gözlenmiştir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 Kıvam limit değerlerinin kireç oranı ile değişimi [38]

#### 2.4.2 Çimento ile Zemin Stabilizasyonu

Çimento, yapı malzemesi olarak bilinen, betonun ana malzemesi olarak kullanılırken, aynı zamanda zeminlere de ilave edilerek, zemin kayma mukavemeti değerinin artırılması için kullanılır. Zemin boşluklarında bulunan su, çimento ile reaksiyona girerek hızlı bir şekilde hidrasyona uğrar. Hidrasyon sonucu oluşan katılaşma sonucunda, çimento partikülleri diğer çimento danelerini bağlayarak zeminin mukavemetinde artış oluştururlar. Zamana bağlı olarak zemin-çimento karışımının mukavemet değeri yükselme gösterir.

Çimento-zemin etkileşim tepkimelerinin ilk aşamasında çimentonun hidroliz ve hidratlaşması yer alır. İkinci aşamada meydana gelen tepkimelerde kilin mineral yapısı ve ortamda bulunan amorf malzemedeki değişimler, yeni bir bağlayıcı etki oluşmasını sağlarlar [39]

Zeminlerin stabilizasyonunda, kimyasal karışımlara göre ucuz ve mukavemet değerinin yüksek olması gibi özellikleriyle genellikle Portland Çimentosu tercih edilmektedir. Ancak, bu çimento türünün tek olumsuz tarafı geç priz almasıdır. Zemin stabilizasyon çalışmalarında en önemli faktörlerden biri zeminin cinsi ve su/çimento oranıdır. Zeminin plastisite ve mukavemet özelliklerini önemli oranda etkileyen unsurlardan biri de ilave edilen su miktarıdır [40]

Çimento, organik zeminler hariç tüm zemin türlerinde uygulanıp, ağırlıklı olarak kum-çakıl türü zeminlerde daha çok verim gösterirler. Çimento ile iyileştirme yönteminin etkili olduğu zemin çeşitleri kumlu ve siltli zeminler ile düşük plastisiteli killerdir. Çimento ile iyileştirilmiş olan zeminlerin özelliklerini etkileyen parametreler çimento oranı, su muhtevası, sıkıştırma yöntemi, yoğunluk, çevre basıncı ve kür süresi olarak sıralanabilir.

Çimento ile zeminlerin iyileştirilmesi genel olarak zeminlerin sıkıştırılma işlemi devam ederken uygulanır. Bu sırada çimento, zemin daneleri arasındaki boşluklara girerek, daneler arasındaki boşlukları azaltmış olur. Daha sonra, zemine su ilave edildiğinde, su ile reaksiyona giren çimento sertleşerek, zeminin birim hacim ağırlığı artar. Bunun sonucunda, zeminin kayma dayanımı ve taşıma kapasitesi artış gösterir. Çimentonun zeminlerde reaksiyona uğraması, zeminin minerallerine bağlı olmayıp sadece zemindeki suya bağlıdır.

Yumuşak kil zeminlere çimento ilave edilmesi durumunda, likit limit değerinde düşüş; plastisite indisi ve zemin işlenebilirlik değerlerinde ise artış gözlenir. Çimento stabilizasyonunun, kil zeminlerde etkin olabilmesi için zeminin likit limit değerinin 45-50'den, plastisite indisinin de 25'den küçük olması gerekmektedir.



Şekil 2.6 Çimento Stabilizasyonu

### 2.4.3 Uçucu Kül ile Zemin Stabilizasyonu

Uçucu kül terimi 1930'lu yıllarda, elektrik enerjisi üreten sanayi yapılarında ortaya çıkmış olup, 1970'li yıllarda çimento maliyetlerinin de artması sebebiyle, uçucu küllerin kullanımı tüm dünyada kabul görmüş ve yaygınlaşmıştır [41].

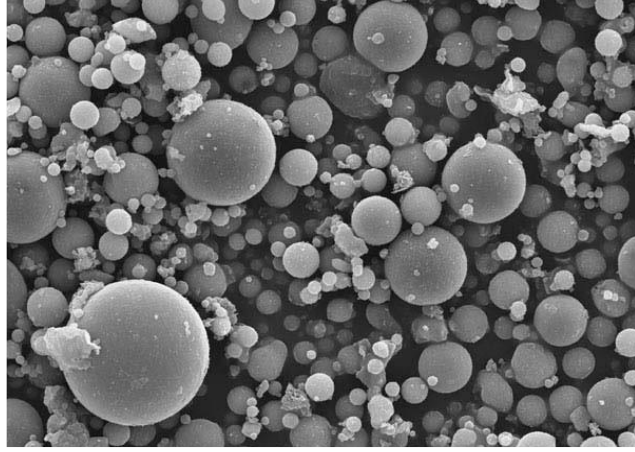
Uçucu küller, düşük kalorili linyit kömürlerinin yakıldığı termik santrallerde, elektrik üretimi sırasında toz haldeki kömürün yanması sonucu baca gazları ile sürüklenen ve elektrostatik filtreler yardımı ile tutularak, atmosfere salınımı önlenen mikron boyutunda kül taneciklerinden meydana gelmektedir. Endüstriyel bir atık olan ve uçabilen bu küller uçucu kül olarak adlandırılırlar. Temel bileşenleri silis ve alüminadır. Uçucu küller inşaat sektöründe çimento, beton, hafif agrega, tuğla ve gaz beton üretiminde kullanılmakta olup, puzolanik özellik taşımaları sebebiyle, zemin ve yol stabilizasyon çalışmalarında da kullanılırlar.

Uçucu kül, termik santrallerde kömürün yakılmasıyla oluşan gazların atmosfere bırakılmadan önce bacalardaki filtreler tarafından tutulan silt ebadında parçacıklardır. Bu termik santrallerin baca gazlarında, uçucu küllerin muhafaza edilmesi amacıyla siklon adı verilen toz tutucular ve yüksek verimli elektrofiltreler bulundurulmaktadır [42]. Bu süreç sırasında, iri daneli olmaları sebebiyle, baca gazları ile atmosfere salınımı yapılamayarak kazan tabanına düşen küller ise taban külü olarak adlandırılırlar [43].

Türkiye'de elektrik enerjisi ihtiyacının yaklaşık olarak yarısının karşılandığı termik santrallerden 1998 yılı verilerine göre 13 milyon ton/yıl uçucu kül elde edilmekte olup, bu miktar ABD'de 45 milyon ton/yıl ve Hindistan'da 50 milyon ton/yıl değerlerindedir [44].

Uçucu küller alüminli, silisli ve demirli malzemeler olup, genel olarak gri olmalarına karşın, içinde yanmamış karbon miktarının fazla olması durumunda, daha koyu renkli olabilmektedirler. Kireç ile reaksiyonları sonucu bağlayıcı özelliği gösterirler. Tipik olarak küresel şekilde olan çapları 1-300 mikron (Şekil 2.7) arasında değişim gösteren parçacıklara sahip olan uçucu küllerin özelliklerine etki eden etmenler, yakılan kömürün cinsi, yakma verimi, kömürün yakıldığı fırın sınıfı, kömürün inceliği ve kömüre ilave edilen katkı malzemeleri olarak belirlenmiştir [45]





Şekil 2.7 Uçucu kül atık malzemesinin SEM görüntüsü [46]

Türkiye’de bulunan termik santrallerde oluşan uçucu küller genel olarak C sınıfı uçucu küllerdir [47]. Ayrıca birçoğu da yüksek kireçli uçucu kül sınıfında yani  $\text{CaO} > \% 10$  üzerinde yer almaktadır. Soma ve Çatalağzı Termik Santrallerinden elde edilen uçucu küllerin geoteknik özellikleri incelenmiş olup, bu uçucu küllerin toprak dolgu malzemesi yerine ve yüksek plastisiteli killerin iyileştirilmesinde değerlendirilebileceği sonucuna ulaşılmıştır [48]

Termik santrallerde büyük hacimlerde açığa çıkan uçucu küllerin arazide dolgu halinde depolanması ve içinde barındırdıkları ağır metallerin ayrışmaları sonucu yeraltı suyuna karışmaları ciddi çevresel sorunlara neden olmaktadır. Uçucu küllere uygulanan zemin stabilizasyonu sonucu, mevcut küllerin permeabilitesi azalış göstermekte olup, kimyasal ve biyokimyasal maddelerin süzülmesi engellenmiştir. Uçucu küllerin yüksek oranda oluşumu ve puzolanik özellik göstermeleri, bu atık malzemesinin ağırlıklı olarak inşaat mühendisliğinde kullanımını sağlamaktadır [49]

Uçucu küller içerdiği silis, alümin mineralleri ve ince olmaları yönünden puzolanik aktiviteye sahiptirler. Puzolanik aktivite, silika ve alüminat miktarına, yapısında su ve serbest kirecin varlığına, uçucu külün inceliğine bağlıdır. Uçucu kül zemine katıldığında bünyesindeki kalsiyum oksit, silikat ve alüminatın hidratasyona uğramasıyla kuvvetli bağlar oluşturarak zemin danelerini bir arada tutar. Geoteknik mühendisliğinde uçucu küller, genellikle zemin stabilizasyonu, dolgu ve bent yapımında kullanılmaktadırlar. Ayrıca, sızdırmazlık özellikleri sebebiyle atık depolama sahaları, yol kaplaması altındaki dolgu tabakası yapımında, çöp atık sahaları üzerindeki beton kaplama veya

döşemelerdeki farklı oturma hasarlarının onarılması için kireç ile birlikte enjeksiyon uygulamalarında kullanılırlar [50].

Termik santrallerde, yüksek oranda açığa çıkan uçucu küllerin geoteknik uygulamalarda ve zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliğine yönelik deneysel çalışmalardan elde edilen bilgilere göre uçucu küllerin puzolan olma özelliği, uçucu külün içerdiği CaO miktarına bağlıdır. Bu husus, puzolan olmayan uçucu küle CaO ilave edildiğinde puzolanik davranış görülmesi ile kanıtlanmaktadır. Uçucu kül, hafif olma, oturmalarının hızlı oluşu ve puzolanik olduğu takdirde yüksek mukavemete haiz dolgu malzemesi olarak değerlendirilebilir. Puzolan uçucu küllerin de arazide serildikten hemen sonra sıkıştırılması gerekir.

#### **2.4.4 Silis Dumanı ile Zemin Stabilizasyonu**

Silikon metali ya da silikonlu metal üretiminde açığa çıkan gazın yoğunlaştırılması ile meydana gelen yüksek miktarda amorf yapıda ve ortalama tane çapı 150 nm olan silis içeren, yüksek performanslı çimento ve beton üretiminde mineral katkı maddesi olarak kullanılan atık malzemeler "silis dumanı" olarak adlandırılırlar.

Silis dumanı, nitrojen adsorpsiyon tekniğiyle bulunan ve yüzey alanı yaklaşık 20000 m<sup>2</sup> / kg olan çok ince camsı partiküllerden oluşur. Bu partiküllerin boyutları, ortalama çimento partiküllerinden 100 kat daha küçüktür. Yapılarında çok ince boyutta ve yüksek silis içeriği içermeleri sebebiyle, silis dumanı yüksek puzolan malzeme olarak tanımlanır. Silis dumanlarının genel kullanım alanlarını hazır beton ve harç, refrakter endüstrisi, deniz yapıları, baraj, tünel, yol, köprü yapıları, shotcrete uygulamaları, beton borular, prekast ve prefabrik endüstrisi olarak sıralayabiliriz. Ayrıca, silis dumanı maliyetinin, %40 oranında çimentodan düşük olması, bu atık malzemenin kullanımını daha yaygın hale getirmiştir [51].

Silis dumanının, geoteknik disiplininde kullanımı da son yıllarda birçok araştırmaya konu olmuş ve akademik alanda yapılan deneysel çalışmalarda, zeminlerin iyileştirilmesine çok büyük yararları olduğu gözlenmiştir. Yapısı gereği, geçirimsizliği 100 kat arttırdığı için, özellikle kimyasal maddelere maruz kalan arazilerde kullanımının çok uygun olduğu keşfedilmiştir.



Şekil 2.8 Silis Dumanı [52]

#### 2.4.5 Mermer Tozu

Mermer tozu, mermer işleme madenlerinde yer alan blok ve plakaların kesilmesi sonucu açığa çıkan ve genellikle boyutu 1 mm'den küçük olan en küçük boyutlu toz tanecikler olarak adlandırılırlar. Kesilme işlemi sırasında su kullanılması sonucu, mermer atıkları su aracılığıyla çökeltme havuzlarında biriktirilir. Daha sonra, bu havuzlarda çökelen mermer tozu, atık sahalarına nakledilir. Afyon ve İsehisar Bölgeleri'nde yer alan maden işletmelerinde yaklaşık 125 000 ton/yıl mermer tozu atık malzemesi açığa çıkmaktadır. Mermer tozunun, yapısında yüksek oranda CaO içermesi, tane boyutlarının çok küçük olması ve bu durumun kireçle benzerlik göstermesi, mermer tozu katkısının ince daneli zeminlerin iyileştirilmesinde kireç yerine kullanılabileceği fikrini ortaya koymuştur [53]. Mermer tozu, kil ve kil-çakıl türü zeminlerle harmanlandığında oluşan karışım numunelerinin plastisite ve permeabilite değerlerinde düşüş ; maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinde de artış gözlenmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda, zeminlere ilave edilecek optimum mermer tozu oranının genellikle zemin ağırlığının %20'si olduğu belirlenmiştir [54].



Şekil 2.9 Mermer Tozu

#### 2.4.6 Çelikhane Cüruf Atıkları

Çelikhane cüruf atıkları, sıvı çelik üretimi sırasında, yapısında bulundurduğu empüritelerin oksidasyonu sonucu açığa çıkan oksit ve silikatlardan meydana gelen, metalik özellik göstermeyen yan ürünler olarak tanımlanırlar. Çelikhane cürufları genellikle koyu gri renkte olup, kübik şekilli ve yüzeyi pürüzlü görünüme sahiptirler. Yüksek fırın cüruflarına göre çok sert ve sıkı yapıdadırlar [55]



Şekil 2.10 Metal Cürufu [56]

Demir-çelik endüstrisinde yılda yaklaşık olarak 1.6 milyar ton çelik üretilirken, 650 milyon ton yan ürün, katı atık ve çamur açığa çıkmaktadır. Bir ton çelik üretimi sürecinde 400-450 kilogram katı atık meydana gelmekte olup, bu atıkların %70'inin yüksek fırın, %30'unun da çelikhane cüruf atıkları olduğu gözlenmiştir.

Çelikhane cüruf atıklarının demir-çelik sektöründe, sinter fabrikalarında kullanımının yanısıra, ince ve kaba dolgu malzemesi olarak da kullanıldığı bilinmektedir. Çelikhane cüruf atıklarının karayolu üst yapı, asfalt katkı malzemesi ve asfalt betonu olarak kullanımları hakkında literatür çalışmaları mevcuttur. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, çelikhane cüruf atıklarının, çimento ve kireç ile kullanımının zemin dayanımını arttırdığı gözlenmiştir.

#### 2.4.7 Kırmızı Çamur Atığı

Bayser prosesini ile boksitten alümine üretimi sırasında açığa çıkan madensel atık malzemeler kırmızı çamur atığı olarak adlandırılırlar. Esas bileşenleri  $Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $Na_2O$  ve  $CaO$  mineralleri olup, bunun yanısıra düşük oranlarda Zr, Y, Th ve U elementlerine de sahiptirler. Kırmızı çamur atığı, kırmızımsı kahverengine sahip, dane boyut dağılımına göre çok ince yapıda olan malzemelerdir [57].

Alüminyum üretimi sırasında kullanılan boksit cevherinin yaklaşık olarak %40'ı kırmızı çamur atığı olarak açığa çıkar. 1 ton alümine üretimi için açığa çıkan kuru bazda 1 ton kırmızı çamur atığı oluşur [58].

Gelişen teknoloji sonucu kırmızı çamur atık malzemesi ile tuğla üretimi teknolojisinde birçok çalışmalar yapılmış ve gelişmeler meydana gelmiştir [59]. Literatürde, kırmızı çamur atık malzemesinin, asidik sızıntı suyu, yüksek yoğunluğa sahip tehlikeli ağır metal iyonları üreten kirletilmiş bölgelerin ve madensel alanların arındırılması işlemlerinde kullanılarak olumlu yönde etki ettiği sonucuna varılmıştır [60]. Daha önce yapılan akademik çalışmalar, kırmızı çamur atığının fosfat ve kromat gibi çevre kirliliğine sebep olan anyonik mineralleri adsorbe etme özelliğine de sahip olduğunu ortaya koymuştur [61].



Şekil 2.11 Kırmızı Çamur Atık Malzemesi

#### 2.4.8 Gaz Beton Atığı

Binalara çok yönlü katkı sağlayan ve günümüzde duvar örgü malzemesi olarak kullanılan hafif yapı malzemesine gaz beton adı verilir. Gaz betonlar hacim olarak %70 - %80 oranlarında gözeneklerden oluşan, yoğunluğu ve ısı iletkenliği düşük, masif kagir duvar malzemesidir [62].

Bir tür hafif beton olarak tanımlanan gaz beton, çevre dostu, yanmaz, hafif bir yapıda olması, yüksek ısı ve ses yalıtımı özellikleri sayesinde, en çok tercih edilen duvar örgü malzemesi olarak kullanılmaktadır. Endüstriyel olarak gaz beton üretimi ilk olarak İsveç'te başlamış ve Almanya'da gelişimini sürdürmüştür. 2015 yılı verilerine göre Türkiye'de gaz beton üretim kapasitesi 5.1 milyon m<sup>3</sup>, tüketim kapasitesi de 4.7 milyon m<sup>3</sup> miktarına ulaşmıştır.

Son yıllarda artış gösteren büyük inşaat yapılarında, hafif ve çevre dostu olma gibi birçok farklı özelliğe sahip olan gaz betonlar, yapı malzemesi olarak tercih edilmeye başlanmıştır. Bu da inşaat alanlarında, yüksek miktarda gaz beton atık malzemesinin açığa çıkmasına sebep olmuştur.

Açığa çıkan gaz beton atık malzemeleri toz hale getirilerek, zeminlere ilave edilmiş olup, zemin mukavemet özelliklerinde iyileşme meydana getirdiği gözlenmiştir (Şekil 2.12).



Şekil 2.12 Zemin stabilizasyon işlemlerinde kullanılan öğütülmüş gaz beton atığı

#### 2.4.9 İnşaat Yıkıntı Atığı

Son yıllarda yaygınlaşan büyük inşaat projeleri ve eski yapıların yıkılarak yenilenmesi sonucunda milyarlarca ton inşaat yıkıntı atığı oluşmaktadır. Bu inşaat yıkıntı atıklarının bertaraf edilmesi, hem ekonomik ve hem de ekolojik yönden büyük faydalar sağlamaktadır. Ayrıca, bu atıkların geri kazanımı, tüm ülkeler için büyük önem teşkil eden, sosyal ve çevresel bir konu haline gelmiş olup, inşaat sahalarının kapsamlı bir atık yönetimine ihtiyacı olduğu gerçeğini ortaya koymaktadır [63].

Günümüzde, açığa çıkan inşaat yıkıntı atıklarının bertaraf edilmesi ve değerlendirilmesi konusunda, geoteknik mühendisleri birçok akademik araştırma yapmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalarda, inşaat yıkıntı atıkları küçük parçalar haline getirilip zeminlere ilave edilere, zemin mukavemet özellikleri incelenmektedir.



Şekil 2.13 İnşaat Yıkıntı Atığı [64]



#### 2.4.10 Bitüm

Bitüm, asfalt vb. petrolden elde edilen siyah, yapışkan, sıcak halde sıvı olan ürünlere denir. Kıırma taş, çakıl, kum gibi taneli zeminlere, sıcak sıvı bitümlü madde katılıp karıştırılarak ve serilerek kompaksiyon uygulanır. Bitümlü maddelerin, daneler arasında bağlayıcılık ile geçirimsizlik sağlama işlevleri vardır.

Bitüm, zemin ile birleştğinde daneleri birbirine yapıştırır ya da zemini su geçirmez hale getirerek daneler arasındaki su filmlerinin birbirleriyle olan bağıını muhafaza eder veya her iki etkileşimi aynı anda meydana getirir.

Deneysel çalışmalar sonucunda, bitüm malzemesinin zeminlere yaklaşık olarak %5 - %10 oranlarında katılması sonucu, zeminin dayanımını arttırdığı gözlenmiştir. Bitüm ile yapılan stabilizasyon uygulamaları genellikle yol ve yüzey kaplaması projelerinde görülür [65].



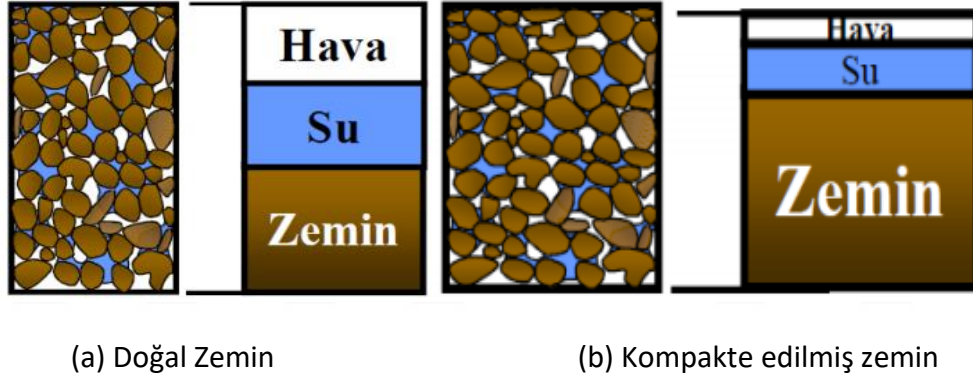
Şekil 2.14 Yol stabilizasyon işlemlerinde bitüm uygulaması [66]



## 2.5 Kayma Mukavemeti ve Konsolidasyon

### 2.5.1 Kompaksiyon

Zeminlerin taşıma gücünü arttırmak için sabit, hareketli ve dinamik yükler altında meydana gelecek oturmaları ve zeminin geçirimliliğini azaltarak, zeminlerin daha fazla su alıp hacimsel değişikliklerin oluşmasını önlemek amacı ile zeminlerin tabakalar halinde serilerek mekanik araçlar vasıtası ile su ve dane hacmi sabit iken havanın dışarı atılıp zemin danelerinin sıkıştırılması olayına “kompaksiyon” denir. Zemin danelerinin birbirine yaklaştırılması ve aralarındaki hava boşluklarının azaltılması sonucu daha sıkı bir yerleşime sahip olmalarını sağlayan mekanik işlemler de “Kompaksiyon” olarak adlandırılır.



Şekil 2.15 Kompaksiyon sonrası zemin durumu

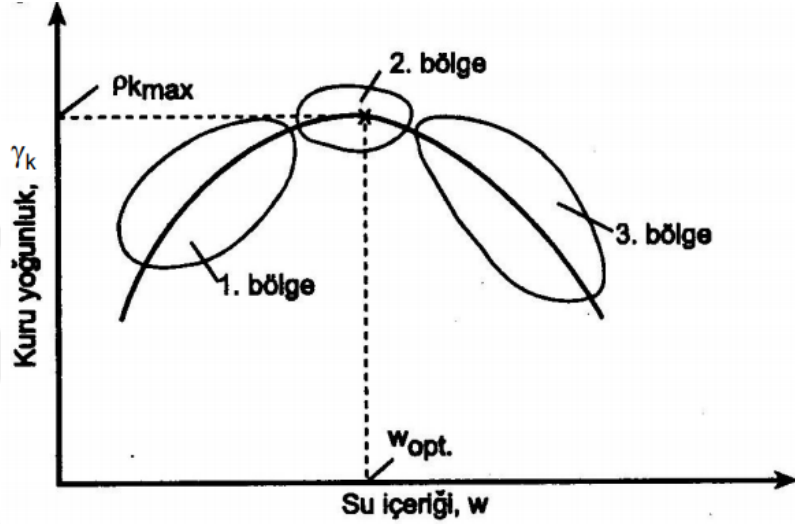
Uygulanan belirli bir kompaksiyon enerjisi ile elde edilebilecek sıklık derecesinin su muhtevasına bağlı olarak değişimi, zemin için deneysel olarak saptanmalıdır. Sıkıştırılmış zeminde, kompaksiyon derecesi o zemine ait kuru birim hacim ağırlığıdır. Kuru birim hacim ağırlığı ne kadar büyükse, zemin o kadar iyi sıkıştırılmış demektir.

Kompaksiyon işleminin temel amaçları :

- Zeminin boşluk oranını azaltarak, zeminin geçirimliliğini azaltmak, su emme ve içeriğini değiştirme özelliklerinin kontrol edilmesi
- Zeminin kayma mukavemeti ve taşıma gücünü arttırmak
- Zeminin, titreşim ve yük etkisi altında hacim değiştirme, oturma ve deforme olabilirliliğini azaltmak

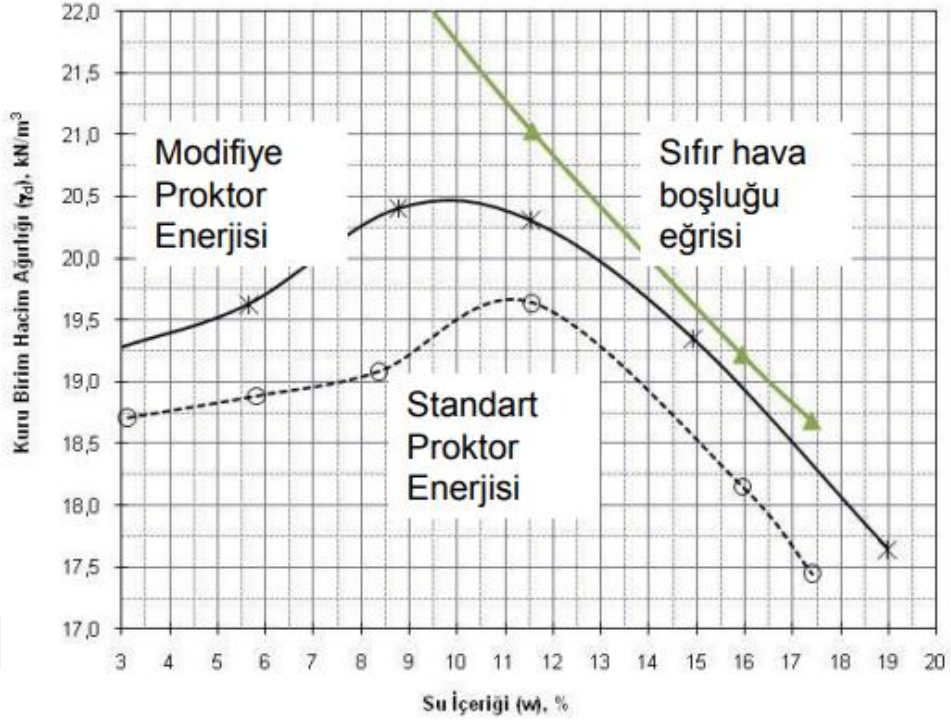
- Sıvılaşma riskinin azaltılması olarak sıralanır.

Proctor, sıkıştırılmış bir zeminde, su içeriği ile kuru birim hacim ağırlığı arasındaki ilişkiyi gösteren kompaksiyon eğrisi oluşturmuştur. Proctor, kompaksiyon işlemini, zemin danelerinin birbirine yaklaştırılması ve aralarında hava boşluklarının azaltılması sonucu daha sıkı bir yerleşime sahip olmalarını sağlayan mekanik işlemler olarak tanımlamaktadır.



Şekil 2.16 Kompakte edilmiş bir zeminde  $\gamma_k - w$  ilişkisi [67]

Zeminler, sabit bir kompaksiyon enerjisi ile değişik su içeriklerinde sıkıştırıldığında, artan su muhtevasına bağlı olarak kuru birim hacim ağırlığı artmakta, maksimum bir değere ulaşmakta ve daha sonra da azalmaktadır. Kuru birim hacim ağırlığının maksimum olduğu bu durumdaki su içeriğine "optimum su içeriği" denir.



Şekil 2.17 Standart ve Modifiye Proktor deneyi sonucunda elde edilen eğriler [68]

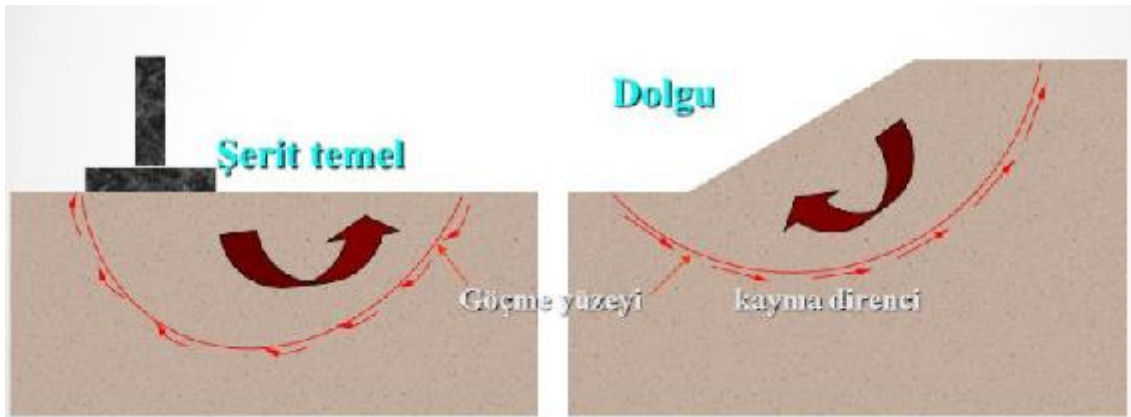
### 2.5.2 Kayma Mukavemeti

Geoteknik mühendisleri, inşaatı planlanan yapının kayma göçmesine karşı güvenli bir şekilde tasarlamak zorundadırlar. Baraj dolguları, temeller ve istinat yapıları gibi inşaat mühendisliği uygulamalarındaki problemlerin çözülebilmesi için zeminin kayma dayanımının bilinmesi gerekmektedir. Zeminlerde, göçmeye karşı koyan nihai direnç kuvveti kayma mukavemeti olarak tanımlanır ve zeminin fiziksel özelliklerinin en önemli göstergelerinden biridir.



Şekil 2.18 Zayıf zeminlerde yaşanan oturma problemi [69]

Bir zeminin kayma mukavemeti, zeminin dayanabileceği ve karşı koyabileceği en büyük kayma gerilmesidir. Diğer bir ifadeyle, zeminin kayma gerilmelerine karşı gösterebileceği en büyük dirençtir. Zeminler genel olarak kayma yolu ile göçerler. Göçme yüzeyi boyunca oluşan kayma gerilmeleri, göçme anında kayma mukavemeti değerine ulaşır.



Şekil 2.19 Göçme yüzeyi boyunca oluşan kayma gerilmeleri

Killerin minerolojisi, kil içeriği, plastisite indisi, su muhtevası, kuru birim hacim ağırlık ve deformasyon hızı, killi zeminlerin kayma mukavemeti üzerinde etkisi olan parametrelerdir. Su, zemin daneleri arasında hem kaydırıcı hem de bağlayıcı etki yapma



özelliklerine sahip olduğundan zeminin dayanımını etkilemektedirler. Bu yüzden killi bir zeminin kayma mukavemeti üzerindeki en etkili faktörlerden biri de su muhtevasıdır. Arazilerde, mevsim yağışları sebebiyle zeminlerin su muhtevası değişmekte olup bu durum zeminlerin göçmesine neden olmaktadır. Doğada meydana gelen birçok zemin göçmesi olayına, ani yağışların sonucu zemin su içeriğinin artışı ile malzemenin mekanik özelliklerinde meydana gelen ani düşüş neden olmuştur.

### 2.5.3 Mohr Coulomb Göçme Hipotezi

Göçmeye neden olan normal ve kayma gerilmelerinin ortak etkisini göz önünde bulunduran birçok hipotez geliştirilmiştir. Bu hipotezler içerisinde en basit, en bilinen ve uygulamalarda en çok kullanılanı Mohr-Coulomb göçme hipotezidir.

Zeminlerle ilgili ilk kırılma hipotezi, 1776 yılında Coulomb tarafından ortaya atılan Coulomb hipotezidir. Zeminler için ilk geçerli göçme hipotezi ilk kez 1911 yılında Mohr tarafından geliştirilmiştir. Daha sonrasında zeminler için benzer hipotezler geliştirilmiş olup, bunların arasında en basit ve uygulamada en yaygın olanı Mohr-Coulomb göçme hipotezidir. Bu hipoteze göre zeminlerin kayma mukavemeti, Coulomb sürtünme yasasına dayanmaktadır.



Şekil 2.20 Tayvan’da meydana gelen şev kayması [70]

Mohr-Coulomb göçme hipotezinde, kırılma zarfının altında kalan gerilme durumları için göçme meydana gelmemekte olup, kırılma zarfına ulaşan gerilme durumundaki zeminde göçme meydana gelmektedir. Zeminlerin göçme zarfı, doğrusal olmadığı halde uygulamada bir doğru olarak kabul edilir. Bu doğrunun düşey eksenini kestiği nokta  $c$  ve yatay ile yaptığı açı  $\phi$  olarak ifade edilerek, kayma mukavemeti bağıntısı elde edilir (3.2).

$$\tau_f = c + \sigma^* \tan \phi \quad (3.2)$$

$c$  : kohezyon

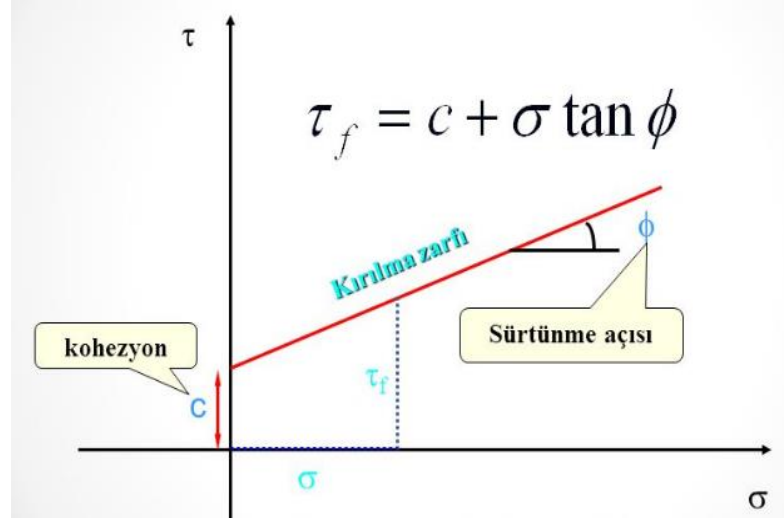
$\phi$  : içsel sürtünme açısı

$\sigma$  : toplam gerilme

Zeminin kayma mukavemetini iki ana parametrede açıklar:

- a. İçsel Sürtünme Açısı : zemin danelerinin birbirlerine kilitlenmeleri ve sürtünmeleri sonucu oluşan mukavemet değeridir.
- b. Kohezyon : zemin danelerini bir arada tutmaya çalışan ve elektriksel etkileşimden oluşan mukavemet değeridir.

İçsel sürtünme açısı, dane yüzeyleri arasındaki sürtünmeden meydana gelen direnci ve danelerin birbirine göre hareketine engel olan kilitlenme etkisini de içeren toplam direnç olarak tanımlanmaktadır. Mohr-Coulomb göçme hipotezinde bir diğer önemli parametre ise  $c$  olarak ifade edilen kohezyon değeridir. Kohezyon, danelerin birbirini tutma özelliğinden oluşmaktadır. Kayma mukavemeti parametreleri, zeminler için sabit bir değerde olmayıp, yapılan deneylerde uygulanan yük ve drenaj koşullarına göre değişiklik göstermektedir.



Şekil 2.21 Mohr-Coulomb Göçme Hipotezi

#### 2.5.4 Konsolidasyon

Herhangi bir malzemeye yük uygulandığı zaman deformasyon oluşur ve mühendislikte kullanılan birçok malzemenin belirli bir gerilmeye kadar Hooke kanununa uyduğu kabul edilir. Zeminlerde gerçekleşen gerilme – deformasyon ilişkisi genellikle kompleks bir yapıda olup, farklı zeminlerde büyük değişiklikler göstermektedir.

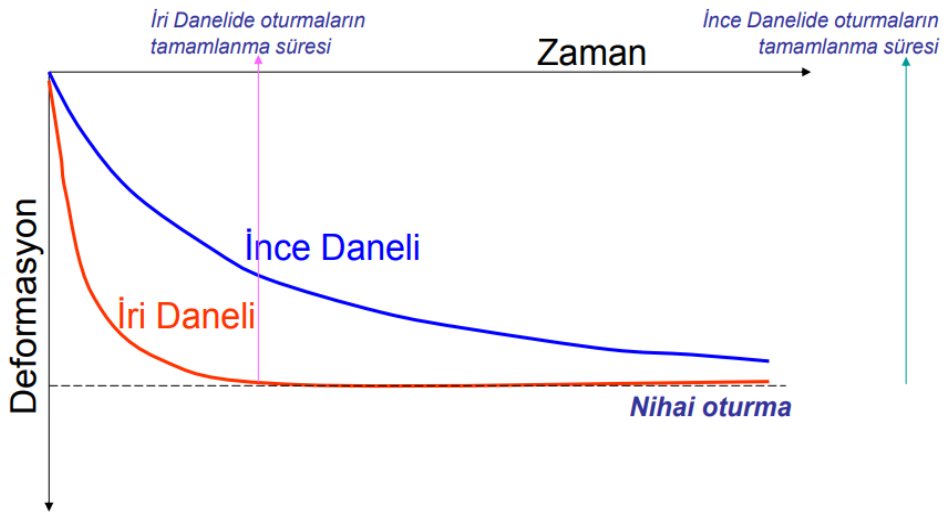


Şekil 2.22 Konsolidasyon oturması sorunu yaşayan bir yapı [71]

Herhangi bir inşaat projesinin yapılma aşamasında gerçekleşen yeraltı su seviyesinin düşürülmesi ve iyileştirme amaçlı uygulanan dinamik etkiler, zemin üzerinde ilave gerilmeler oluşturur ve bu durum zeminde oturmalara neden olmaktadır. Zeminlere uygulanan yükler sonucunda zemin sıkışmaya başlar. Zemin danelerinin sıkışması, zemin boşluklarındaki hava veya suyun sıkışması ve bunun sonucunda zemin danelerinin birbirine yaklaşması, zeminin toplam hacminin azalmasına sebebiyet vermektedir.

Zeminlerde meydana gelen sıkışma, ani oturma ve konsolidasyon oturması olarak iki türde görülmektedir. Kohezyonsuz zeminlerde meydana gelen oturma, ani oturma türüdür. Oturma kısa süreli olup, yükleme yapılır yapılmaz zeminde oturma gerçekleşmiş olur. Bu tür zeminlerde permeabilite yüksek olduğu için, boşluklardaki suyun dışarı aktarımı kısa sürede gerçekleşmektedir.

Kohezyonlu zeminlerde ise oturma, büyük ölçüde zamana bağlı olarak gerçekleşmektedir. İnce daneli zeminlerin permeabilitesi çok düşük olduğu için yüklenen zeminden suyun dışarı çıkması çok yavaş şekilde olup, zamana bağlı bir oturma meydana gelir. Suyu doymuş kohezyonlu zeminlerde, özellikle killerde asıl oturma, konsolidasyon oturmasıdır.



Şekil 2.23 Konsolidasyon deformasyonu – zaman ilişkisi grafiği



### MALZEME VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında, yüksek plastisiteli kil zemine, farklı oranlarda kurşun-çinko atık malzemesi ilave edilerek oluşturulan karışım numunelerine sınıflandırma, kıvam, serbest basınç, üç eksenli basınç, kesme kutusu ve konsolidasyon deneyleri uygulanarak, numunelerin geoteknik özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

#### 3.1 Deneysel Çalışmada Kullanılan Malzemeler

Deneysel çalışmada ana zemin olarak kil ve ana katkı malzemesi olarak kurşun-çinko malzemesi kullanılmış olup, ilave malzemeler olarak da uçucu kül ve çimento seçilmiştir.

##### 3.1.1 Kil

Bu tez çalışmasında kullanılan kil zemin, İstanbul – Arnavutköy Mevkisi'nde bulunan bir inşaat sahasından temin edilmiş ve Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Geoteknik Laboratuvarı'na getirilmiştir. Kil zemine öğütme işlemi (Şekil 3.1) uygulandıktan sonra kıvam, kompaksiyon, serbest basınç ve üç eksenli basınç deneyleri uygulanmıştır.



(a)



(b)

Şekil 3.1 Öğütülmemiş zemin (a) ve Öğütülmüş zemin (b)

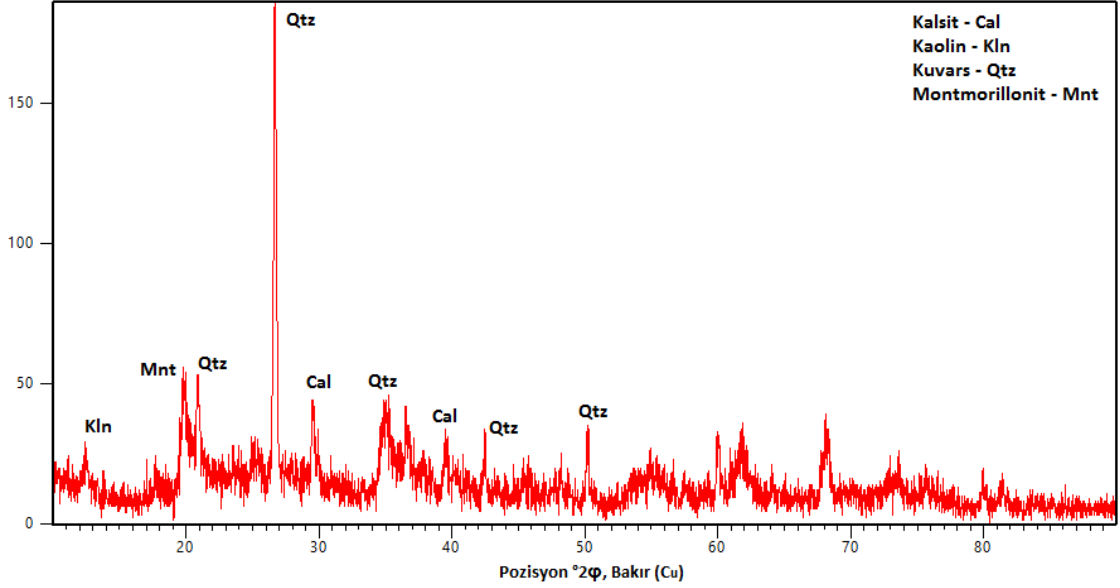
105 C° derecedeki etüvde, 24 saat bekletilip kurutulduktan sonra zeminin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla ASTM standartlarına göre elek, hidrometre, piknometre, kıvam ve kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda, deneysel çalışmada kullanılan zeminin, birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine (USCS) göre yüksek plastisiteli kil (CH) olduğu tespit edilmiştir.

Deneylerden elde edilen zeminin fiziksel özellikleri Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 Kilin fiziksel özellikleri

Zemin Sınıfı	-	CH	
Doğal Su Muhtevası	%	10	
Optimum Su Muhtevası	%	21	
Özgül Ağırlık	-	2,74	
Elek Analizi	Çakıl	%	9
	Kum	%	6
	Silt	%	36
	Kil	%	49
Atterberg Limit Değerleri	Likit Limit	%	65
	Plastik Limit	%	24
	Plastisite İndisi	%	41
Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık	g/cm <sup>3</sup>	1,55	
Serbest Basınç Dayanımı	kPa	228	

Deneysel çalışmada kullanılan kil zeminin minerolojik özelliklerinin belirlenmesi için Yıldız Teknik Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde XRD analizi yapılmıştır. 4 No'lu elekten geçen toz numune üzerinde yapılan analizin sonucunda kil zeminin minerolojik yapısı incelenmiştir. Analiz sonucunda, kil zeminin kırınım desenlerinde kuvars, montmorillonit, kalsit ve kaolin mineralleri gözlenmiştir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 Kil numunesinin XRD analiz kırınım grafiği

### 3.1.2 Kurşun-Çinko Maden Atık Malzemesi

Çalışma kapsamında kullanılan kurşun-çinko maden atık malzemesi, Balıkesir İl Merkezi'nin 49 km kuzeybatısında Balya İlçesi sınırları içinde yer alan Balya Kurşun-Çinko madeni çalışma sahasından temin edilmiştir. Maden işletmesinde açığa çıkan atık miktarına göre depolama sahalarının yetersizliği, metal madeni atıkların çevresel açıdan doğurabileceği riskler ve bölgenin yağışlı bir iklime sahip olması, bu atık malzemenin geoteknik açıdan değerlendirilmesi ve ekolojik olarak doğaya tekrar geri dönüşümlü hale getirilmesi amaçlanmıştır.

Maden tesis bölgesinde ortaya çıkan kurşun-çinko atığına öncelikle filtrasyon işlemi uygulanmış ve pülpte katı oranı % 75-80 aralıklarında olan proses atığı olan malzeme, plastik variller içerisine nakledilmiştir. Bu variller içinde muhafaza edilen malzemenin oksitlenmemesi için malzeme 15-20 cm kalınlığında su tabakasıyla örtülmüş olup, malzemenin oksijenle olan teması engellenmiştir. Kurşun-çinko maden atık

malzemesinin varilde muhafaza edilmiş ve etüve yerleştirilmeden önceki durumu Şekil 3.3'de gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.3 Çamur kıvamında muhafaza edilen (a) ve etüve konulmadan önceki (b) kurşun-çinko maden atık malzemesi

Kurşun-çinko maden atık malzemesine ICP-MS cihazı ile yapılan elementel analiz sonuçları Çizelge 3.2'de belirtilmiştir.

Çizelge 3.2 Kurşun-Çinko Malzemesinin Elementel Analizi [72]

Temel Oksitler	Oran (%)
SiO <sub>2</sub>	36,19
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,08
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,58
MgO	2,54
CaO	23,26
Na <sub>2</sub> O	0,20
K <sub>2</sub> O	2,45
TiO <sub>2</sub>	0,29
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,08
MnO	0,38
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01

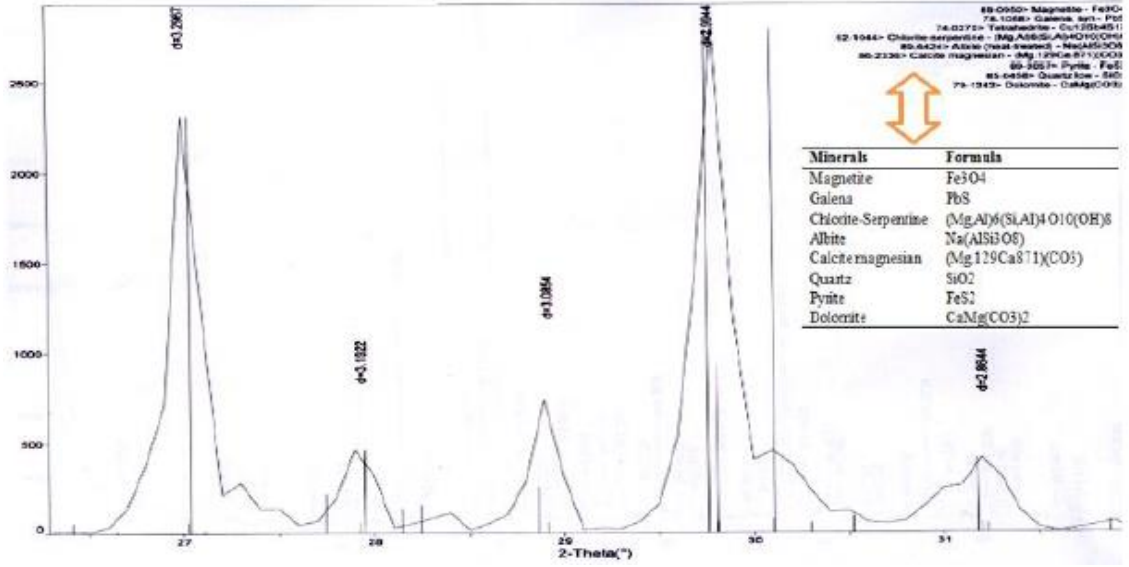
Deneysel çalışma süresince, çamur kıvamında muhafaza edilen kurşun-çinko maden atık malzemesi 105 °C sıcaklığındaki etüve konularak 24 saat bekletilmiştir. Bu süre sonunda toz haline gelen atık malzeme etüvden alınarak, soğumaya bırakılıp, kile farklı oranlarda ilave edilerek karışım numuneleri oluşturulmuştur.

Yapılan deneyler sonucunda kurşun-çinko maden atık malzemesinin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla ASTM standartlarına göre elek, hidrometre, piknometre, kıvam ve kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda, deneysel çalışmada kullanılan kurşun-çinko maden atık malzemesinin birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine (USCS) göre düşük plastisiteli (ML) yapıda olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 3.3 Kurşun-Çinko maden atık malzemesinin fiziksel özellikleri

Zemin Sınıfı	-	ML	
Doğal Su Muhtevası	%	0	
Optimum Su Muhtevası	%	12	
Özgül Ağırlık	-	3,08	
Elek Analizi	Çakıl	%	0
	Kum	%	61
	Silt	%	33
	Kil	%	6
Atterberg Limit Değerleri	Likit Limit	%	18
	Plastik Limit	%	17
	Plastisite İndisi	%	1
Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık	g/cm <sup>3</sup>	2,01	
Serbest Basınç Dayanımı	kPa	18	

Pb-Zn maden atık malzemesine uygulanan XRD analizi sonucunda, atık malzemede ağırlıklı olarak kuvars ve kalsit minerallerinin yer aldığı gözlenmiştir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 Pb-Zn maden atık malzemesinin XRD analiz kırınım grafiği [72]

### 3.1.3 Uçucu Kül

Deneysel çalışmada kullanılan uçucu kül, Zonguldak'ta bulunan Çatalağzı Termik Santrali'nden temin edilmiş olup, yapısında %10'dan daha az CaO içermesi sebebiyle F tipi uçucu kül ve düşük kireç külü sınıfına aittir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 Uçucu kül

Bu uçucu kül yapısında az miktarda serbest kireç (CaO) bulundurması sebebiyle, kendi kendine sertleşme özelliğine sahip olmayıp, puzolanik reaksiyonları çok yavaş gerçekleşmektedir. Uçucu külün kimyasal yapısı Çizelge 3.4'te belirtilmiştir. Bu çizelgede,  $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 > \%70$  olması sebebiyle, uçucu kül puzolanik reaksiyon göstermektedir.

Çizelge 3.4 Uçucu Kül malzemesinin elementel analizi

Temel Oksitler	Oran (%)
SiO <sub>2</sub>	54,08
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26,08
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,68
MgO	2,67
CaO	2,01
Na <sub>2</sub> O	0,79
K <sub>2</sub> O	4,53

### 3.1.4 Çimento

Bu tez çalışmasında, uçucu kül ile harmanlanmış Pb-Zn katkılı kil numunelerine belirli oranlarda CEM-I, 42.5 R çimento ilave edilerek, elde edilen numunelerin mukavemet özellikleri incelenmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan çimentonun kimyasal özellikleri Çizelge 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Çimento



Çizelge 3.5 Çimento malzemesinin elementel analizi

Temel Oksitler	Oran (%)
SiO <sub>2</sub>	20,69
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,24
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,48
MgO	1,90
CaO	61,78
Na <sub>2</sub> O	0,25
K <sub>2</sub> O	0,98
SO <sub>3</sub>	2,99
Kızdırma Kaybı	1,75
Çözünmeyen Kalıntı	1,89

### 3.1.5 Şebeke Suyu

Deneysel çalışma süresince, geoteknik laboratuvarından temin edilen şebeke suyu kullanılmıştır. Karışım numuneleri hazırlanırken, kompaksiyon işlemi öncesinde su, hazırlanan toz haldeki karışımlara püskürtülerek homojen dağıtım sağlanmıştır (Şekil 3.7).



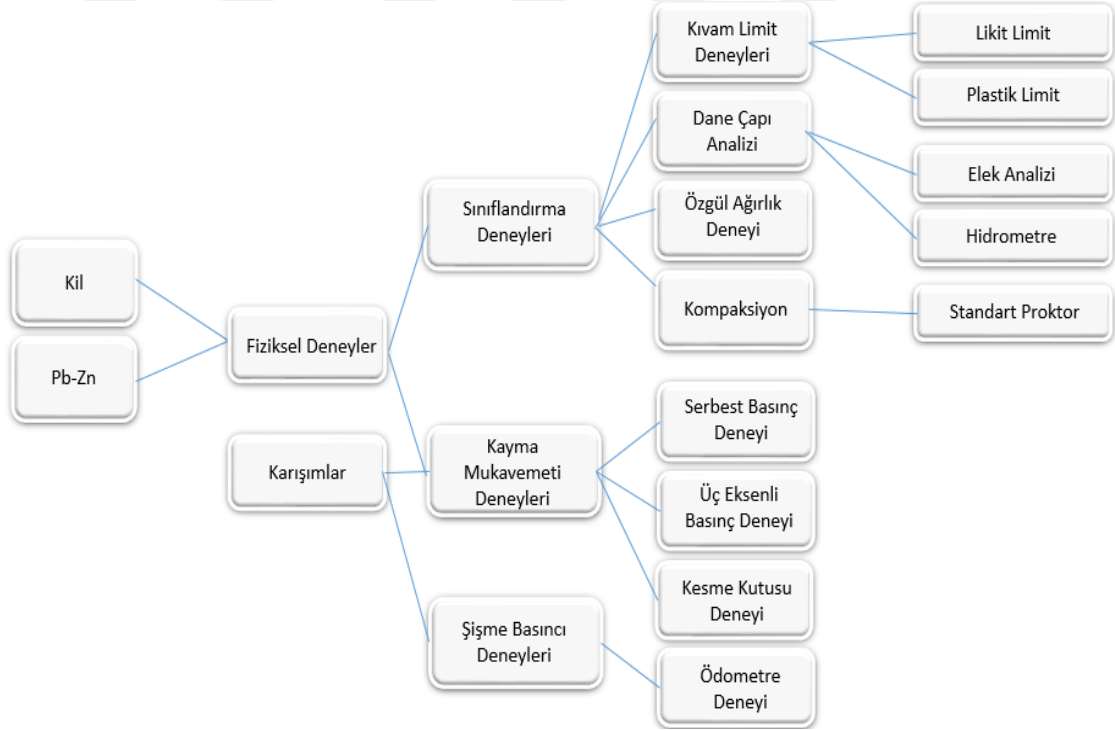
Şekil 3.7 Şebeke suyu



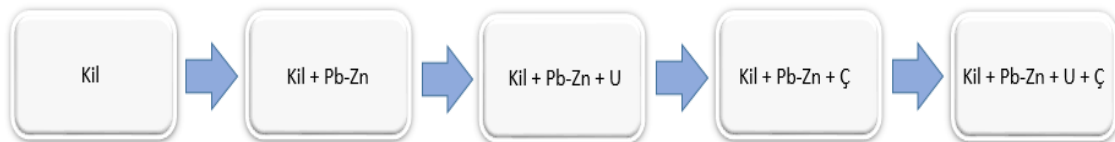
### 3.2 Tez Çalışmasında Kullanılan Deney Düzenleri

Bu tez çalışmasında kil ve kurşun-çinko maden atık malzemeleri için öncelikle zemin endeks deneyleri yapılarak malzemelerin fiziksel özellikleri tayin edilmiş olup, daha sonrasında serbest basınç, üç eksenli basınç, kesme kutusu ve konsolidasyon deneyleri uygulanarak, malzemelerin geoteknik özellikleri bulunmuştur. Çalışmanın diğer aşamasında kil, kil+Pb-Zn, kil+Pb-Zn+Uçucu Kül ve kil+Pb-Zn+Çimento karışım numunelerinin morfolojik yapılarının incelenmesi amacıyla SEM analizi uygulanmıştır.

Zeminlerin belirli standart sistemlere göre sınıflandırılmasını sağlayan ve mühendislik özellikleri hakkındaki ön bilgilere zemin endeks özellik deneyleri ile ulaşılmaktadır. Zemin endeks özelliklerinin tayin edilmesinde özgül ağırlık, elek analizi, hidrometre ve kıvam deneyleri yapılmaktadır (Şekil 3.8, Şekil 3.9).



Şekil 3.8 Deney Programı



Şekil 3.9 Deneysel Çalışmadaki Karışımlar

### 3.2.1 Özgül Ağırlık Deneyi

Dane birim hacim ağırlığının, suyun birim hacim ağırlığına oranı “Özgül Ağırlık ( $G_s$ )” olarak tanımlanır (Şekil 3.1). Özgül ağırlığın belirlenmesinde, iri daneli zeminler için yaklaşık 1 lt ve ince daneli zeminler için ise 50-100 cm<sup>3</sup> hacimli piknometre adı verilen cam şişeler kullanılır.

$W_1$  : Kuru Zemin Ağırlığı

$W_2$  : Su + Piknometre Ağırlığı

$W_3$  : Su + Piknometre Ağırlığı + Zemin Ağırlığı

$$G_s = \frac{W_1}{W_1 + W_2 - W_3} \quad (3.1)$$



Şekil 3.10 Piknometre Deney Düzeneği

ASTM D 854-02 standartlarına göre yapılan piknometre deneyinde, 40 No’lu elekten elenmiş ve etüvde 24 saat kurutulmuş olan 10 gram malzeme, 100 cm<sup>3</sup> hacimli cam piknometre şişesine boşaltılarak, numunede hava kabarcıklarının tamamen yok olmasına kadar vakum uygulanır. Vakum işleminden sonra piknometre kabı tamamen su ile doldurulup tartılarak, numunenin özgül ağırlık değeri bulunmuş olur.

### 3.2.2 Dane Çapı Dağılımı

Zeminlerde bulunan çakıl, kum, kil ve silt yüzde miktarlarının belirlenmesi, zeminin porozite, hidrolik iletkenlik, su tutma, direnç/dayanım gibi önemli mühendislik özellikleri hakkında bilgiler edinilmesini sağlamaktadır. Herhangi bir zemin malzemesinin dane boylarının ve bu değişik boydaki danelerin ağırlık oranlarının saptanması için yapılan çözümlemelere “Elek Analizi” denir.



(a)



(b)

Şekil 3.11 Elek Seti (a), Hidrometre kabı (b) - Dane Çapı Dağılım Deney Düzeneği

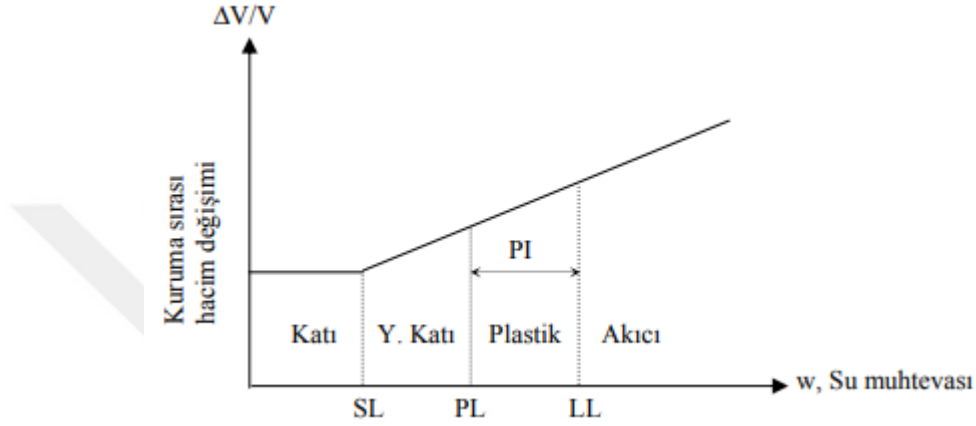
Bazı zeminleri eleklerden elemek ve çaplarına göre ayırmak, zemin danelerinin gözle görülemeyecek kadar küçük olmalarından dolayı mümkün olamamaktadır. Bu yüzden dane çapı 0.075 mm'den küçük veya 200 no'lu elekten geçen zeminler için Islak Analiz (Hidrometre) deneyi yapılmaktadır.

Bu deneysel çalışmada, ASTM D 422-63 standartlarında elek analizi ve hidrometre deneyleri yapılmıştır. Etüvden kurutulmuş halde alınan yaklaşık 450 – 500 gram malzeme, 200 no'lu elek üstüne konarak, su yardımıyla yıkama işlemi gerçekleştirilmiş olup, elek üstü ve altında kalan malzeme etüve konulmuştur. 200 no'lu elek üstünde kalan malzeme iri daneli olarak tanımlanıp sırasıyla 4.75 mm, 2 mm, 0.85 mm, 0.425 mm, 0.25 mm, 0.15 mm ve 0.075 mm açıklığa sahip eleklerden geçirilerek, her bir elek üstünde kalan malzeme ağırlığı hesaplanarak elek analizi tamamlanmış olur.

Hidrometre deneyinde, 200'no elek altında kalan malzemedan 50 gram alınarak 125 ml ayrıştırıcı madde olan sodyum hekza metafosfat içinde 24 saat süresince bekletilmiştir. Daha sonra, karışım mikser yardımıyla 30 dakika karıştırılmış olup, hidrometre mezürüne dökülmüştür. Mezürdeki karışım seviyesi 1000 cm<sup>3</sup> ibaresine gelene kadar su ilave edilerek, el yardımıyla çalkalama işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem sonrasında hidrometre çubuğu belirli zaman aralıklarında karışıma daldırılıp, okuma değerleri alınarak hidrometre deneyi tamamlanır.

### 3.2.3 Kıvam Limit Deneyleri

Kıvam limitleri olarak bilinen su muhtevası değerlerini belirlemek için kullanılan deney yöntemleri 1911 yılında İsveçli kimyager Albert Atterberg tarafından tayin edilmiştir. Atterberg tarafından tanımlanan, sınır su içerikleri Atterberg sınırları veya kıvam sınırları olarak adlandırılırlar. Zemin, su içeriğindeki azalmalara göre üç adet kıvama sahiptir (Şekil 3.10).

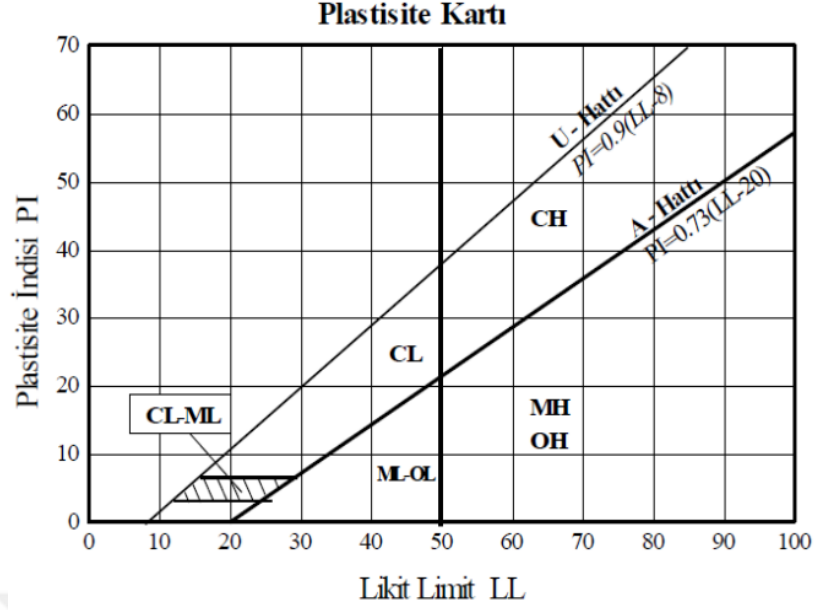


Şekil 3.12 İnce daneli zeminlerin kıvam limitleri

- Likit Limit: Zeminin viskoz bir sıvıdan plastik bir kıvama dönüştüğü su muhtevası
- Plastik Limit: Zeminin plastik bir malzemedен yarı plastik bir malzemeye dönüştüğü su muhtevası
- Büzülme Limiti: Zeminin yarı plastik bir malzemedен katı bir malzemeye dönüştüğü su muhtevası



Şekil 3.13 Atterberg Kıvam Deneyi Düzenegi



Şekil 3.14 Cassagrande Plastisite Kartı [73]

Deneyel çalışmada kullanılan zeminin plastisitesinin belirlenmesi amacıyla ASTM D 4318 standartına göre likit limit ve plastik limit deneyleri yapılmıştır. Likit limit deneyinde, 40 no'lu elekten geçirilen 150 gram malzemeye, su ilave edilerek malzeme viskoz bir sıvı kıvamına getirilmiştir. Bu kıvama gelen malzeme spatula yardımıyla likit limit cihazının içine, yüzeyi tabana paralel olacak şekilde sürülür. Daha sonra, zeminin tam ortası oyuk açma bıçağı ile yarılarak ikiye bölünür. Bu aşamadan sonra cihazın krank kolu saniyede 2 devirlik bir hızla çevrilmeye başlanır. Çevrilmeye beraber likit limit cihazının oval kabı düşme hareketi yapar ve bu düşme ile açılan yarık kapanmaya başlar. Yarık kapanma mesafesi 13 mm'ye ulaştığı zamanki düşüş sayısı deney föyüne not edilir. Bu işlemden sonra, zemin tekrar karıştırma kabına geri alınıp, az miktarda su ilave edilerek, aynı işlem tekrar edilir. Logaritmik egride 25 vuruşa denk gelen su muhtevası, zeminin likit limit değeri olarak belirlenir. Plastik limit deneyinde, az miktarda su ilave edilmiş zeminden bir miktar alınarak el yardımıyla, alınan zemin numunesi, 3 mm çaplı silindirik duruma getirilene kadar yuvarlanır. Belirtilen çapa ulaşan zemin numunelerinde çatlaklar ve kopmalar meydana gelir. Kopan numunelerin ıslak ve kuru ağırlıkları hesaplanarak, plastik limit değeri belirlenir.

Atterberg Kıvam Deneyinde, likit limit ve plastik limit arasındaki fark plastisite indisi değerini verir (3.2). Bu değer Cassagrande Plastisite Kartında gösterilerek zeminin sınıfı belirlenmiş olur.

$$I_p = W_L - W_P \quad (3.2)$$

#### **3.2.4 Kompaksiyon**

Kompaksiyon (sıkıştırma) zemin danelerinin birbirine yaklaştırılması ve zemin daneleri arasındaki hava boşluklarının azaltılması sonucu daha sıkı bir yerleşime sahip olmalarını sağlayan mekanik işlemlere verilen isim olarak tanımlanabilir. Zeminin sıkıştırılması sonucu, birim hacim ağırlık değeri arttırılmış ve buna bağlı olarak zeminin mühendislik özellikleri iyileştirilmiş olur.

Kompaksiyon deneyinde, 2 veya 2.5 kg ağırlığındaki zemin, etüvde 24 saat bekletilir. Etüvden alınan zemin, bir süre kurumaya bırakıldıktan sonra zemine ilave edilen su, homojen bir şekilde sıkılarak karıştırma işlemi gerçekleştirilir. Standart Proktor deneyinde 2.5 kg ağırlığındaki tokmak 45 cm yükseklikten 25 defa bırakılarak zemin sıkıştırılır. Bu işlem, kompaksiyon kalıbındaki zemine üçer kez uygulanarak, zemin üç tabaka halinde sıkıştırılmış olur. Sıkıştırma işleminden sonra, kompaksiyon kalıbındaki numune, kürek yardımıyla toz hale getirilerek, %3 oranında ilave su etme işlemi düzenli olarak tekrar edilir. Kompaksiyon kalıbındaki sıkıştırılan zeminin ağırlığı bir süre sonra düşmeye başlar. Bu düşmeden sonra aynı işlem 2-3 kez tekrar edilerek deney sonlandırılır. Deney sonucunda elde edilen verilerle kuru birim hacim ağırlık – su muhtevası grafiği çizilerek, zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası değerleri bulunmuş olur.

Deneyisel çalışmada kullanılan kil zemin, kurşun-çinko maden atık malzemesi ve uçucu küle, ASTM D1557-02 standartlarında, Standart Proktor deneyi uygulanarak, malzemelerin maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası değerleri bulunmuştur (Çizelge 4.11).



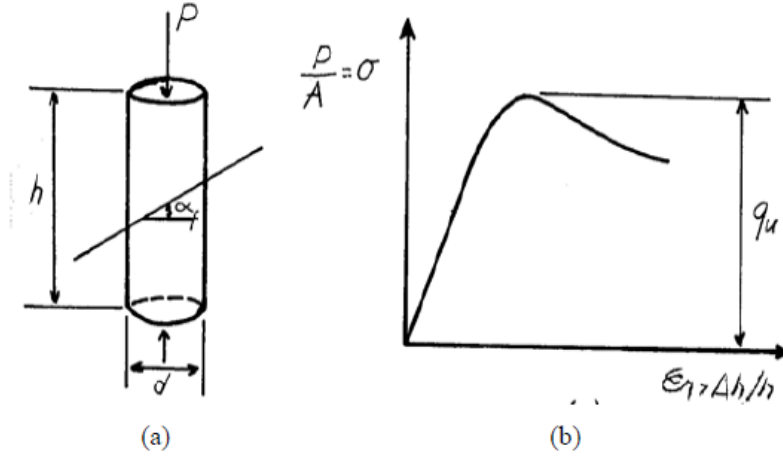
Şekil 3.15 Kompaksiyon Deney Düzeneği

### 3.2.5 Serbest Basınç Deneyi

Genellikle suya doygun killi zeminlerde ( $\phi=0$ ) kayma direncinin belirlenmesinde kullanılan bir deney olup, deney sonucunda elde edilen Mohr dairesinden zemine ait kayma direnci hesaplanır. Bu deneyde kullanılan numuneler tercihen 38 mm çap, 76 mm yükseklikte, doygun ve çatlak (fisür) içermeyen kohezyonlu zeminler olmalıdır.

Serbest basınç deneyinde, silindirik bir zemin numunesi aksenal doğrultuda yüklenir. Aksenal yük artışları sonucu numunede meydana gelen boy kısalması ölçülerek gerilme-şekil değiştirme ilişkisi belirlenir. Aksenal gerilmenin en büyük değeri, zeminin serbest basınç mukavemet ( $q_u$ ) değerini vermektedir.

Serbest basınç deneyi, herhangi bir yanal destek olmaksızın, kendi kendini dik olarak ayakta tutabilecek özelliklere sahip zeminler üzerinde uygulanır. Deney sırasında numunenin drenaj koşulları kontrol edilemediği için hızlı yükleme yapılarak numunenin drenajsız kayma mukavemetinin elde edildiği kabul edilir. Numunede oluşan kayma düzleminin alt ve üst yükleme başlıkları ile kesişmemesi için, boy uzunluğu/çap oranının  $h/d \geq 2$  olarak seçilmesi uygun olur.



Şekil 3.16 Deney sonrası numune kırılma açısı (a), Gerilme-Deformasyon Grafiği (b)

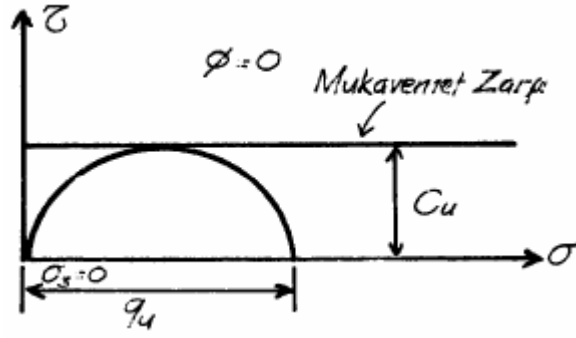
[74]

Deneyisel çalışmada, kompaksiyon kalıbında standart proktor enerjisinde sıkıştırılan zemine, 38.5 mm ve 100 mm uzunluğundaki silindirik 3 çelik tüp batırılarak, numune çıkarıcı yardımıyla numuneler tüplerden çıkarılmıştır. ASTM D-2166 standartlarında yapılan deneyde, kumpas ve falçata yardımıyla silindirik numunelerin yüzeyleri düzleştirilerek boy/çap oranı 2 olacak seviyeye getirilmiştir. Bu işlem sonrasında, 38.5 mm çap ve 77 mm boyundaki silindirik numuneler, 24 saat süresince desikatörde bekletilmişlerdir. Desikatörden alınan silindirik zemin numunesi serbest basınç deney cihazının ortasına yerleştirilip, cihazın üst başlığı numuneye temas ettirilerek, ilk okuma değeri alındıktan sonra, yük okuma saati sıfırlanır. Bu durumda düzenek, deneye başlamak için hazır hale getirilmiş olur. Deney başlatıldığında, alt plaka sabit bir hızda yukarı yönde hareket ederek, zemin numunesine yük uygulanmış olur. Yük uygulanması sırasında, zemin numunesinin taşıdığı yük artar ve bir süre sonra bu yük değeri pik değere ulaştıktan sonra düşüşe geçer. Bu aşamadan sonra numune, belirli bir kırılma zarfı açısında kırılmaya başlar. Bu süreçte, deformasyon ve yük halkasındaki değerler not edilerek, zemin numunesinde %20 oranında boy kısalması gerçekleşene kadar bu işlem devam ettirilerek deney sonlandırılır.

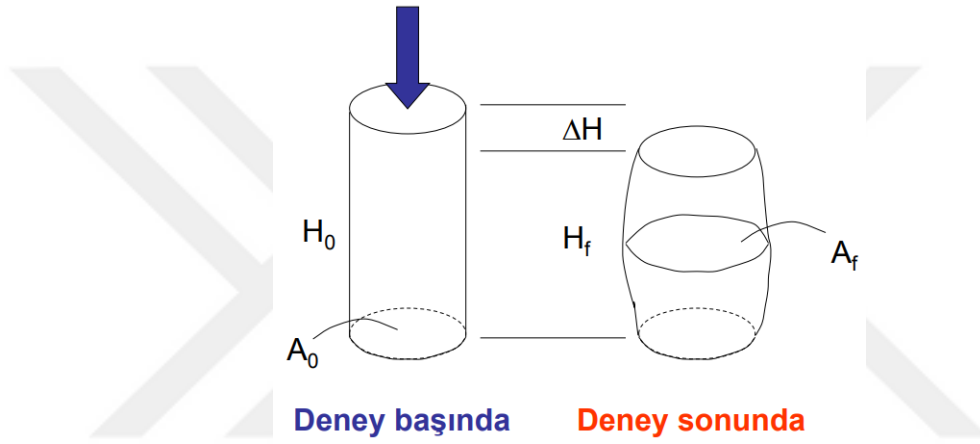
Deney sonucunda elde edilen birim alandaki maksimum yük değeri, zemin numunesinin serbest basınç mukavemet değeri olur. Elde edilen serbest basınç mukavemetinden, aynı zamanda suya doymun killi zeminlerin drenajsız kayma mukavemeti değeri de (3.3) bulunmuş olur (Şekil 3.17).



$$c = \frac{q_u}{2} \quad (3.3)$$



Şekil 3.17 Mohr Dairesi ve Mukavemet Zarfı [74]



Şekil 3.18 Serbest basınç deneyi sonucunda numunelerin boy deformasyon değişimi



Şekil 3.19 Serbest Basınç Deney Düzeneği

### 3.2.6 Üç Eksenli Basınç Deneyi

Arazideki zemin, üç eksenli gerilme etkisi altında bulunduğu için gerçeğe en yakın kayma dayanımı parametreleri arazi deneylerinden elde edilir. Bu nedenle, kayma dayanımını belirlemek için en yaygın kullanılan deney yöntemi üç eksenli yükleme ile dayanımlarının tayinine ilişkin bir deney olup boşluk suyu basıncı dikkate alınmadan zeminlerin değişik yanal basınçlarda makaslama dayanımları, içsel sürtünme açısı, kohezyon değeri, deformasyon modülü gibi elastik özellikleri ve dayanımlarının saptanması için gerekli verilerin bulunmasını kapsar. Laboratuvar koşullarında gerçekleştirilen üç eksenli basınç deneylerinde:

-Zemin numunesi arazi gerilmeleri altında konsolide edilebilmekte veya suya doygunluk derecesi kontrol edilebilmektedir.

-Yanal ve eksenel gerilmelerin uygulanması suretiyle arazi yükleme izlerine yakın yüklemeler yapılabilmektedir.

-Eksenel yüklemeler sırasında drenajlı veya drenajsız koşullar kontrol edilebilmektedir.

-Drenajsız yüklemelerde numunede oluşan boşluk suyu basıncı artışları, drenajlı deneyde ise numunede meydana gelen hacim değişimi artışları ölçülebilmektedir.

Üç eksenli basınç deneylerinde, drenaj ve yükleme koşullarına göre konsolidasyonsuz-drenajsız (UU), konsolidasyonlu-drenajsız (CU) ve konsolidasyonlu-drenajlı (CD) olarak üç farklı türde deney yapılabilmektedir.

**Konsolidasyonsuz – Drenajsız Deneyler (UU Deneyleri) :** Zemin suyunun hücre basıncı ve eksenel yükleme sırasında zemin numunesinden dışarı çıkmasına izin verilmemektedir.

**Konsolidasyonlu – Drenajsız Deneyler (CU Deneyleri) :** Bu deney türünün ilk aşamasında hidrostatik hücre basıncı altındaki zemin suyunun dışarı çıkmasına izin verildikten sonra, ikinci aşamada drenajsız durumda eksenel yükleme yapılmaktadır.

**Konsolidasyonlu – Drenajlı Deneyler (CD Deneyleri) :** Hidrostatik hücre basıncı uygulaması ve eksenel yükleme sırasında drenaja izin verilmektedir.

Bu tez çalışmasında, ASTM D-4767 Standartlarına göre konsolidasyonsuz-drenajsız (UU) üç eksenli basınç deneyi uygulanmıştır. Öncelikle standart kompaksiyon enerjisi ile

optimum su muhtevasında sıkıştırılmış kompaksiyon kalıbına silindirik çelik tüpler batırılıp elde edilen silindirik zemin numuneleri kumpas ve falçata yardımıyla 38,5 mm çap ve 77 mm boy uzunluğuna sahip silindirik numuneler haline getirilmişlerdir. Konsolidasyonsuz-drenajsız (UU) üç eksenli basınç deneyinde silindirik numunenin altına ve üstüne öncelikle poroz kağıt yerleştirilerek, poroz taşlarla kapatıldıktan sonra, numunenin çevresi membran ile kaplanır. Daha sonra, numunenin üstü cam hücreyle kapatılarak, su ile doldurulur. Bu işlem, 3 zemin numunesine sırayla 50 kPa, 100 kPa ve 200 kPa çevre basıncı uygulanarak, numuneler 1,25 mm/dakika hızında yüklenerek, yük ve deformasyon saat okumaları alınır. Numuneler kırılmaya uğradıktan sonra, bir süre daha okuma değerleri alınmaya devam edilerek, deney tamamlanır.

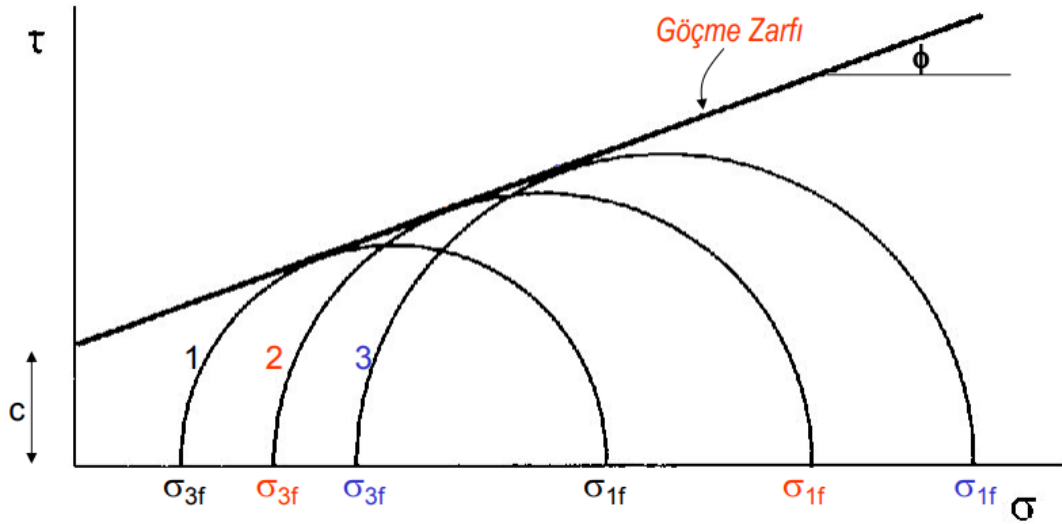


Şekil 3.20 Üç eksenli basınç hücresi, membrana geçirilmiş numune ve su ile doldurulmuş cam hücre



Şekil 3.21 Üç Eksenli Basınç Deneyi Düzenegi

Üç eksenli basınç deneyinde, zemine ait kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri, her bir çevre basıncı değeri için yapılan deneylerden hesaplanan  $\sigma_1$  ve  $\sigma_3$  gerilme çiftleri kullanılarak çizilen Mohr daireleri yardımı ile bulunur (Şekil 3.20)



Şekil 3.22 Üç eksenli basınç deneyindeki gerilme durumlarının gösteren Mohr Daireleri

[75]

$$\tau = c + \sigma * \tan\phi \quad (3.4)$$

c - Kohezyon

$\sigma$  - Deviatörük Gerilme

$\phi$  - İçsel Sürtünme Açısı

### 3.2.7 Direkt Kesme Kutusu Deneyi

Zeminlerin kayma dayanımı, temellerin taşıma gücünün hesabında, karayolu, hava alanlarının projelendirilmesinde, şevlerin denge analizlerinde, toprak dolgularda ve dayanma yapılarının inşasında çok önemlidir. Kesme kutusu deneyi ile zeminlerin kayma mukavemeti parametreleri ve kayma gerilmesi-kayma şekil değiştirme davranışı incelenmektedir.

Kesme kutusu deneyinde sabit bir yük uygulanan zemin yanal yönde kesmeye zorlanmaktadır. Deney sırasında zeminin drenajını kontrol etmek ancak yükleme hızını zeminin permeabilitesine göre ayarlamak ile mümkün olmaktadır. Kesme sırasında oluşan boşluk suyu basıncı artışlarını ölçmenin mümkün olmaması, göçmeye ulaşmadan önceki gerilme seviyelerinde asal gerilme doğrultularının belirsiz olması ve kırılma düzlemi boyunca gerilme dağılımının üniform olmaması bu deneyin kısıtlayıcı yönlerini oluşturmaktadır.

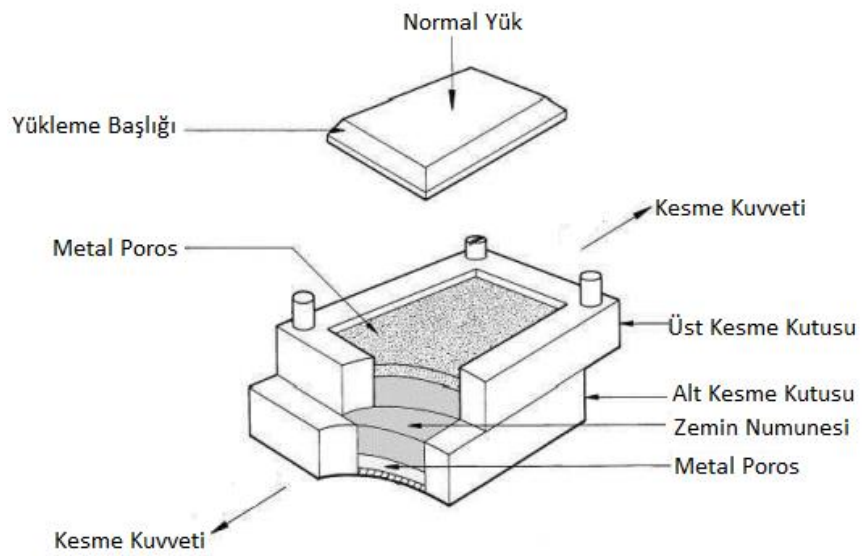
Kesme kutusu deneyi daha çok kumların kayma mukavemetini saptamak için kullanılmaktadır. Kum zeminler için elde edilen kayma mukavemeti açısı  $\phi$  drenajlı yükleme durumları için olup, arazi koşulları ile uyumlu olduğu kabul edilebilir. Deney numunesinin arazi boşluk oranına sahip olacak şekilde hazırlanmasına dikkat edilmelidir.



Şekil 3.23 Direkt Kesme Kutusu Deney Düzenegi



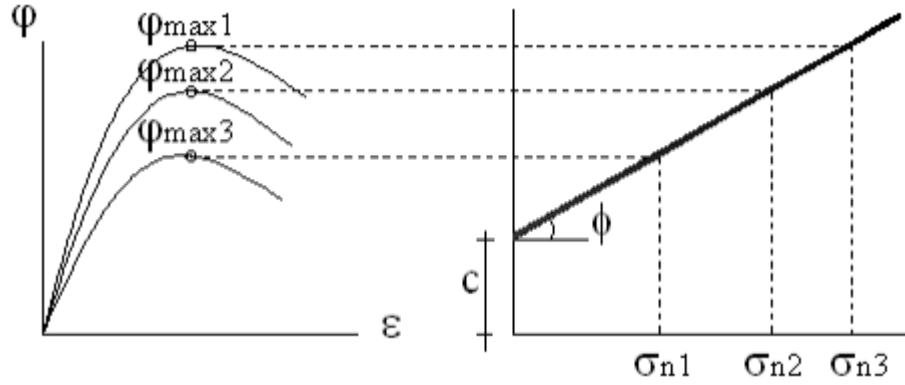
Şekil 3.24 Direkt kesme kutusu deney aparatları



Şekil 3.25 Kesme kutusu cihazı çalışma prensibi

Deneysel çalışmada, ASTM 3080 standartında direkt kesme kutusu deneyi uygulanmıştır. Bu deneyde, 60x60x20 mm ebatlarındaki metal alıcı, optimum su muhtevasında kompakte edilmiş kalıba kademeli olarak batırılarak, 3 adet zemin numunesi alınmıştır. Zemin numuneleri, kesme ringinden tahta numune çıkarıcı yardımıyla çıkarılarak, 24 saat desikatörde bekletilmişlerdir. Direkt kesme kutusundaki kesme kalıbının içine, zemin numunesinin alt ve üstü poroz kağıdı ile kaplanmış durumda tahta tokmak yardımıyla yerleştirilir. Kesme kalıbına yerleştirilen numunenin üstü tekrar poroz kağıdı ile kapatıldıktan sonra yük başlığı konulur. Daha sonra yükleme askısına 50, 100 ve 200 kPa değerlerindeki normal gerilmeyi verecek kadar yük yerleştirilerek deney başlatılır. Deney süresince kesme hızı 1.27 mm/dk olarak ayarlanır. Kesme işleminden sonra, numune kesme kalıbının içinden çıkarılarak deney tamamlanmış olur.

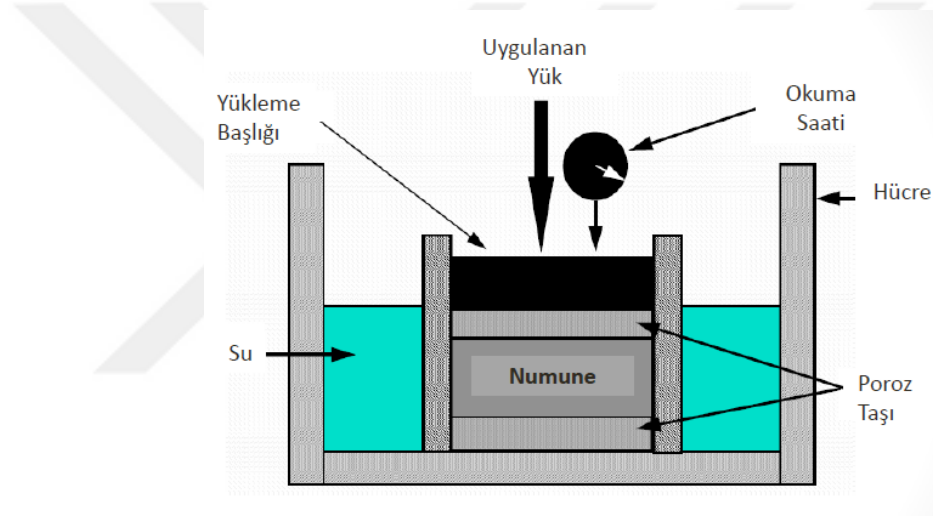
Deney sonlandırıldığında, elde edilen maksimum kayma gerilmesi, zemine uygulanan normal kuvvet etkisi altındaki kayma mukavemetini verir. Deneysel çalışmada, 60x60x20 mm ölçülerindeki 3 zemin numunesine 50 kPa, 100 kPa ve 200 kPa değerlerinde normal kuvvetler uygulanarak, kayma gerilmesi-şekil değiştirme ve kayma gerilmesi-normal gerilme grafikleri elde edilir. Kayma gerilmesi-normal gerilme grafiğinde göçme zarfı, kohezyon ve kayma mukavemeti açısı değeri bulunur (Şekil 3.24).



Şekil 3.26 Kesme kutusu deney sonucunda zemine ait c ve  $\phi$  değerlerinin belirlenmesi

### 3.2.8 Konsolidasyon Deneyi

Killi zeminlerin sabit gerilmeler altında, zamana bağlı olarak, bünyelerindeki suyun dışarı atılması sonucu sıkışması olayı “konsolidasyon” olarak adlandırılır. Belirli bir zaman dilimi içerisinde, kil tabakasında yavaş yavaş oluşan efektif gerilme artışı, oturmaya neden olacaktır. Bu olay konsolidasyon olarak ifade edilir. En basit konsolidasyon durumu, sıfır yanal deformasyon koşulunda gerçekleşen tek yönlü konsolidasyondur. Konsolidasyonun tersi olarak ifade edilen şişme süreci ise, negatif aşırı gözenek suyu basıncı altında bir zeminin hacminde yavaş bir biçimde meydana gelen artış olarak ifade edilir. Bir zeminin tek yönlü konsolidasyon sırasındaki davranışını belirleyen özellikleri, laboratuvarında “ödometre” olarak adlandırılan konsolidasyon deneyi ile belirlenir.



Şekil 3.27 Konsolidasyon deneyi çalışma prensibi

Deneyisel çalışmada, konsolidasyon ringi iyice temizlenip, kurutulduktan sonra optimum su muhtevasında sıkıştırılmış kompaksiyon kalıbındaki zemine batırılarak numune alınmış olur ve ringdeki numune bıçak yardımıyla düzleştirilir. Konsolidasyon deney düzeneğinin hazır edilmesi aşamasında, öncelikle gözenekli disk, kuru olarak konsolidasyon hücresinin içine yerleştirilerek, ortasına poroz taşı ve bu poroz taşının üstüne de poroz kağıdı yerleştirilir. Ringdeki numune, bu poroz kağıdının üstüne yerleştirilerek üstü poroz kağıdı ve poroz taşı ile kapatılır. Bu işlemden sonra poroz taşının tamamını kapatacak biçimde yükleme plakası yerleştirilir. Sonrasında yükleme kolu, su terazisi yardımıyla, yükleme plakasına teması sağlanıp, yükleme plakası düzleştirilerek deneyin başlaması için hazır duruma getirilir.



Konsolidasyon cihazına öncelikle 25 kPa gibi düşük bir ağırlık yüklenerek, numunede oturma meydana gelir. Bu sırada, yük saati takip edilerek, oturma'nın gerçekleştiği andaki saat yönü kaydedilir. Deneye başlanmasından 1 dakika sonra, gözenekli diske su ilave edilir ve numunede şişme meydana gelene kadar beklenilir. Yük saati yönünün tersinde hareket edip, yük saatindeki sıfırı geçtiğinde numune şişme davranışı gösterir ve tekrar ilave yükleme yapılır. Bu durum, zemin numunesindeki şişme davranışının sönümlenmesine kadar devam ettirilir. Zemin numunesinde şişmenin meydana gelmeyip, oturma davranışı göstermeye başladığı anda, cihaza yüklenen toplam ağırlık, zemin numunesinin şişme basıncı değerini gösterir.

Bu aşamadan sonra, yükleme halkasına kademeli olarak ağırlıklar yüklenip, 0.15, 0.30, 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60, 120, 240, 480 ve 1440 dakika okumaları alınarak deney föyüne kaydedilir. En son yükleme sonrasında, ağırlıklar kademeli olarak deney cihazından alınarak 1 ve 1440 dakika sonucundaki şişme değerleri not alınarak deney tamamlanmış olur.



Şekil 3.28 Konsolidasyon Deney Düzenegi



Şekil 3.29 Konsolidasyon deney aparatları

Bu tez çalışmasında kil, Pb-Zn ve uçucu kül malzemelerinin farklı oranlarda harmanlanmasıyla oluşan zemin numunelerine ödometre deneyi uygulanmıştır. Deney başlangıcında numunelere az miktarda yükleme yapılarak öncelikle şişme basıncı değeri belirlenmiş olup, daha sonra kademeli yükleme yapılarak deney tamamlanmıştır. Yükleme adımları 25, 50, 100, 200, 400, 800 kPa olarak belirlenmiştir. Deney sonucunda, zemin numunesinin şişme basıncı, oturma miktarı, e-logP eğri grafiği, hacimsel sıkışma katsayısı ve sıkışma indisi parametreleri tayin edilmiş olur.

### **3.2.9 Taramalı Elektron Mikroskop Analizi - SEM**

Taramalı elektron mikroskopundaki elementel analizler, elektron demetinin numune üzerindeki bombardımanı sırasında, numuneyi oluşturan elementlerden yayılan karakteristik X ışınlarının elektron mikroskobuna bağlı EDS (enerji saçınım spektrometresi) veya WDS (dalga boyu saçınım spektrometresi) dedektörleri ile algılanıp analiz edilmeleri yoluyla gerçekleştirilir. Bu sayede, morfolojik görüntü analizleri sırasında incelenen örnek üzerindeki bir noktanın, bir hattın veya belirli bir alanın elementel mikroanalizi yapılabilmekte, örnek üzerinde istenen bir alandaki elementlerin dağılım haritaları çıkarılabilmektedir.

Taramalı elektron mikroskopunda (SEM) yapılan görüntü analizleri, incelenen örneğin genel morfolojik özellikleri ile iç yapısını oluşturan bileşenlerinin yapısal ve dokusal özellikleri hakkında detaylı bilgiyi sağlarken, bu görüntü analizleriyle eş zamanlı olarak EDAX ve WDAX elementel analizleri de yapılabilmektedir.

Bu çalışmada, optimum su muhtevasında sıkıştırılmış kompaksiyon kalıbından alınan numuneler 2 mm en, 3 mm uzunluk ve 1 mm genişlik olacak biçimde dikdörtgen hale getirilip, 24 saat etüvde bekletilmişlerdir. Etüvden alınan numunelere, altın kaplama işlemi uygulandıktan sonra, taramalı elektron mikroskop cihazına yerleştirilip, analiz süreci başlatılarak, numunelerin 1000x, 10000x, 15000x ve 20000x boyutlarında görüntüleri alınmıştır.



(a)



(b)

Şekil 3.30 Analiz için hazırlanan numuneler (a), Taramalı Elektron Mikroskop Cihazı (b)



Şekil 3.31 Taramalı Elektron Mikroskopu Analiz Cihazı

### 3.2.10 X-ray Difraksiyon Analizi (XRD)

Şişen zeminlerin davranışlarını analiz etme aşamasında en önemli faktörlerden biri de kil minerolojisidir. Kil mineralleri çeşitli yöntemlerle belirlenebilir. Bu yöntemler arasında en yaygın olanları X-ray difraksiyon (XRD), diferansiyel termal analiz (DTA), tarayıcı elektron mikroskobu (SEM), kızılötesi spektroskopisi ve boya adsorpsiyonu olarak sıralayabiliriz.

X-ray difraksiyon analizi, optik mikroskop yöntemleri ile belirlenemeyecek kadar küçük dane boyutlarına sahip minerallerin, kristal yapı özelliklerine göre belirlenmesinde kullanılır. Bu analizde, incelenecek olan numuneler öğütülerek toz hale getirilir. Daha sonra toz haldeki numuneler, Ni filtreli Cu X-ışın tüplü cihazlar ile  $2^{\circ}$  -  $70^{\circ}$  arasında analiz edilip, elde edilen X-ışın difraktogramları ASTM standartlarına göre yorumlanmaktadır.

Deneysel çalışmada kullanılan kil, toz halde 24 saat etüvde bekletildikten sonra XRD analizi uygulanmıştır. Analiz sonucunda kilin minerolojik yapısı hakkında bilgi edinilmiştir.



Şekil 3.32 XRD Cihazı

### DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu çalışma kapsamında kil ve kurşun-çinko katkı malzemesi geoteknik özelliklerinin belirlenmesi için geoteknik laboratuvar deneyleri uygulanmıştır. Deneylerde kullanılan yüksek plastisiteli kil zemine, farklı oranlarda kurşun-çinko katkı malzemesi, sonrasında uçucu kül ve çimento malzemeleri ilave edilerek, zemin mukavemet ve şişme basıncı değerleri incelenmiştir. Deneysel çalışmada, kil zeminin dayanım özelliklerinin artırılması amacıyla öncelikle kurşun-çinko katkı malzemesi, ardından daha yüksek oranda mukavemet değerlerinin elde edilmesi için uçucu kül ve çimento kullanılmıştır. Karışım numunelerinde kullanılan katkı malzemelerinin seçilmesi ve hangi oranlarda harmanlanması gerektiğine, literatürden [5], [7], [10], [76], [77], [78] çalışmalarından elde edilen bilgiler ışığında karar verilmiştir.

#### 4.1 Pb-Zn katkılı kil numuneler

Deneysel çalışmada, kil zemine farklı oranlarda Pb-Zn katkı malzemesi ilave edilerek, optimum su muhtevasında sıkıştırılmış karışım numuneleri hazırlanmıştır. Deneysel çalışma süresince kullanılan kil, kurşun-çinko ve uçucu kül malzemeleri 105 C° sıcaklıktaki etüvde toz halde 24 saat bekletilerek kurutulmuşlardır.

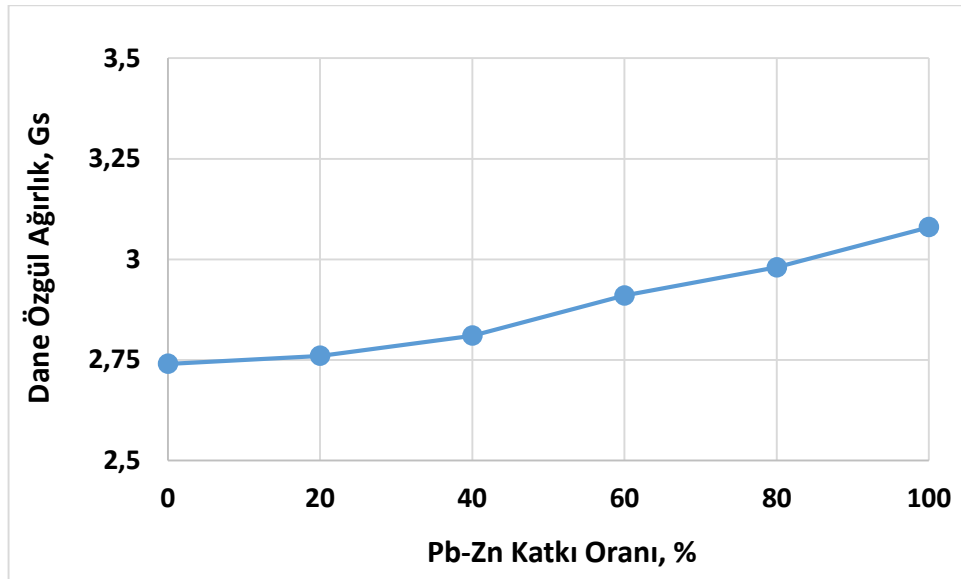
Bu karışım numunelerine özgül ağırlık, elek analizi, hidrometre, kıvam, kompaksiyon, serbest basınç, üç eksenli basınç, direkt kesme kutusu ve konsolidasyon deneyleri uygulanmıştır. Deneysel çalışmadaki numune grupları Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 Kil ve Pb-Zn karışım numuneleri

Numune Grupları	Malzeme Yüzdeleri, (%)	
	No	Kil
K <sub>100</sub>	100	0
K <sub>90</sub> + PZ <sub>10</sub>	90	10
K <sub>80</sub> + PZ <sub>20</sub>	80	20
K <sub>70</sub> + PZ <sub>30</sub>	70	30
K <sub>60</sub> + PZ <sub>40</sub>	60	40
K <sub>40</sub> + PZ <sub>60</sub>	40	60
K <sub>20</sub> + PZ <sub>80</sub>	20	80
PZ <sub>100</sub>	0	100

#### 4.1.1 Özgül Ağırlık Deney Sonuçları

DeneySEL çalışmada, kil zemin ve Pb-Zn katkı malzemesine piknometre deneyi uygulanarak özgül ağırlık değerleri bulunmuştur. Daha sonra Pb-Zn katkılı kil numunelere de aynı deney yapılmış ve her numune grubu için özgül ağırlık değerleri tayin edilmiştir. Piknometre deneyi sonuçlarına göre, kil zeminin özgül ağırlık değeri 2.74 ve kurşun-çinko katkı malzemesinin de 3.08 olarak bulunmuştur. Pb-Zn katkılı kil numunelerde, Pb-Zn katkı oranının artış göstermesi sonucu, özgül ağırlık değerlerinde de artış gözlenmiştir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 Dane Kuru Birim Hacim Ağırlık – Katkı Oranı Grafiği

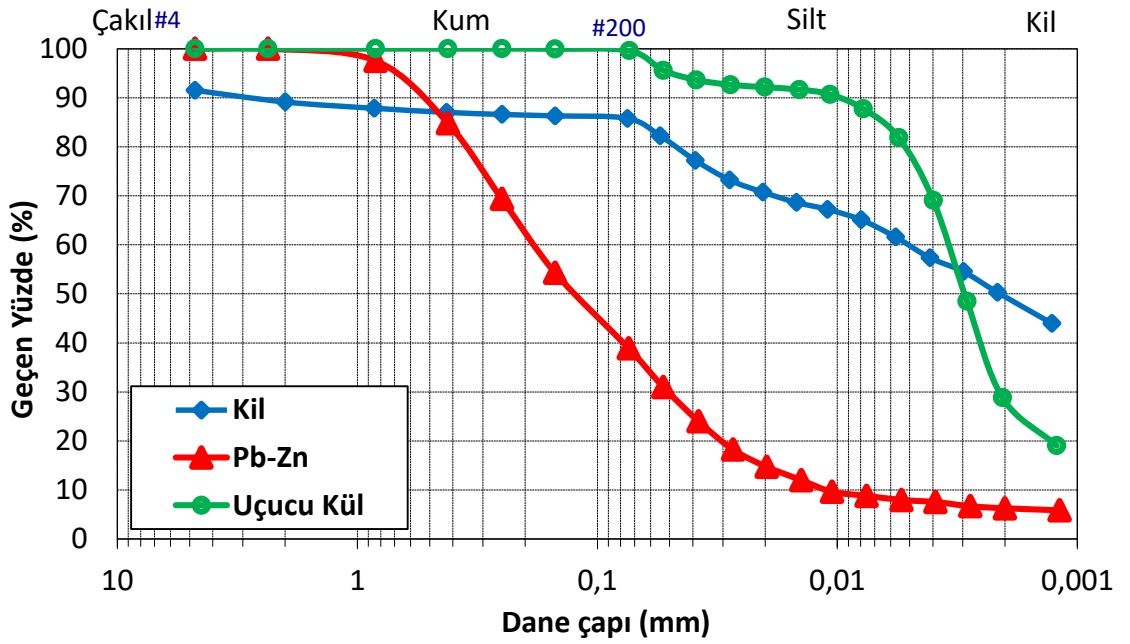
Deneysel çalışmada elde edilen özgül ağırlık deney sonuç verileri Çizelge 4.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2 Pb-Zn katkılı kil numunelerinin özgül ağırlık değerleri

Numune Grupları	Özgül Ağırlık, Gs
K100	2,74
K80 + PZ20	2,76
K60 + PZ40	2,81
K40 + PZ60	2,91
K20 + PZ80	2,98
PZ100	3,08

#### 4.1.2 Dane Çapı Dağılımı Deney Sonuçları

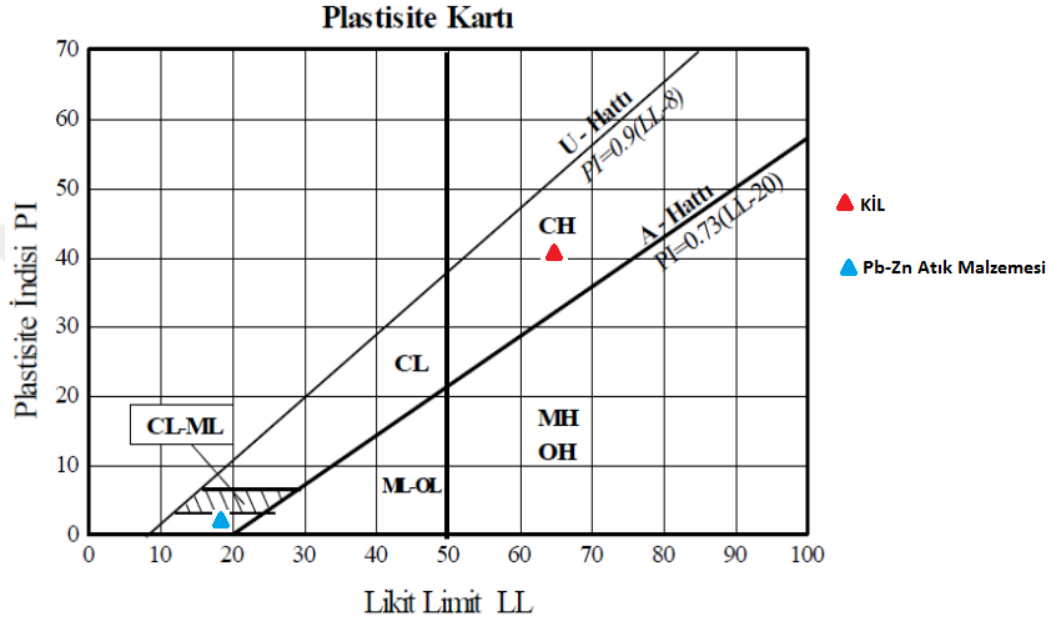
Deneysel çalışmada, kil, kurşun-çinko katkısı ve uçucu küle elek analizi ve hidrometre deneyi yapılarak, dane çapı dağılım eğrileri Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Hidrometre Eğrisi Kil

#### 4.1.3 Kıvam Limit DeneY Sonuçları

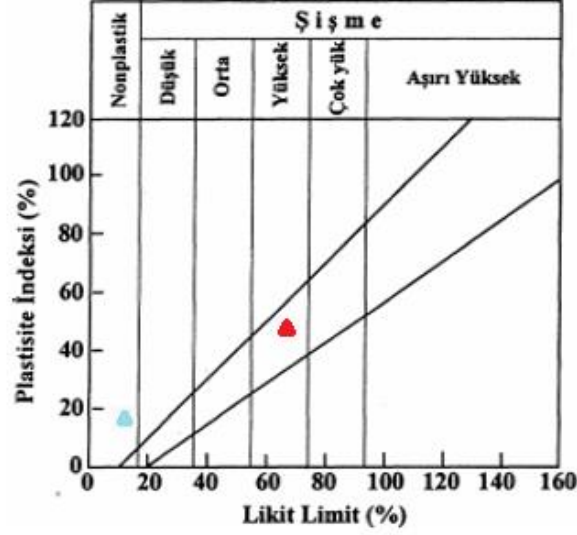
Kil zemin ve Pb-Zn katkı malzemesine kıvam deneyleri uygulanmıştır. DeneY sonucunda, kilin, plastisite kartındaki konumuna göre CH sınıfına sahip, yüksek plastisiteli kil olduğu sonucuna varılmıştır. Pb-Zn katkı malzemesinin de non-plastik malzeme olduğu tayin edilmiştir. Kil zemin ve Pb-Zn katkı malzemesinin plastisite kartındaki konumları şekil 4.3'te gösterilmiştir.



şekil 4.3 Pb-Zn katkılı kil numunelerinin, plastisite kartı üzerindeki gösterimi

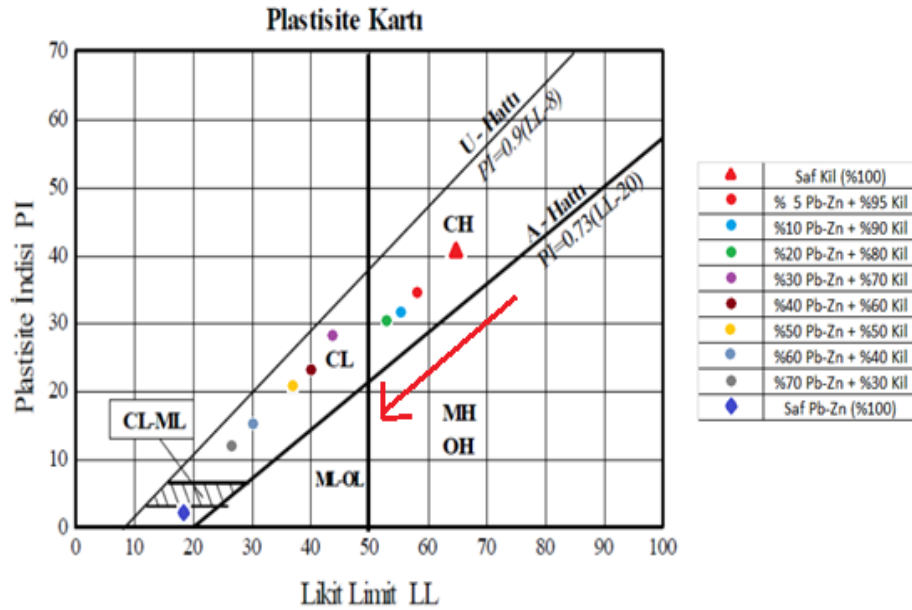
Kıvam deneyleri sonucunda elde edilen likit limit ve plastisite indisi değerlerine göre deneysel çalışmada kullanılan kilin yüksek şişme gösteren bir yapıda olduğu sonucuna varılmıştır. Kurşun-inko maden katkı malzemesinin de non-plastik yapıda, şişme davranışı göstermeyen bir malzeme olduğu gözlenmiştir (şekil 4.4).



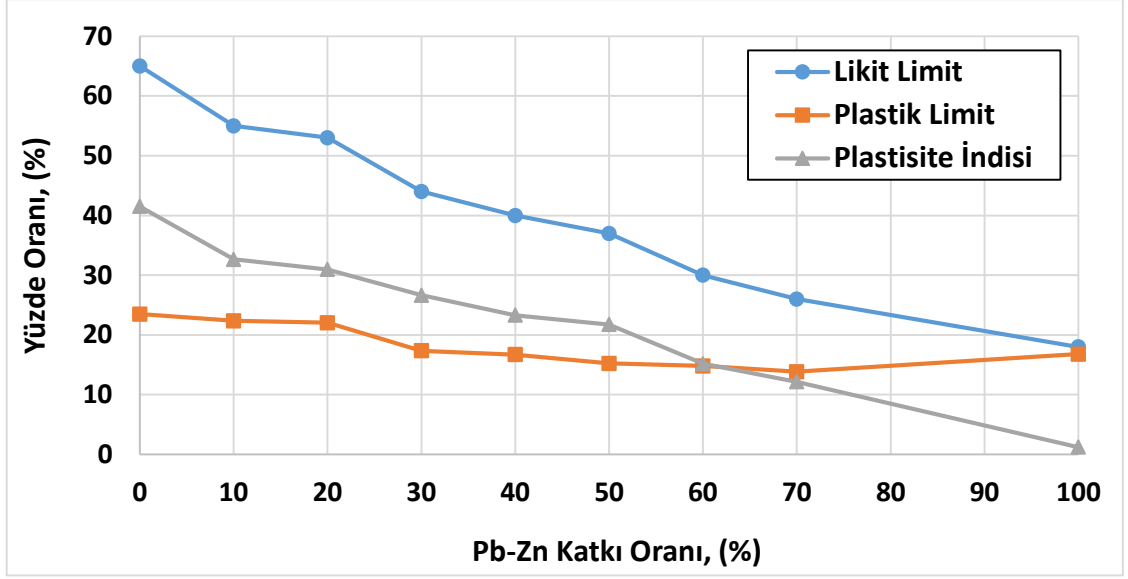


Şekil 4.4 Kil ve kurşun-çinko maden atık malzemesinin şişme değeri grafiği

Pb-Zn katkılı kil numunelere likit limit ve plastik limit deneyleri uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, Pb-Zn katkılı kil numunelerindeki Pb-Zn katkı oranının artışıyla, likit limit ve plastisite indisi değerleri düşüş göstermiştir. Pb-Zn katkı oranı arttıkça, CH sınıfındaki katkısız kil, düşük plastisiteli CL sınıfına yaklaşmıştır (Şekil 4.5). Literatürde, Alpyürür ve Şenol [17]' un yüksek plastisiteli bir kil zeminin atık gazbeton ile stabilizasyonu konusundaki deneysel çalışma sonucunda elde ettikleri kıvam değerleri, bu tez çalışmasındaki kıvam deney sonuç verileri ile benzerlik göstermektedir.



Şekil 4.5 Pb-Zn katkılı kil numunelerinin plastisite kartındaki gösterimi



Şekil 4.6 Pb-Zn katkılı kil numunelerin kıvam limit değerleri

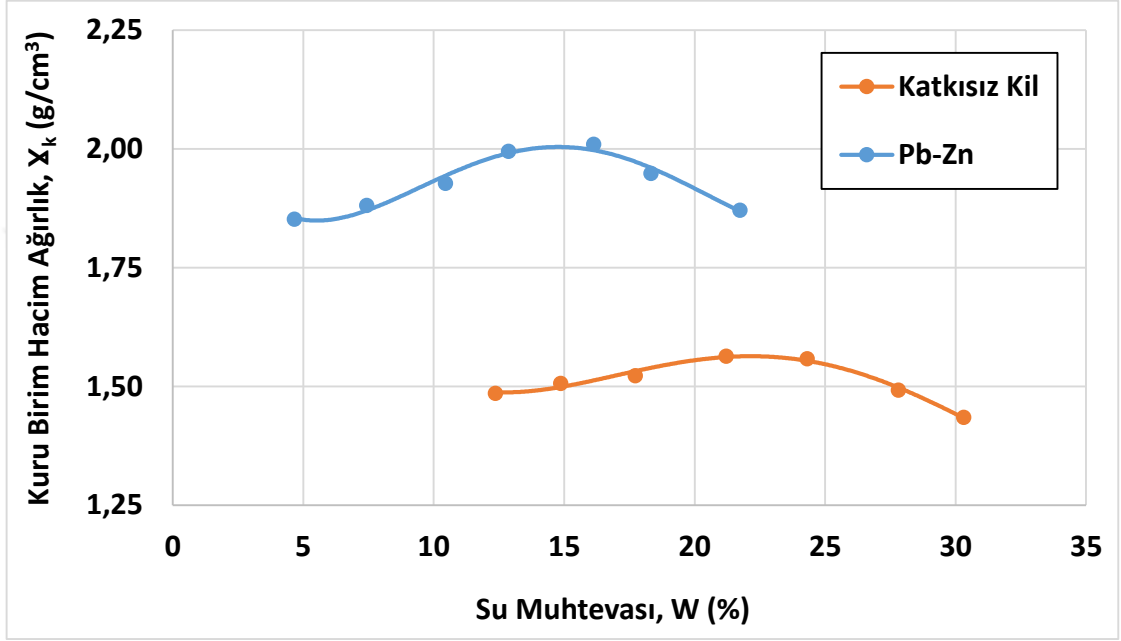
Karışım numunelerindeki Pb-Zn katkı oranının artışıyla, kıvam limit değerlerindeki değişim Şekil 4.6'da ve elde edilen deney sonuç verileri de Çizelge 4.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.3 Kil ve Pb-Zn karışım numunelerinin kıvam limit değerleri

Numune Grupları	Malzemeler (%)		Likit Limit	Plastik Limit	Plastisite İndisi
	Kil	Pb-Zn			
No			%	%	%
K <sub>100</sub>	100	0	65	24	41
K <sub>90</sub> + PZ <sub>10</sub>	90	10	55	22	33
K <sub>80</sub> + PZ <sub>20</sub>	80	20	53	21	32
K <sub>70</sub> + PZ <sub>30</sub>	70	30	44	17	27
K <sub>60</sub> + PZ <sub>40</sub>	60	40	40	16	24
K <sub>50</sub> + PZ <sub>50</sub>	50	50	37	15	22
K <sub>40</sub> + PZ <sub>60</sub>	40	60	30	14	16
K <sub>30</sub> + PZ <sub>70</sub>	30	70	26	13	13
PZ <sub>100</sub>	0	100	18	17	1

#### 4.1.4 Kompaksiyon Deneyleri

Araştırma kapsamında, öncelikle çalışmada kullanılan katkısız kil ve doğal Pb-Zn katkı malzemesi kompaksiyon deneyi uygulanarak, optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri bulunmuştur. Yapılan deneyler sonucunda kil ve Pb-Zn katkı malzemesinin optimum su muhtevası değerleri %21 ve %12; maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri de  $1.55 \text{ g/cm}^3$  ve  $2.01 \text{ g/cm}^3$  olarak bulunmuştur (Şekil 4.7).



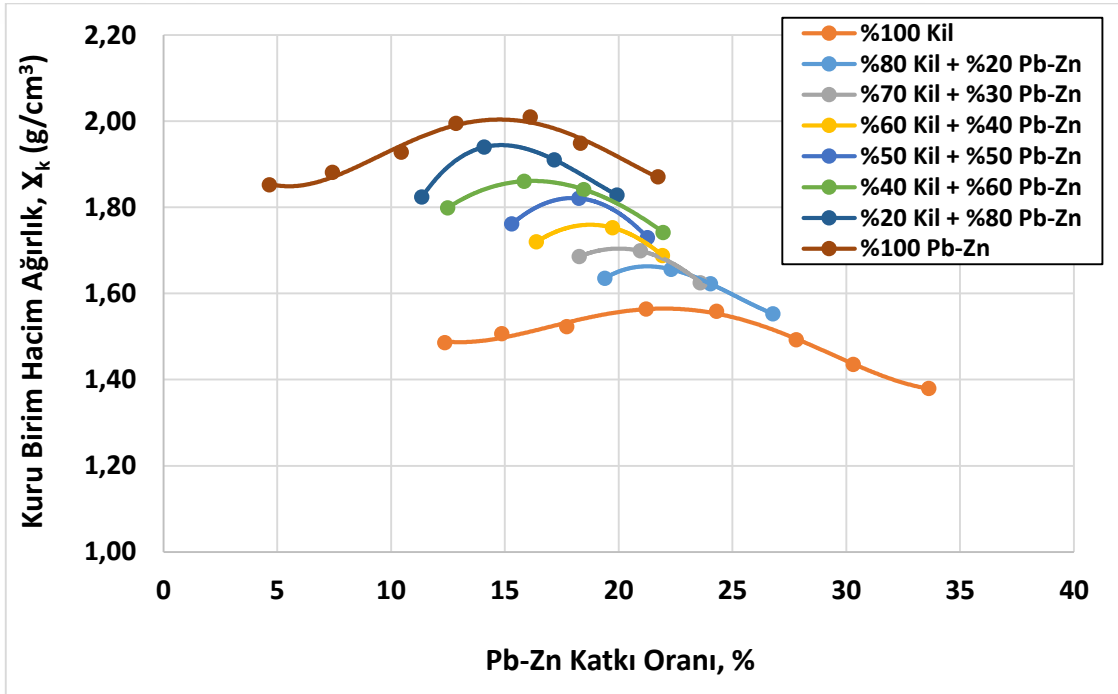
Şekil 4.7 Kil, Pb-Zn ve uçucu kül malzemelerinin kuru birim hacim ağırlık – optimum su muhtevası grafiği

Standart Proktor kompaksiyon deneyi sonucunda, elde edilen deney sonuç verileri Çizelge 4.4'te gösterilmiştir.

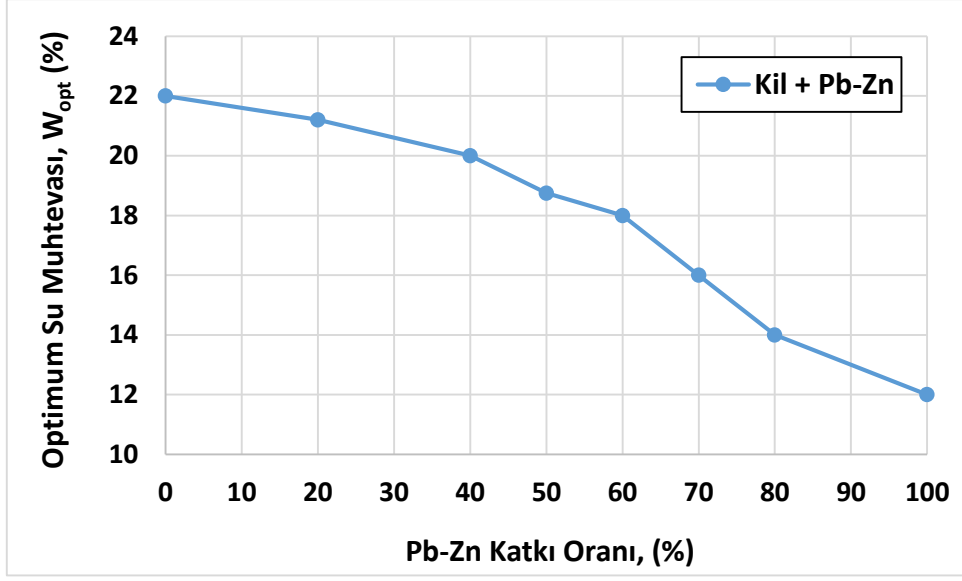
Çizelge 4.4 Kil, Pb-Zn ve Uçucu Kül malzemelerinin standart proktor kompaksiyon deneyi sonucu elde edilen veriler

Malzemeler	Optimum Su Muhtevası (%)	Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık $\text{g/cm}^3$
-		
Kil	21	1,55
Pb-Zn	12	2,01

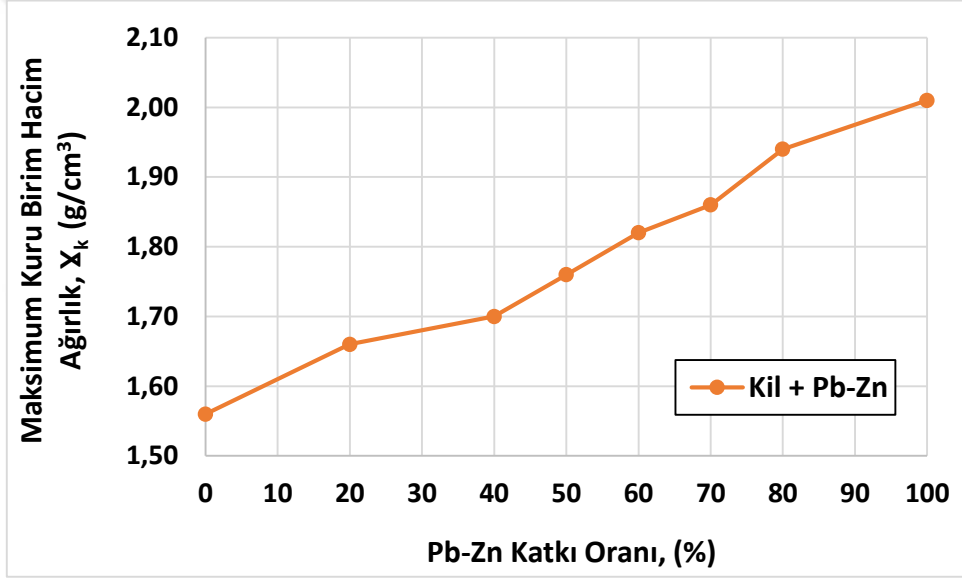
Farklı oranlarda kurşun-çinko katkı malzemesi ile harmanlanan katkı kil numune gruplarına da kompaksiyon deneyleri uygulanarak, her numune grubu için optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri bulunmuştur. Kompaksiyon deneyleri sonucunda, numune gruplarındaki Pb-Zn katkı oranının artış göstermesiyle, optimum su muhtevası değerlerinde azalma, maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinde de artış gözlenmiştir (Şekil 4.8, Şekil 4.9). Literatürde, Görgün ve Ural [7]'in çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre, karışım numunelerinde katkı oranının artış göstermesiyle, genellikle maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinde artış, optimum su muhtevası değerlerinde ise düşüş gözlenmesi, bu tez çalışmasında elde edilen sonuçları destekler niteliktedir.



Şekil 4.8 Pb-Zn katkıli kil zemin numunelerinin maksimum kuru birim hacim ağırlık-optimum su muhtevası grafikleri



(a)



(b)

Şekil 4.9 Pb-Zn katkılı kil numunelerin optimum su muhtevası (a), maksimum kuru birim hacim ağırlık (b) – Pb-Zn katkı oranı grafikleri

Pb-Zn katkılı kil numune gruplarına uygulanan kompaksiyon deneyi sonucunda elde edilen optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri Çizelge 4.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.5 Kil-Pb-Zn karışım numunelerinin optimum su muhteva – maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri

Numune Grupları	Optimum Su Muhtevası, $W_{opt}$ (%)	Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık, $\gamma_k$ (g/cm <sup>3</sup> )
K <sub>100</sub>	21,00	1,55
K <sub>20</sub> + PZ <sub>80</sub>	21,20	1,66
K <sub>40</sub> + PZ <sub>60</sub>	20,00	1,70
K <sub>50</sub> + PZ <sub>50</sub>	18,75	1,76
K <sub>60</sub> + PZ <sub>40</sub>	18,00	1,82
K <sub>70</sub> + PZ <sub>30</sub>	16,00	1,86
K <sub>80</sub> + PZ <sub>20</sub>	14,00	1,94
PZ <sub>100</sub>	12,00	2,01

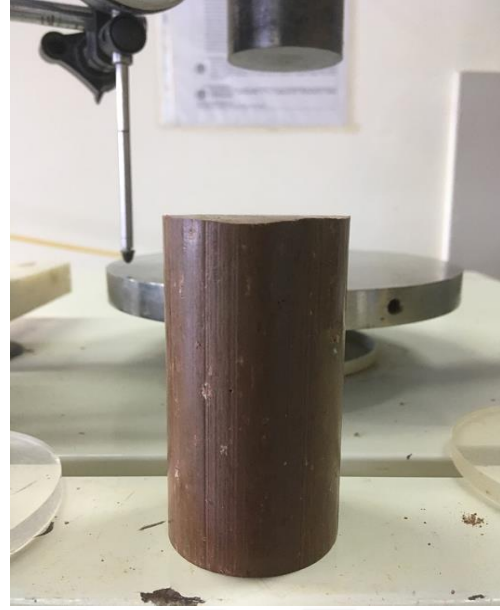
#### 4.1.5 Mukavemet Deneyleri için Karışım Numunelerinin Hazırlanması

DeneySEL çalışmalarında, optimum su muhtevasında sıkıştırılmış kompaksiyon kalıbından, her deney çalışması için 3 adet numune alınmıştır. Serbest basınç ve üç eksenli basınç deneylerinde, kompaksiyon kalıbına 3 metal silindir numune çıkarıcı batırılarak, çapı 38.5 mm ve yüksekliği 77 mm olacak şekilde silindirik numuneler elde edilmiştir (Şekil 4.10). Kesme kutusu deneyinde de, 60x60x20 mm ölçülerindeki kare metal ring, optimum su muhtevasında sıkıştırılmış kompaksiyon kalıbına batırılarak 3 adet numune alınmıştır. Konsolidasyon deneyinde ise 20 mm yükseklik, 60 mm çap uzunluğuna sahip silindirik ring, aynı şekilde optimum su muhtevasında sıkıştırılmış kompaksiyon kalıbına batırılarak, numune alma işlemleri tamamlanmıştır (Şekil 4.11).

Bütün numuneler, yapılacak deneyler öncesi, 24 saat süresince cam desikatörlerde muhafaza edilmişlerdir. Deney sonunda, karışım numunelerinden yeterli miktar malzeme alınarak, numunenin deney sırasında sahip olduğu su muhtevasının, numunenin optimum su muhtevası değeri ile karşılaştırılması yapılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 4.10 Metal Numune Alıcılar (a) ve Silindirik Numune (b)



(c)



(d)

Şekil 4.11 Kesme kutusu ringi (c) ve konsolidasyon ringi (d)



(e)



(f)

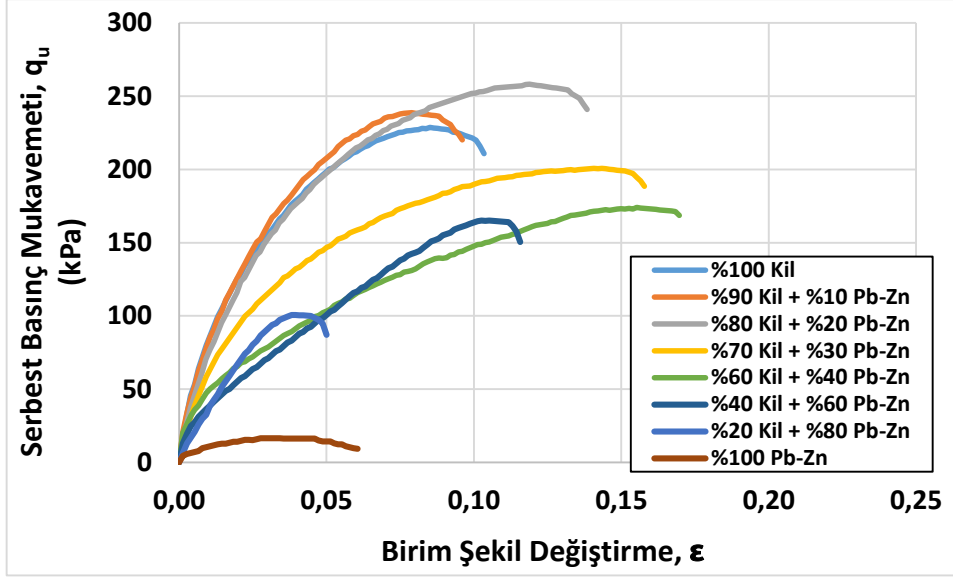
Şekil 4.12 Cam desikatör (e) ve etüv (f)

#### 4.1.6 Serbest Basınç Deneyi Sonuçları

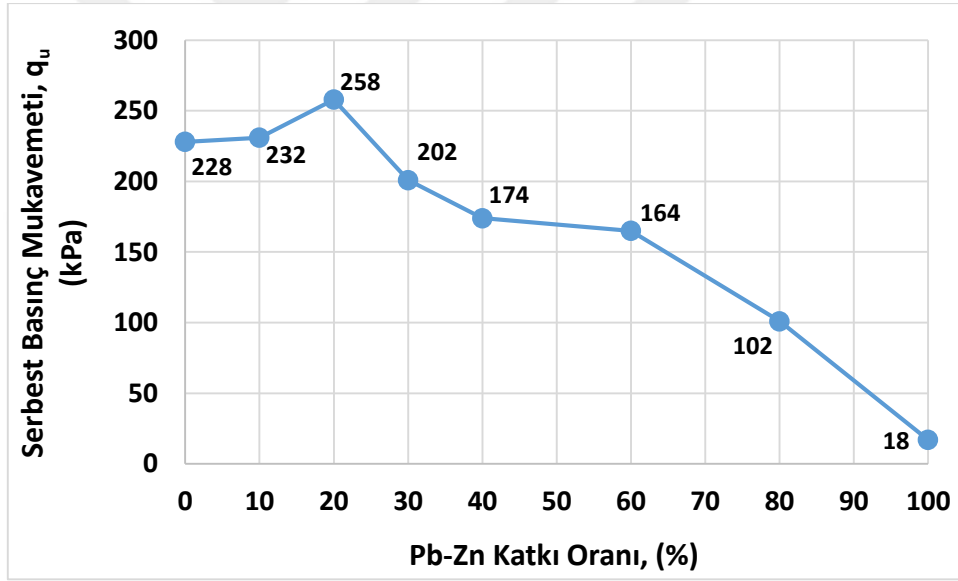
Bu çalışmada, optimum su muhtevasında kompakte edilmiş kompaksiyon silindirik kalıbindan alınan silindirik numunelere serbest basınç deneyi uygulanmıştır.

Serbest basınç deneyleri sonucunda, %20 oranında Pb-Zn katkılı karışım numunesinin, serbest basınç mukavemet değeri 258 kPa olarak saptanmış olup, 228 kPa serbest basınç mukavemet değerine sahip katkısız kil numunesine göre iyileşmenin %13 oranında arttığı gözlenmiştir. %20 katkı oranından daha yüksek oranda Pb-Zn içeren karışım numunelerinde ise serbest basınç mukavemet değeri giderek düşüş göstermiştir (Şekil 4.13, Şekil 4.14). Literatürde, Phanikunar ve Sharma [6]'nın çalışmasındaki serbest basınç mukavemeti – katkı oranı ilişkisi, bu tez çalışmasında ortaya çıkan serbest basınç mukavemeti - Pb-Zn katkı oranı ilişkisi ile benzerlik göstermektedir.





Şekil 4.13 Pb-Zn katkılı kil numunelerinin serbest basınç mukavemet



Şekil 4.14 Pb-Zn katkılı kil numunelerinin serbest basınç mukavemet – katkı oranı grafiği



Şekil 4.15 Serbest basınç deney cihazı ve deney sonrası zemin numuneleri

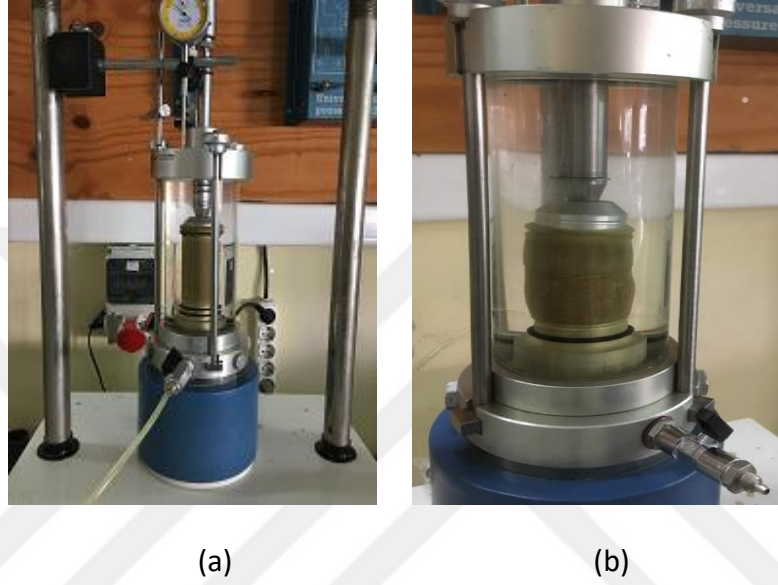
Elde edilen serbest basınç mukavemet deney sonuç verileri Çizelge 4.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.6 Pb-Zn katkılı kil numunelerinin serbest basınç mukavemet değerleri

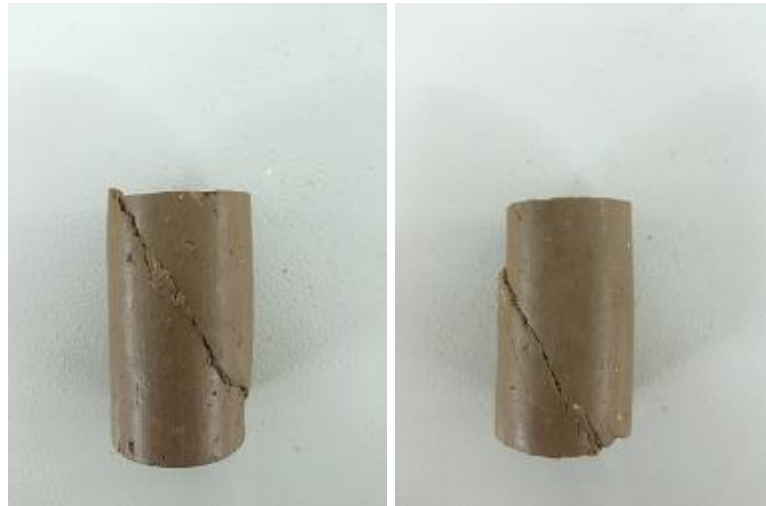
Numune Grupları	Malzemeler, (%)		Serbest Basınç Mukavemeti, $q_u$ (kPa)	Drenajsız Kayma Mukavemeti, $c_u$ (kPa)
	Kil	Pb-Zn		
No				
K <sub>100</sub>	100	0	228	114
K <sub>90</sub> + PZ <sub>10</sub>	90	10	232	116
K <sub>80</sub> + PZ <sub>20</sub>	80	20	258	129
K <sub>70</sub> + PZ <sub>30</sub>	70	30	202	101
K <sub>60</sub> + PZ <sub>40</sub>	60	40	174	87
K <sub>40</sub> + PZ <sub>60</sub>	40	60	164	82
K <sub>20</sub> + PZ <sub>80</sub>	20	80	102	51
PZ <sub>100</sub>	0	100	18	9

#### 4.1.7 Üç Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları

Üç eksenli basınç deneyinde, serbest basınç deneyindeki gibi optimum su muhtevasında hazırlanmış üç adet silindirik numuneye, konsolidasyonsuz-drenajsız (UU) deneyleri uygulanmıştır. Deney sırasında, numunelere sırasıyla 50 kPa, 100 kPa ve 200 kPa çevre basıncı verilmiş olup, deney sonucunda karışım numunelerinin kohezyon ve kayma mukavemeti açılı değerleri elde edilmiştir.



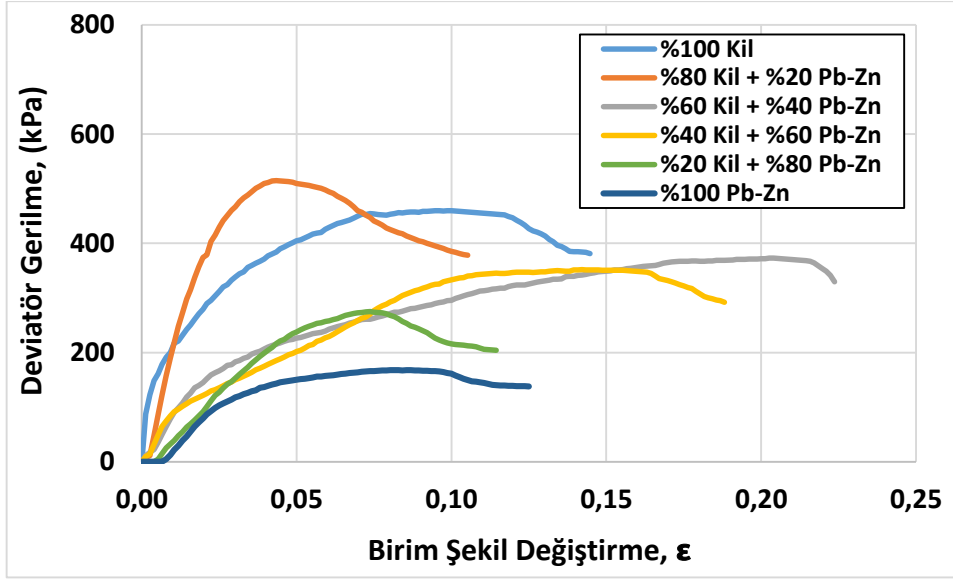
Şekil 4.16 Deney öncesi (a) ve deney sonrasındaki (b) numunenin üç eksenli basınç deney düzeneğinin içindeki görünümü



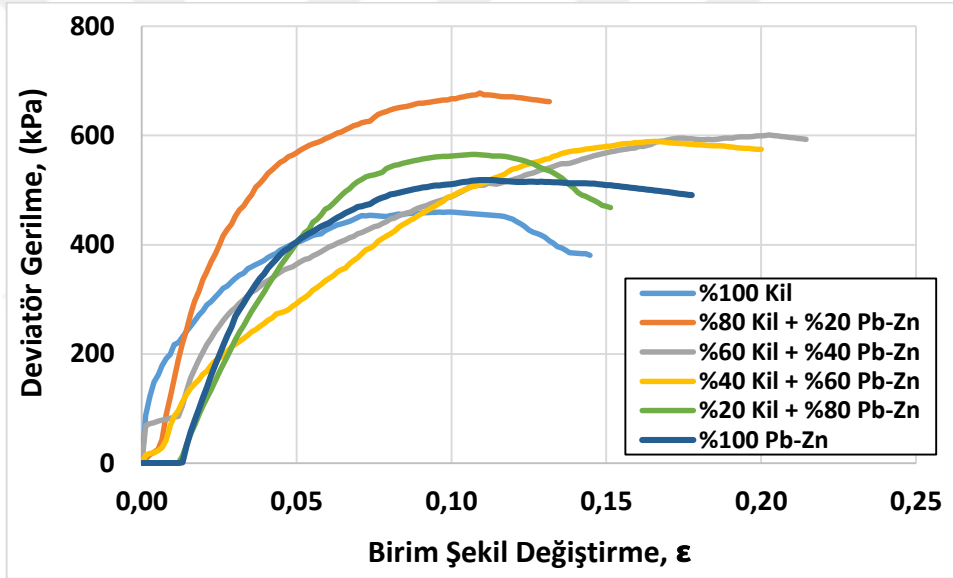
Şekil 4.17 Üç eksenli basınç deneyi sonrasındaki zemin numunelerinin görünümü ve kırılma açıları

Katkısız kil numunesinde elde edilen kohezyon değeri 131 kPa, %20 oranında Pb-Zn katkılı kil numunesindeki kohezyon değeri de 157 kPa olarak bulunarak, katkısız kile göre %20 oranında kohezyon artışı meydana gelmiştir. %20 oranından yüksek miktarda Pb-Zn katkısı içeren kil numunelerinde kohezyon değeri düşüş göstermiştir. Elde edilen kohezyon değerleri serbest basınç deneyinde elde edilen drenajsız kayma mukavemeti değerleriyle benzerlik göstermektedir. %20 oranından yüksek miktarda Pb-Zn katkısı içeren kil numunelerinde kohezyon değeri düşüş göstermiştir. Karışım numunelerindeki Pb-Zn katkı oranının artışıyla, kayma mukavemeti açısı değerlerinde de artış gözlenmiştir. Üç eksenli basınç deneyi sonuçlarına göre, en yüksek oranda kohezyon değerine %20 oranında Pb-Zn katkılı kil numunesinde ulaşılmıştır (Şekil 4.19).

Literatür araştırmasına göre Batman [22]'in çalışmasındaki kohezyon ve kayma mukavemeti açısı – katkı oranı ilişkisi, bu tez çalışmasında ortaya çıkan kohezyon ve kayma mukavemeti açısı - Pb-Zn katkı oranı ilişkisi ile benzerlik göstermektedir.

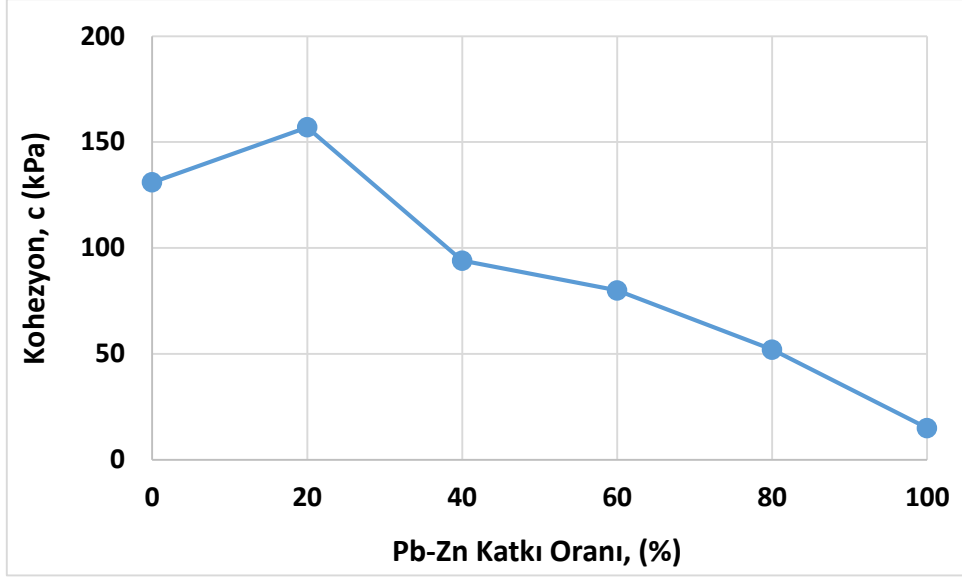


(a)

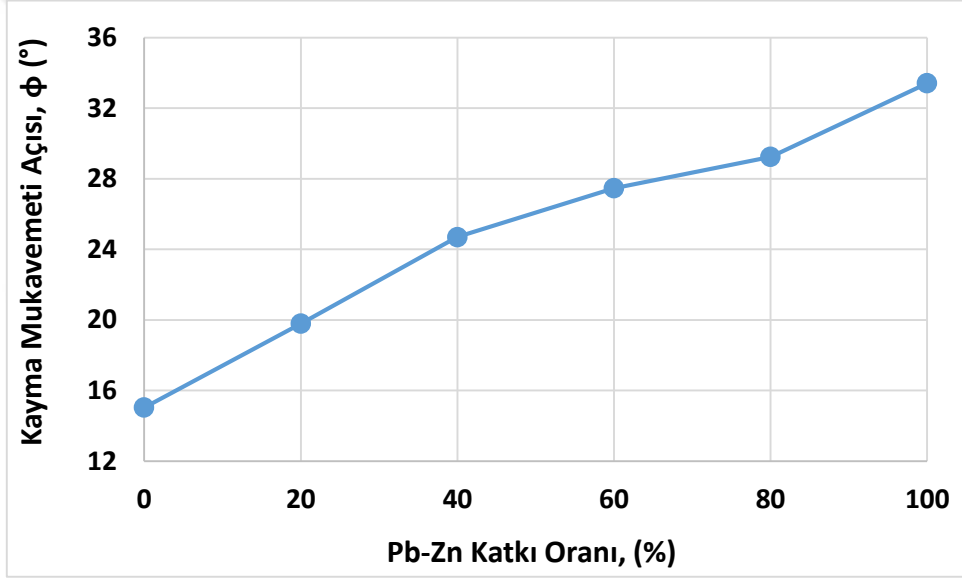


(b)

Şekil 4.18 Pb-Zn katkıli kil numunelerin 50 kPa (a) ve 200 kPa (b) çevre basıncı altındaki deviator gerilme - şekil değıştirme grafikleri



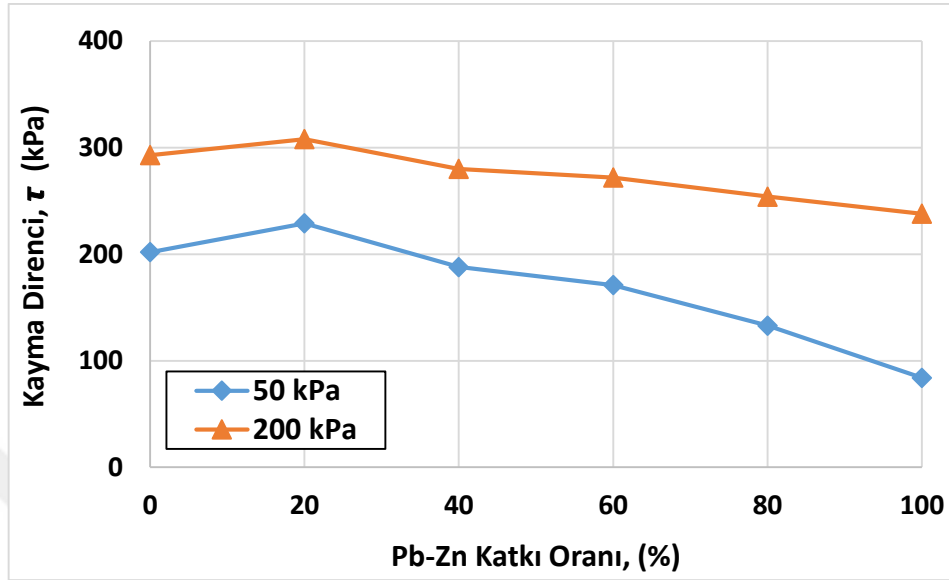
(a)



(b)

Şekil 4.19 Pb-Zn katkılı kil numunelerin kohezyon (a) ve kayma mukavemeti açısı (b) – Pb-Zn katkı oranı grafiği

50 kPa ve 200 kPa çevre basıncı etkisindeki %20 oranında Pb-Zn katkılı kil numunelerinin kayma direnci değerleri, katkısız kile göre %13 ve %5 oranlarında artış gözlenmiştir (Şekil 4.20)



Şekil 4.20 Pb-Zn katkılı kil numunelerin 50 kPa ve 200 kPa çevre basıncı etkisindeki kayma direnci grafikleri

Üç eksenli basınç deneyleri sonucunda elde edilen deviator gerilme, kohezyon, kayma mukavemeti açısı ve kayma direnci değerleri Çizelge 4.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.7 Pb-Zn katkılı kil numunelerinin üç eksenli basınç deneyi sonucunda elde edilen deney sonuç verileri

Numune Grupları	Deviator Gerilme, $\sigma_1-\sigma_3$		Kohezyon, c kPa	Kayma Mukavemeti Açısı, $\phi$ °	Kayma Direnci, $\tau$	
	50 kPa	200 kPa			50 kPa	200 kPa
No						
K <sub>100</sub>	470	650	131	15	202	293
PZ <sub>20</sub> + K <sub>80</sub>	514	678	157	20	229	308
PZ <sub>40</sub> + K <sub>60</sub>	373	601	94	25	188	280
PZ <sub>60</sub> + K <sub>40</sub>	351	590	80	27	171	272
PZ <sub>80</sub> + K <sub>20</sub>	275	565	52	29	133	254
PZ <sub>100</sub>	168	520	15	33	84	238

#### 4.1.8 Direkt Kesme Kutusu Deneyi Sonuçları

Kesme kutusu deneyinde, kile farklı oranlarda ilave edilen Pb-Zn katkı malzemesi ile oluşturulan karışım numunelerine 50 kPa, 100 kPa ve 200 kPa değerlerinde yük uygulanarak direkt kesme kutusu deneyi uygulanmıştır. Karışım numunelerinin deney sonrasındaki görünüşleri Şekil 4.21’de gösterilmiştir.



**%100 Kil**



**%80 Kil + %20 Pb-Zn**



**%60 Kil + %40 Pb-Zn**



**%40 Kil + %60 Pb-Zn**



**%80 Kil + %20 Pb-Zn**

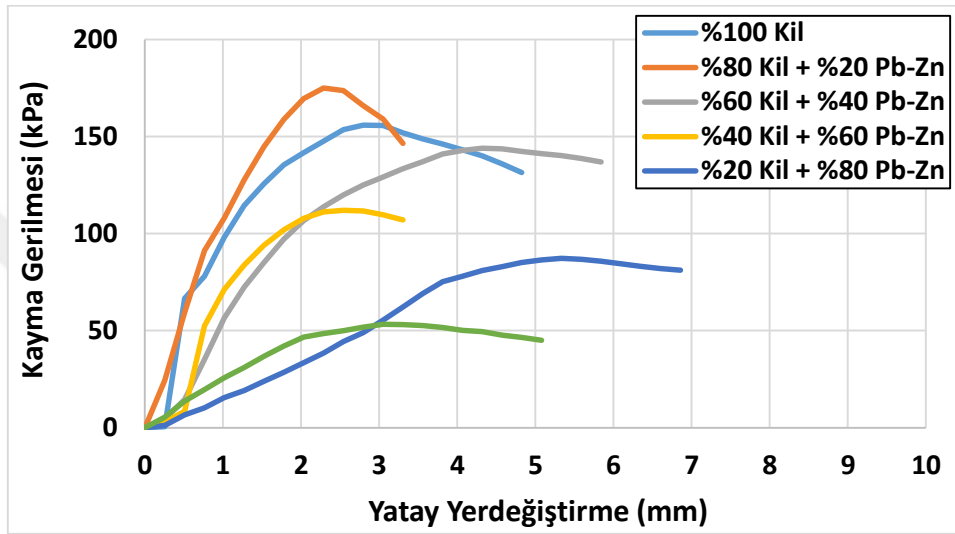


**%100 Pb-Zn**

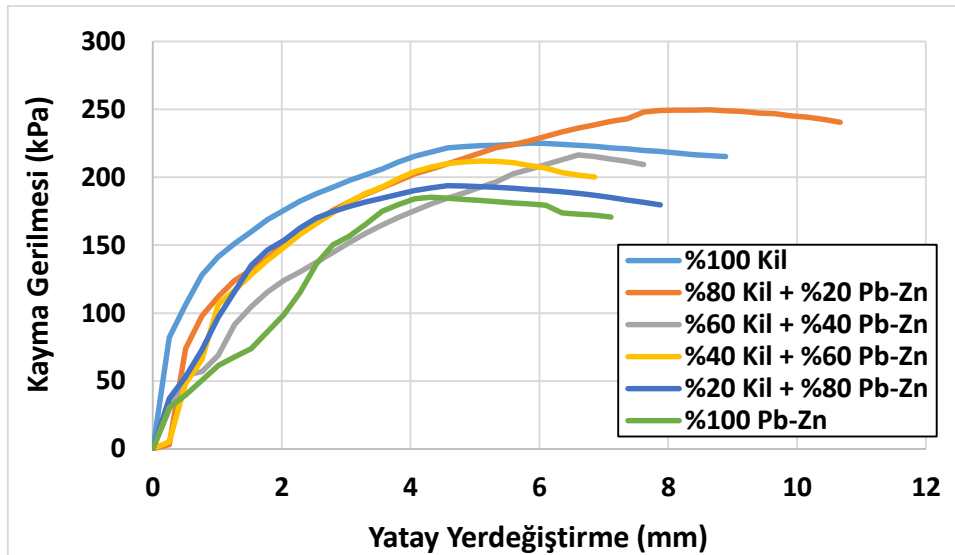
Şekil 4.21 Direkt kesme kutusu deneyi sonrasındaki zemin numunelerinin görünümü



Direkt kesme kutusu deneyi sonuçlarına göre, %20 oranında Pb-Zn katkı malzemesi içeren karışım numunesinin, katkısız kil zemin numunesine göre kohezyon değerinde %14 oranında artış gözlenmiş ve %20 oranından yüksek miktarda Pb-Zn içeren katkılı kil numunelerinin kohezyon değerlerinde düşüş meydana gelmiştir. Karışım numunelerindeki Pb-Zn katkı oranının artışıyla, kayma mukavemeti açısı değerlerinde de artış gözlenmiştir (Şekil 4.23). Bu durum, Mahmoudi ve Altun [21]'un deneysel çalışmasındaki sonuçlarla benzerlik göstermektedir.

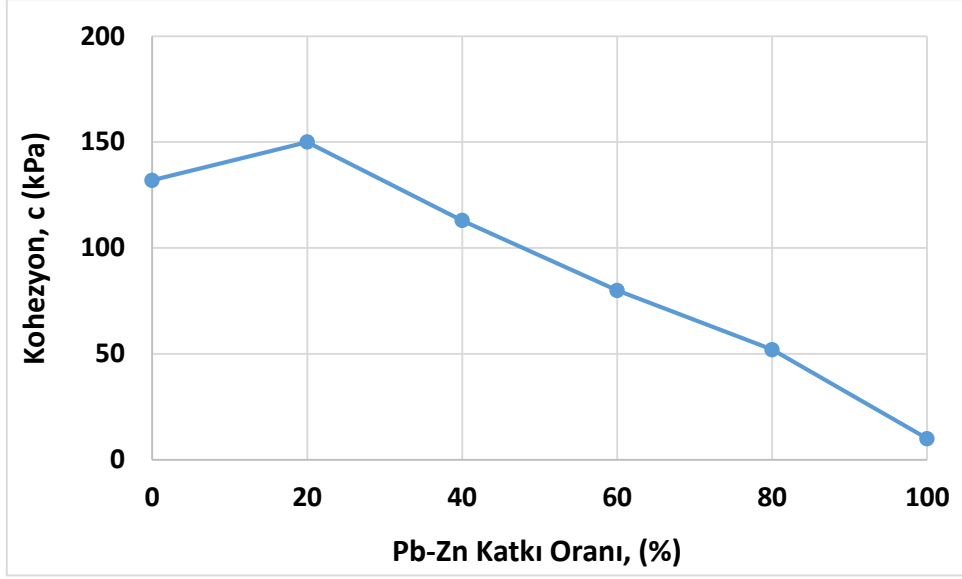


(a)

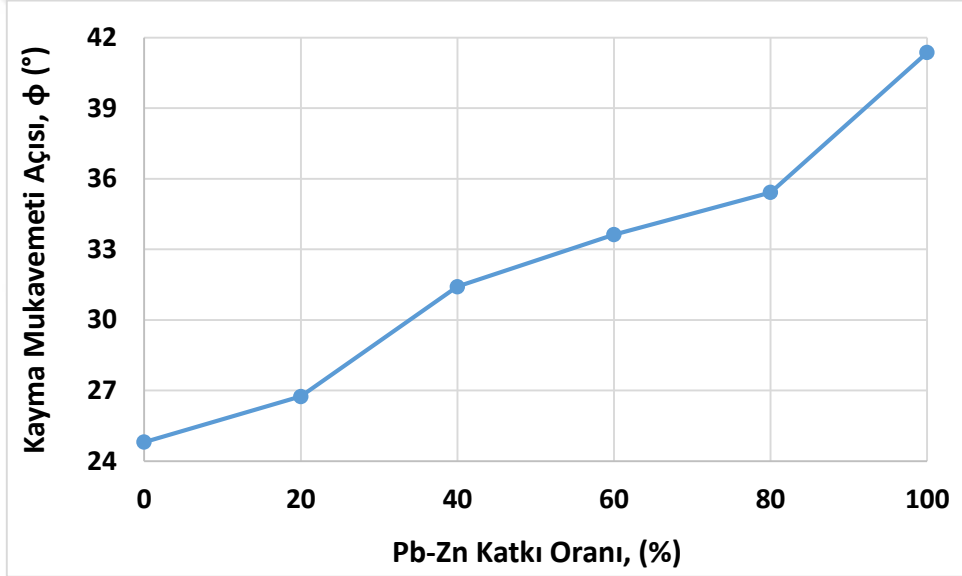


(b)

Şekil 4.22 Pb-Zn katkılı kil numunelerin 50 kPa ve 200 kPa yatay yük etkisi altındaki kayma gerilmesi – yatay deformasyon grafiği



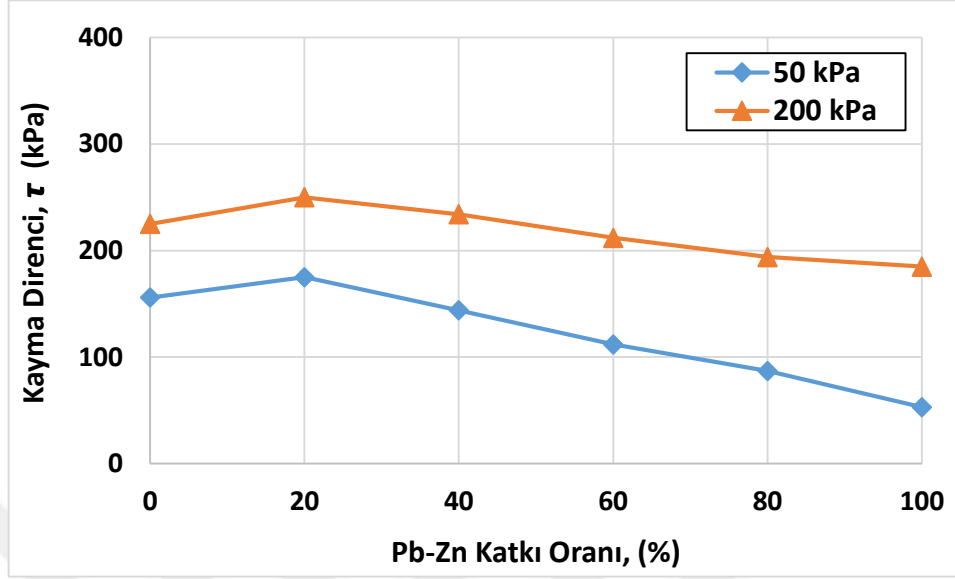
(a)



(b)

Şekil 4.23 Pb-Zn katkılı kil numunelerin kohezyon (a) ve kayma mukavemeti açısı (b) – Pb-Zn katkı oranı grafiği

50 kPa ve 200 kPa basınç altındaki kayma direnci değerlerinde ise katkısız kile göre %11 ve %10 oranlarında artış gözlenmiştir (Şekil 4.24).



Şekil 4.24 Pb-Zn katkılı kil numunelerin 50 kPa ve 200 kPa basınç etkisindeki kayma direnci grafikleri

Direkt kesme kutusu deneyi sonuçlarına göre, en yüksek oranda kohezyon ve kayma direnci değerine %20 oranında Pb-Zn katkılı kil numunesinde ulaşılmıştır. Direkt kesme kutusu deneyi sonucunda elde edilen kohezyon değerleri, serbest basınç ve üç eksenli basınç deneylerinde elde edilen kohezyon değerleri ile benzerlik göstermektedir.

Direkt kesme kutusu deneyinde elde edilen deney sonuç verileri Çizelge 4.8'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.8 Pb-Zn katkılı kil numunelerinin kesme kutusu deneyi sonucunda elde edilen kayma direnci, kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri

Numune Grupları	Kayma Direnci, $\tau$		Kohezyon, c kPa	Kayma Mukavemeti Açısı, $\phi$ °
	50 kPa	200 kPa		
No				
K <sub>100</sub>	156	225	132	25
K <sub>80</sub> + PZ <sub>20</sub>	175	250	150	27
K <sub>60</sub> + PZ <sub>40</sub>	144	234	113	31
K <sub>40</sub> + PZ <sub>60</sub>	112	212	80	34
K <sub>20</sub> + PZ <sub>80</sub>	87	194	52	35
PZ <sub>100</sub>	53	185	10	41

Kayma mukavemeti deneyleri sonucunda, en yüksek mukavemet değerine %20 oranında Pb-Zn katkıli kil numunesinde ulaşılmış olup, katkısız kile göre serbest basınç mukavemet değerinde %13 oranında iyileşme gözlenmiştir. %20 oranından yüksek değerlerde Pb-Zn katkısının ilave edilmesi durumunda, mukavemet değeri düşüş göstermiştir.

#### 4.2 Uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkıli kil numuneleri

%20 oranında Pb-Zn içeren katkıli kil numunesinin, katkısız kile göre mukavemet artışının %13 oranında olduğu daha önceki deneylerde tayin edilmiştir. Ancak bu orandaki zemin iyileşmesi yeterli görülmediği için, Pb-Zn katkıli kil numunelerinin daha fazla dayanım göstermesi ve yüksek oranda Pb-Zn katkı malzemesinin doğadan bertaraf edilmesi amacıyla %20, %30, %40, %60 ve %80 oranlarında Pb-Zn katkısı içeren kil numunelerine %5, %10 ve %20 oranında uçucu kül ilave edilerek, hem kilin hem de Pb-Zn katkı malzemesinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

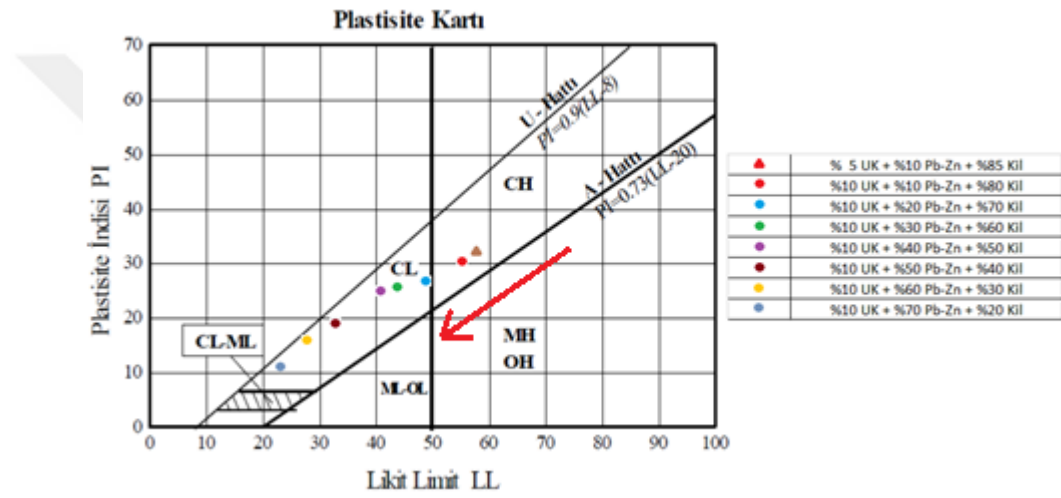
Deneyisel çalışmada, farklı oranlarda uçucu kül ve Pb-Zn katkı malzemesi içeren numune grupları Çizelge 4.9’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.9 Uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkıli kil numuneleri

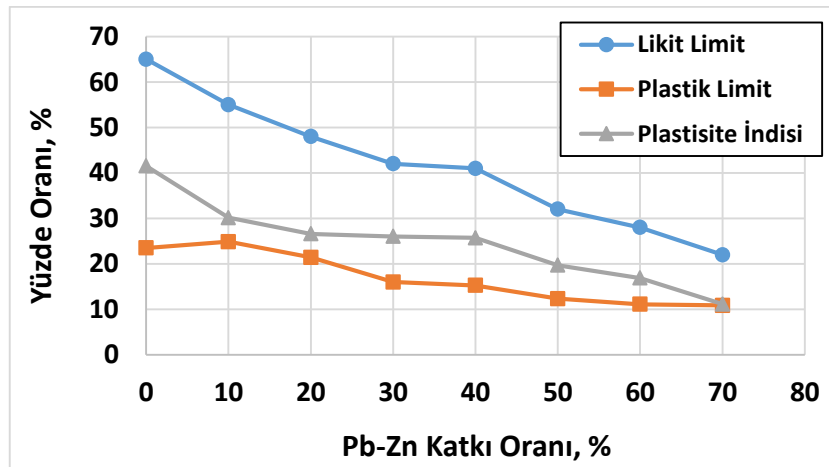
Numune Grupları No	Malzemeler (%)		
	Kil	Pb-Zn	Uçucu Kül
K75 + PZ20 + U5	75	20	5
K55 + PZ40 + U5	55	40	5
K35 + PZ60 + U5	35	60	5
K15 + PZ80 + U5	15	80	5
K70 + PZ20 + U10	70	20	10
K60 + PZ30 + U10	60	30	10
K50 + PZ40 + U10	50	40	10
K30 + PZ60 + U10	30	60	10
K60 + PZ20 + U20	60	20	20
K40 + PZ40 + U20	40	40	20

#### 4.2.1 Kıvam Limit DeneY Sonuçları

Pb-Zn katkılı kil numunelerine, %10 oranında uçucu kül ilave edilerek, kıvam deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerde, karışım numunelerindeki Pb-Zn katkı oranı artırılarak, katkının kıvam limit değerlerine olan etkisi incelenmiştir. Kıvam deneyleri sonucununa göre % 10 oranında uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinde, Pb-Zn katkı oranının artış göstermesiyle likit limit, plastik limit ve plastisite indisi değerlerinde düşüş gözlenmiştir. Pb-Zn katkı oranı arttıkça, yüksek plastisiteli CH sınıfındaki karışım numunesi, düşük plastisiteki CL sınıfına doğru yönelim göstermiştir (Şekil 4.25, Şekil 4.26).



Şekil 4.25 %10 oranında uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin plastisite kartındaki gösterimi



Şekil 4.26 %10 oranında uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin kıvam limit değişim grafiğı

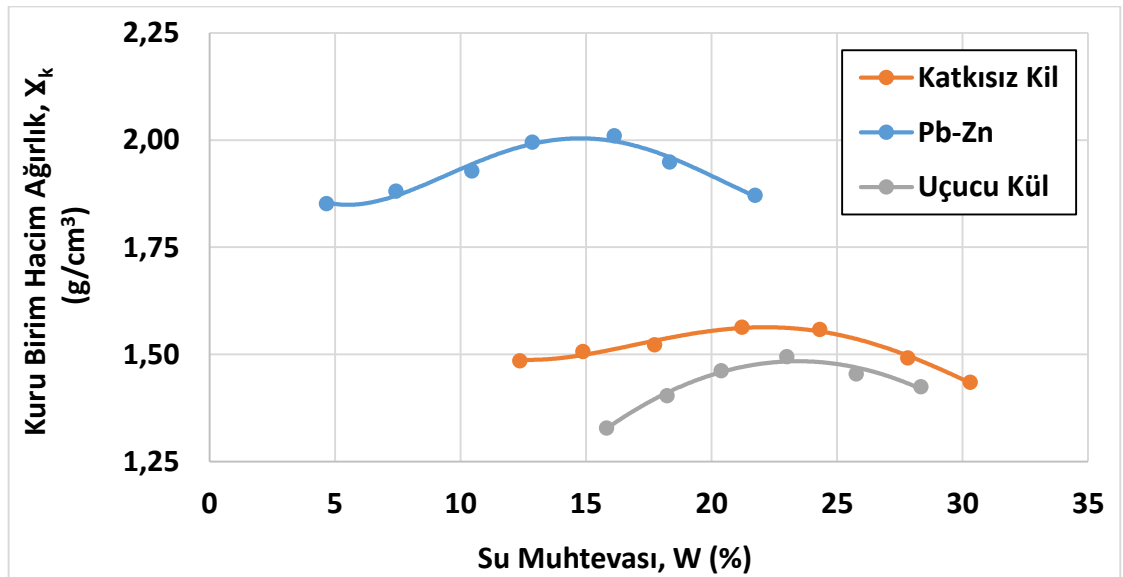
Kıvam limit deneyleri sonucunda, elde edilen deney sonuç verileri Çizelge 4.10'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.10 %10 oranında uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin plastisite kartındaki kıvam değerleri

Numune Grupları	Malzemeler (%)			Likit Limit %	Plastik Limit %	Plastisite İndisi %
	No	Kil	Pb-Zn			
K <sub>100</sub>	100	-	-	65	24	41
K <sub>80</sub> + PZ <sub>10</sub> + U <sub>10</sub>	80	10	10	55	25	30
K <sub>70</sub> + PZ <sub>20</sub> + U <sub>10</sub>	70	20	10	48	21	27
K <sub>60</sub> + PZ <sub>30</sub> + U <sub>10</sub>	60	30	10	42	16	26
K <sub>50</sub> + PZ <sub>40</sub> + U <sub>10</sub>	50	40	10	40	15	25
K <sub>40</sub> + PZ <sub>50</sub> + U <sub>10</sub>	40	50	10	32	12	20
K <sub>30</sub> + PZ <sub>60</sub> + U <sub>10</sub>	30	60	10	28	11	17
K <sub>20</sub> + PZ <sub>70</sub> + U <sub>10</sub>	20	70	10	22	10	12

#### 4.2.2 Kompaksiyon Deney Sonuçları

Deneysel çalışmada, öncelikle uçucu kül malzemesine kompaksiyon deneyi uygulanarak, tez çalışmasında kullanılan uçucu külün optimum su muhtevası %23 ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri ise 1.48 gr/cm<sup>3</sup> olarak bulunmuştur (Şekil 4.27).



Şekil 4.27 Uçucu kül malzemesinin kuru birim hacim ağırlık – su muhtevası grafiği

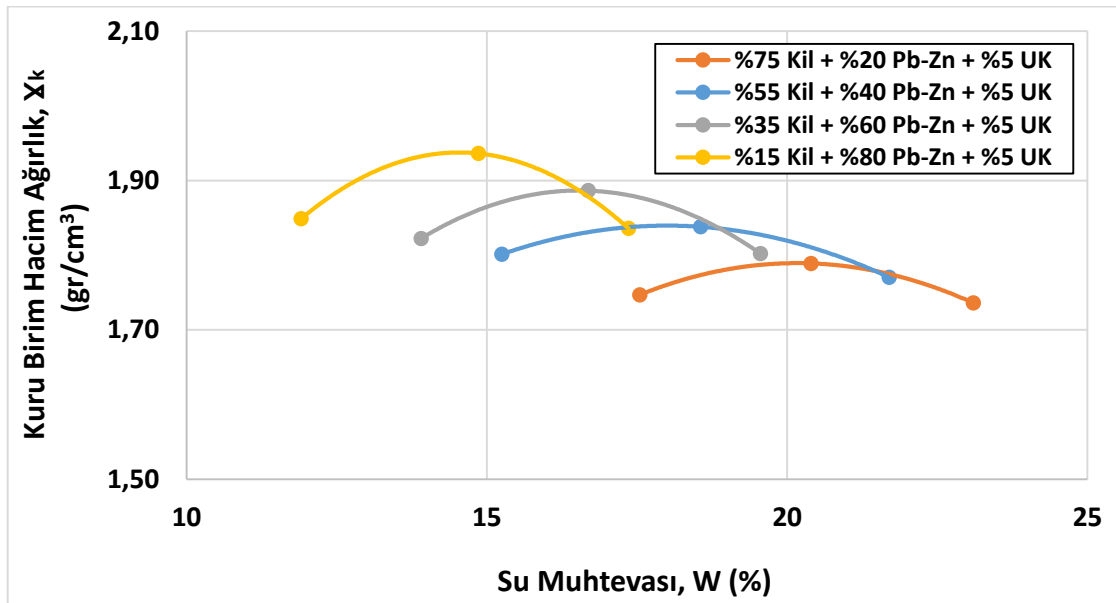
Kompaksiyon deneyi sonucunda elde edilen optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri Çizelge 4.11’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.11 Uçucu Kül malzemesinin standart proktor kompaksiyon deneyi sonucu elde edilen deney sonuç verileri

Malzemeler	Optimum Su Muhtevası (%)	Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık (g/cm <sub>3</sub> )
-	(%)	g/cm <sub>3</sub>
Kil	21	1,55
Pb-Zn	12	2,01
Uçucu Kül	23	1,48

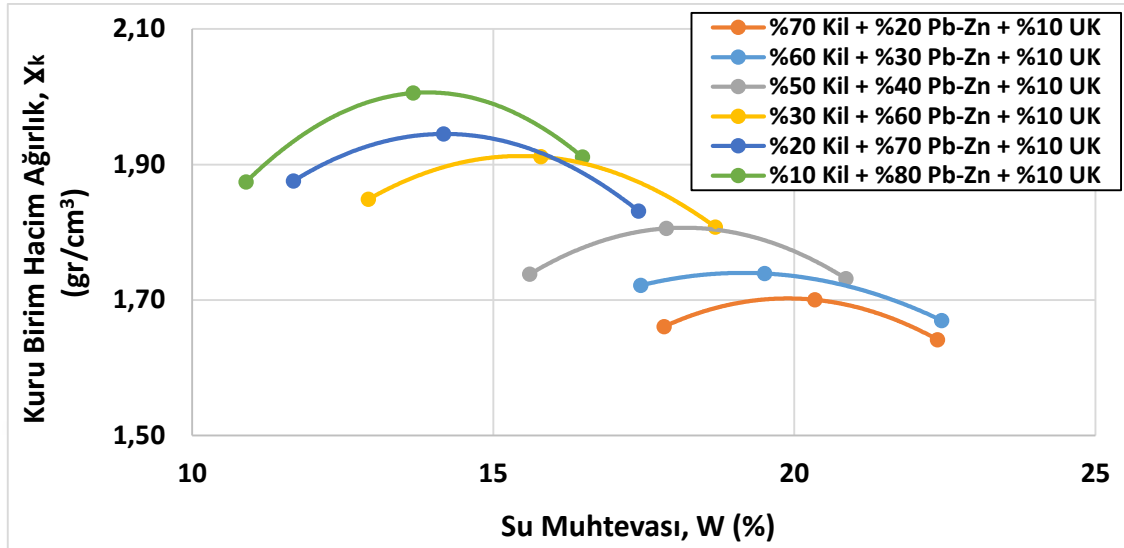
Deneysel çalışmanın ilerleyen safhasında %5, %10 ve %20 oranlarında uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerine standart kompaksiyon deneyi uygulanarak, optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri bulunmuştur.

%5 oranında uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinde, Pb-Zn katkı oranı arttıkça, kuru birim hacim ağırlık değerlerinde artış, optimum su muhtevası değerlerinde düşüş gözlenmiştir (Şekil 4.28).



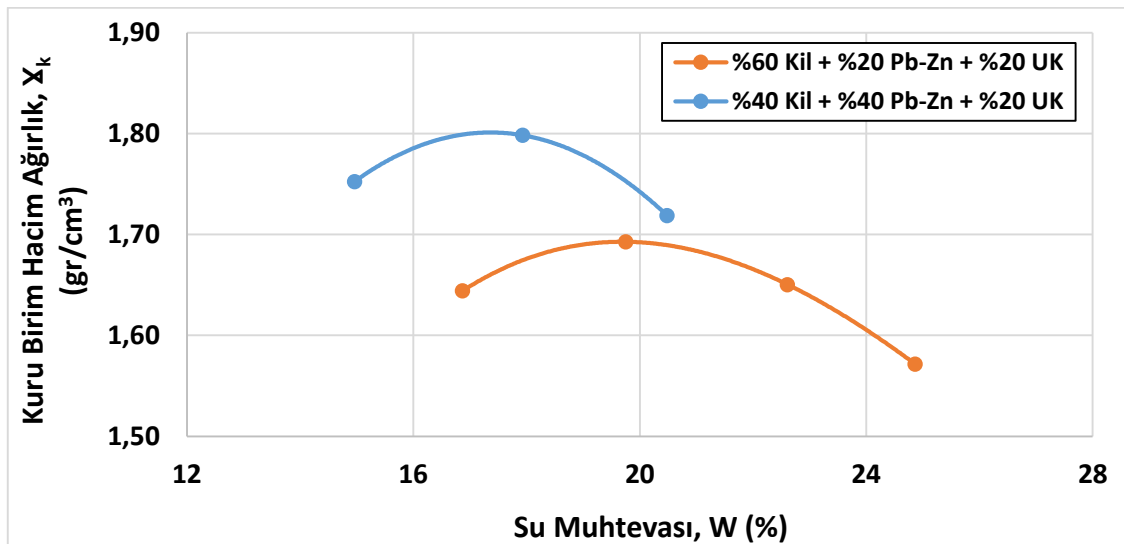
Şekil 4.28 %5 oranında uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin kuru birim hacim ağırlık – su muhtevası grafiği

%10 oranında uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinde, Pb-Zn katkı oranı arttıkça, kuru birim hacim ağırlık değerlerinde artış, optimum su muhtevası değerlerinde düşüş gözlenmiştir (Şekil 4.29).



Şekil 4.29 %10 oranında uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin kuru birim hacim ağırlık – su muhtevası grafiği

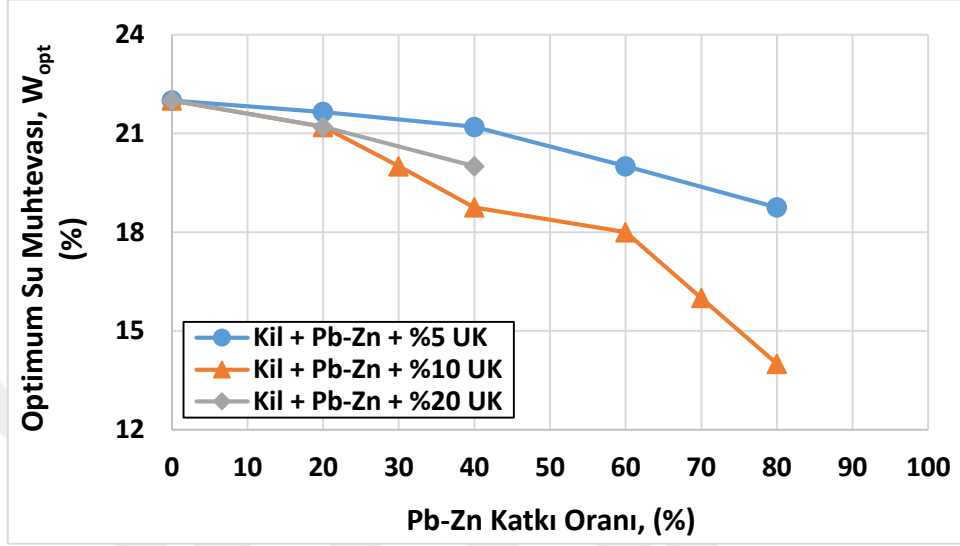
%20 oranında uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinde, Pb-Zn katkı oranı arttıkça, kuru birim hacim ağırlık değerlerinde artış, optimum su muhtevası değerlerinde düşüş gözlenmiştir (Şekil 4.30).



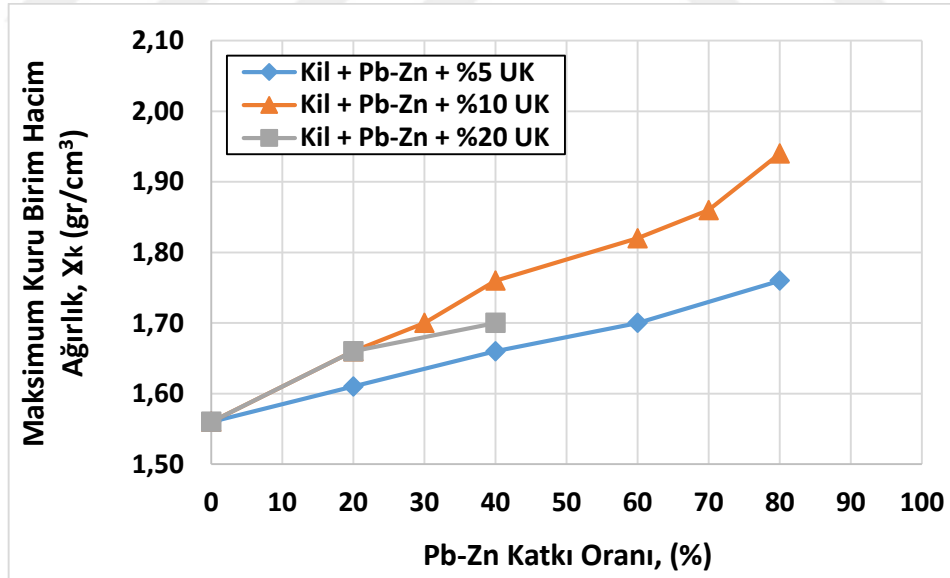
Şekil 4.30 %20 oranında uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin kuru birim hacim ağırlık – su muhtevası grafiği



Standart kompaksiyon deneyleri sonucunda %5, %10 ve %20 oranlarında uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinde, Pb-Zn katkı oranının artışıyla, optimum su muhteva değerlerinde düşüş; maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinde ise artış gözlenmiştir (Şekil 4.31, Şekil 4.32).



Şekil 4.31 Uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin optimum su muhteva – Pb-Zn katkı oranı grafiği



Şekil 4.32 Uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin maksimum kuru birim hacim ağırlık – Pb-Zn katkı oranı grafiği

Kompaksiyon deneyleri sonucunda elde edilen optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık verileri Çizelge 4.12’de gösterilmiştir.

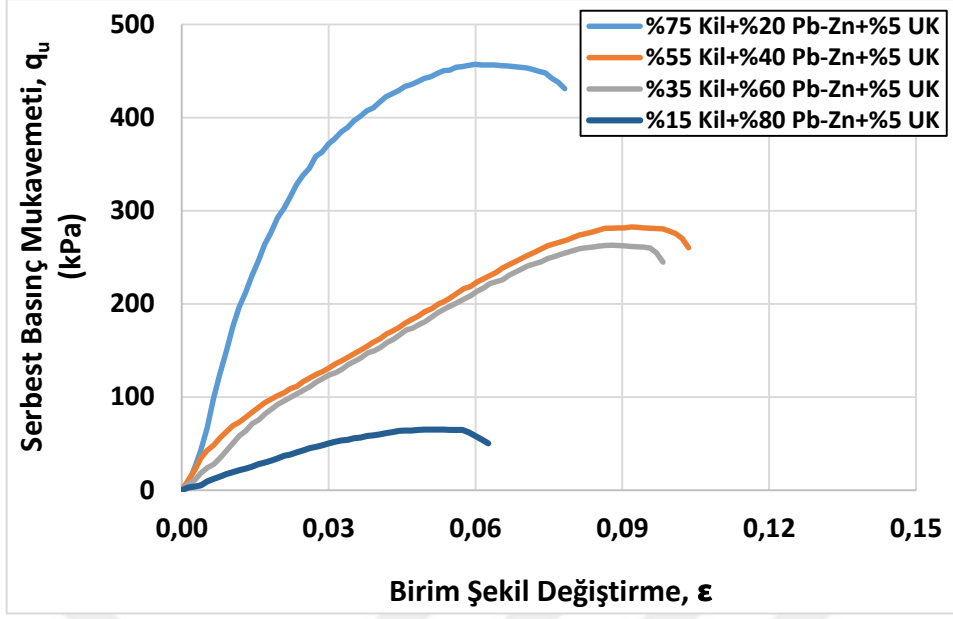
Çizelge 4.12 Uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri

Numune Grupları	Malzemeler, (%)			Optimum Su Muhtevası, $W_{opt}$ , %	Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık, $\gamma_k$ (gr/cm <sup>3</sup> )
	Kil	Pb-Zn	Uçucu Kül		
K <sub>100</sub>	100	0	-	21,00	1,55
K <sub>75</sub> + PZ <sub>20</sub> + U <sub>5</sub>	75	20	5	21,65	1,61
K <sub>55</sub> + PZ <sub>40</sub> + U <sub>5</sub>	55	40	5	21,20	1,66
K <sub>35</sub> + PZ <sub>60</sub> + U <sub>5</sub>	35	60	5	20,00	1,70
K <sub>15</sub> + PZ <sub>80</sub> + U <sub>5</sub>	15	80	5	18,75	1,76
K <sub>70</sub> + PZ <sub>20</sub> + U <sub>10</sub>	70	20	10	21,20	1,66
K <sub>60</sub> + PZ <sub>30</sub> + U <sub>10</sub>	60	30	10	20,00	1,70
K <sub>50</sub> + PZ <sub>40</sub> + U <sub>10</sub>	50	40	10	18,75	1,76
K <sub>30</sub> + PZ <sub>60</sub> + U <sub>10</sub>	30	60	10	18,00	1,82
K <sub>20</sub> + PZ <sub>70</sub> + U <sub>10</sub>	20	70	10	16,00	1,86
K <sub>10</sub> + PZ <sub>80</sub> + U <sub>10</sub>	10	80	10	14,00	1,94
K <sub>60</sub> + PZ <sub>20</sub> + U <sub>20</sub>	60	20	20	21,20	1,66
K <sub>40</sub> + PZ <sub>40</sub> + U <sub>20</sub>	40	40	20	20,00	1,70

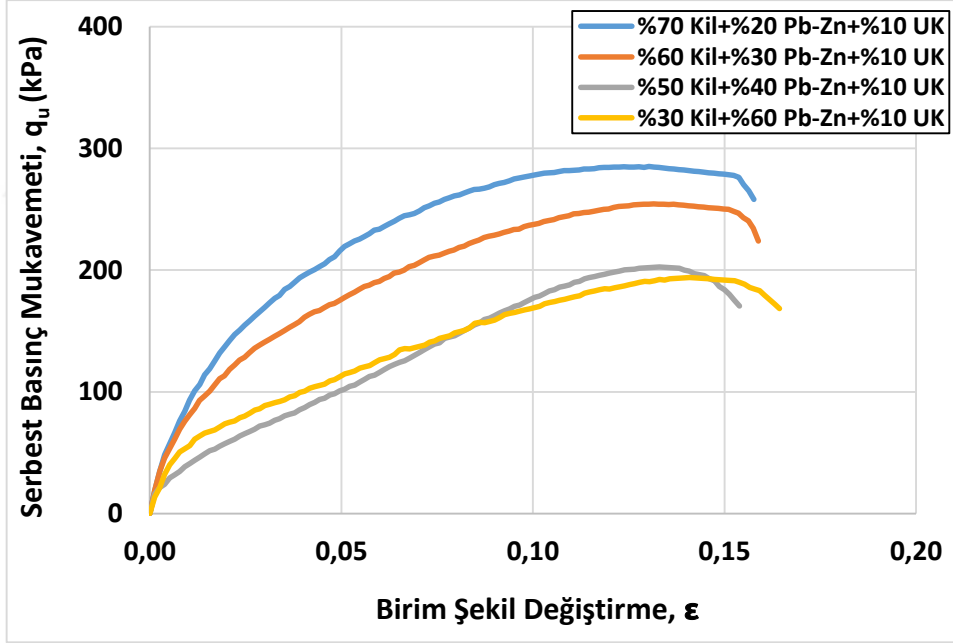
#### 4.2.3 Serbest Basınç Deneyi Sonuçları

DeneySEL çalışmada, Pb-Zn katkılı kil numuneleri %5, %10 ve %20 oranlarında uçucu kül ile harmanlanarak uçucu kül malzemesinin, Pb-Zn katkılı kil numunelerinin serbest basınç mukavemet değerlerine olan etkisi incelenmiştir. Karışım numunelerindeki uçucu kül oranının artışı ile karışım numunelerinin serbest basınç mukavemet değerlerinde düşüş gözlenmiştir (Şekil 4.33, Şekil 4.34, Şekil 4.35). Literatür araştırmasına göre Çetin [5]’in kil zeminin uçucu küllerle stabilizasyonu konusundaki deneysel çalışma sonuçları, bu tez çalışmasındaki deney sonuçlarını desteklemektedir.

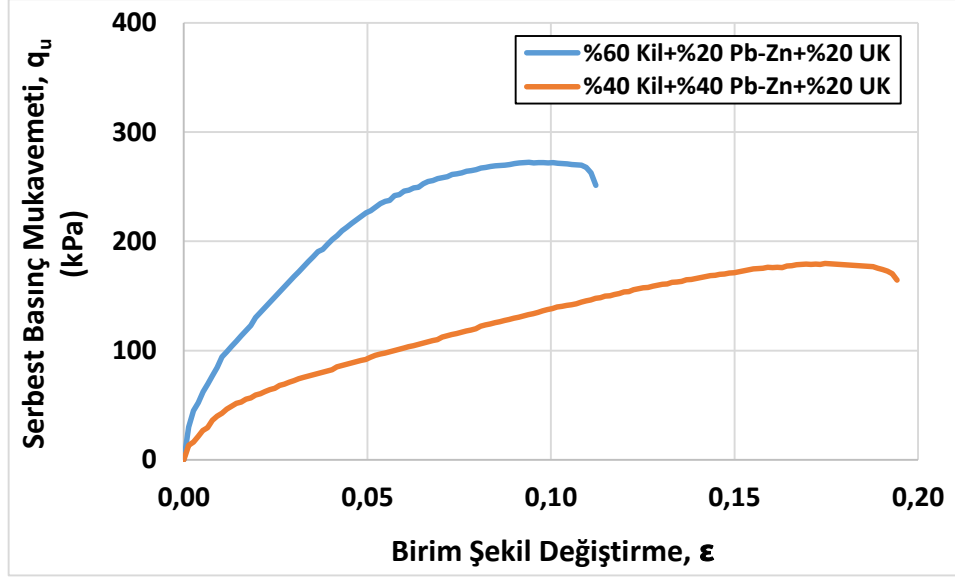
%5, %10 ve %20 oranlarında uçucu kül ile %20 oranında Pb-Zn katkılı kil numunelerinde elde edilen serbest basınç mukavemet değerleri 456 kPa, 286 kPa ve 272 kPa olarak tayin edilmiş olup, 228 kPa serbest basınç mukavemet değerine sahip katkısız kile göre %100, %25ve %19 oranlarında iyileşme gözlenmiştir (Çizelge 4.13).



Şekil 4.33 %5 oranında uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin serbest basınç mukavemet – birim şekil değişirme grafiği



Şekil 4.34 %10 oranında uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin serbest basınç mukavemet – birim şekil değişirme grafiği



Şekil 4.35 %20 oranında uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin serbest basınç mukavemet – birim şekil değiştirme grafiği

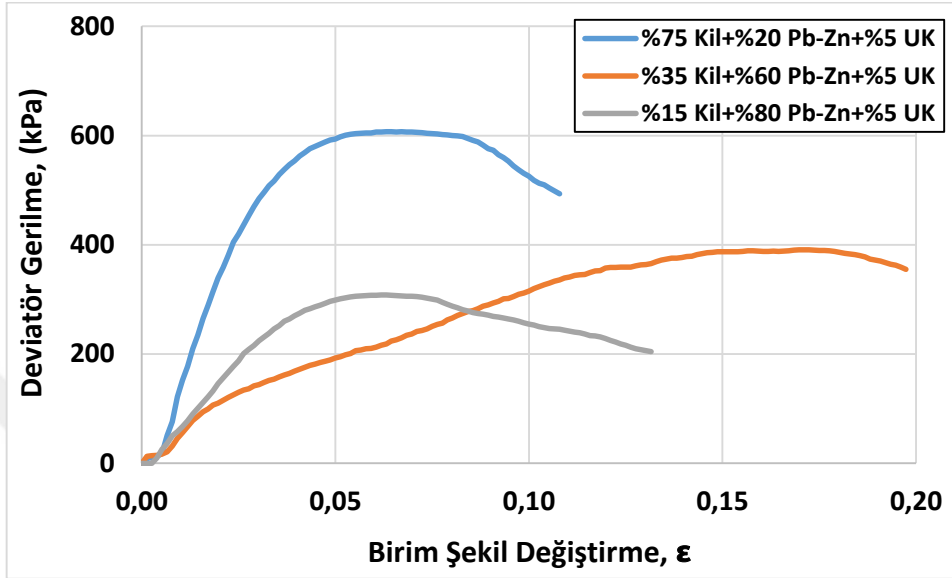
Deneysel çalışma sonucunda, en yüksek mukavemet değerine %5 oranında uçucu kül ile %20 oranında Pb-Zn katkılı kil numunelerinde rastlanmıştır olup, katkısız kile göre %100 oranında mukavemet artışı meydana gelmiştir. Uçucu kül oranının artışı ile serbest basınç mukavemet değerlerinde düşüş gözlenmiştir. Elde edilen deney sonuç verileri Çizelge 4.13’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.13 Uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerin serbest basınç mukavemet değerleri

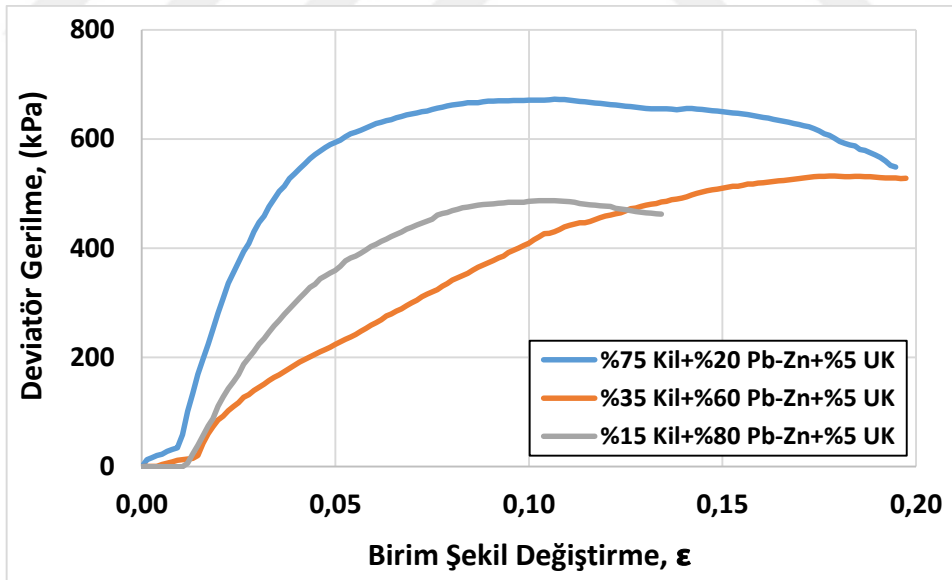
Numune Grupları	Kil (%)	Pb-Zn (%)	Uçucu Kül (%)	Serbest Basınç Mukavemeti, $q_u$ (kPa)	Drenajsız Kayma Mukavemeti, $c_u$ (kPa)
No	(%)	(%)	(%)	(kPa)	(kPa)
K100	100	0	0	228	114
K75 + PZ20 + U5	75	20	5	456	228
K55 + PZ40 + U5	55	40	5	282	141
K35 + PZ60 + U5	35	60	5	264	132
K15 + PZ80 + U5	15	80	5	66	33
K70 + PZ20 + U10	70	20	10	286	143
K60 + PZ30 + U10	60	30	10	256	128
K50 + PZ40 + U10	50	40	10	204	102
K30 + PZ60 + U10	30	60	10	194	97
K60 + PZ20 + U20	60	20	20	272	136
K40 + PZ40 + U20	40	40	20	180	90

#### 4.2.4 Üç Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları

%20, %60 ve %80 oranında Pb-Zn katkılı kil numunelere, %5 ve %10 oranlarında uçucu kül ilave edilerek üç eksenli basınç deneyi uygulanmış olup deney süresince karışım numunelerine 50 kPa, 100 kPa ve 200 kPa çevre basıncı verilmiştir.



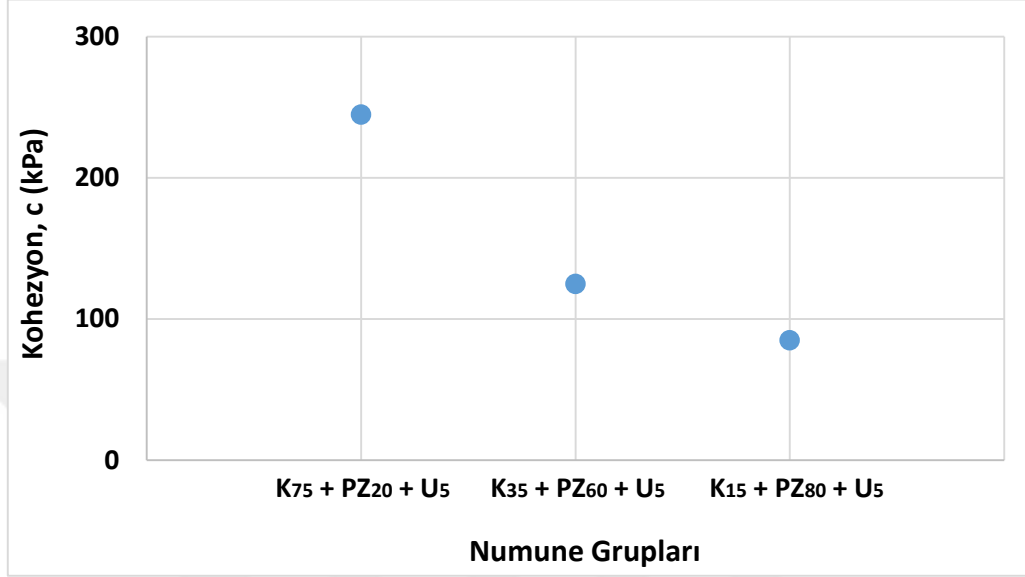
(a)



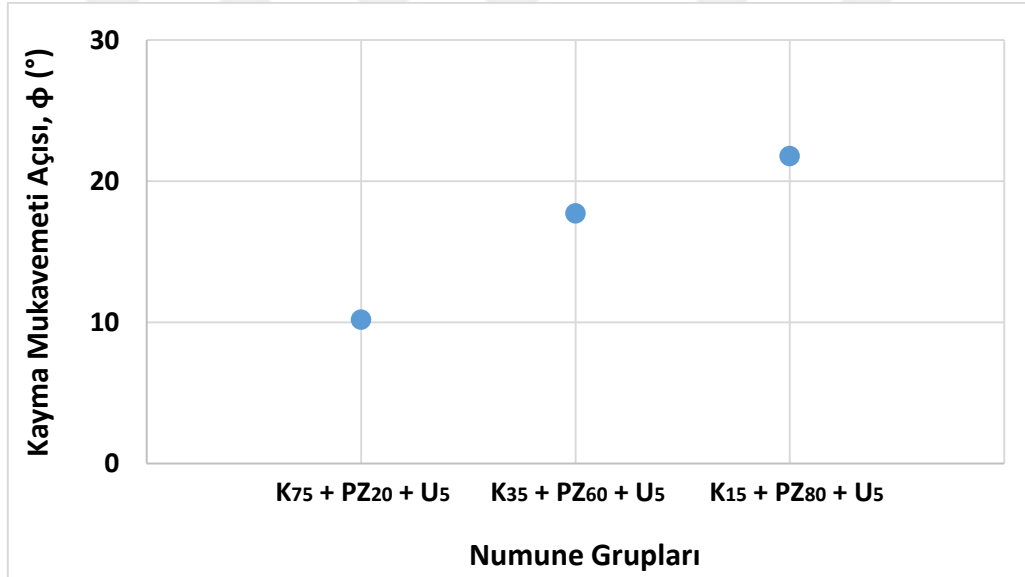
(b)

Şekil 4.36 %5 oranında uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin 50 kPa çevre basıncı altındaki deviator gerilme – birim şekil değiştirme grafiği

%5 oranında uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinde, Pb-Zn katkı oranının artışı ile kayma direnci ve kohezyon değerlerinde düşüş, kayma mukavemeti açısı değerlerinde de artış gözlenmiştir. Kayma direnci değerlerinde, katkısız kile göre %33 ile 127 oran aralıklarında iyileşme gözlenmiştir (Şekil 4.37, Şekil 4.38).

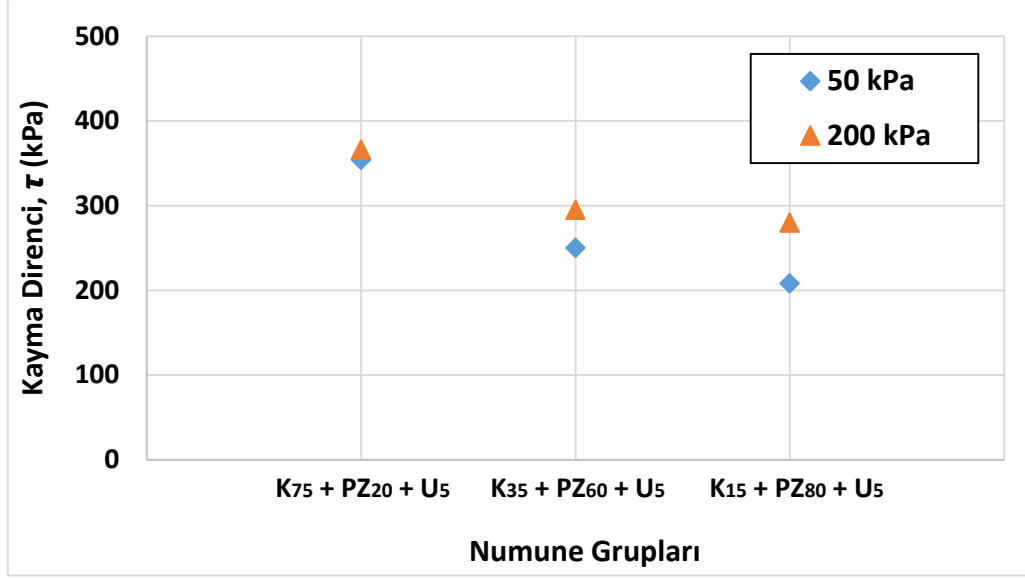


(a)

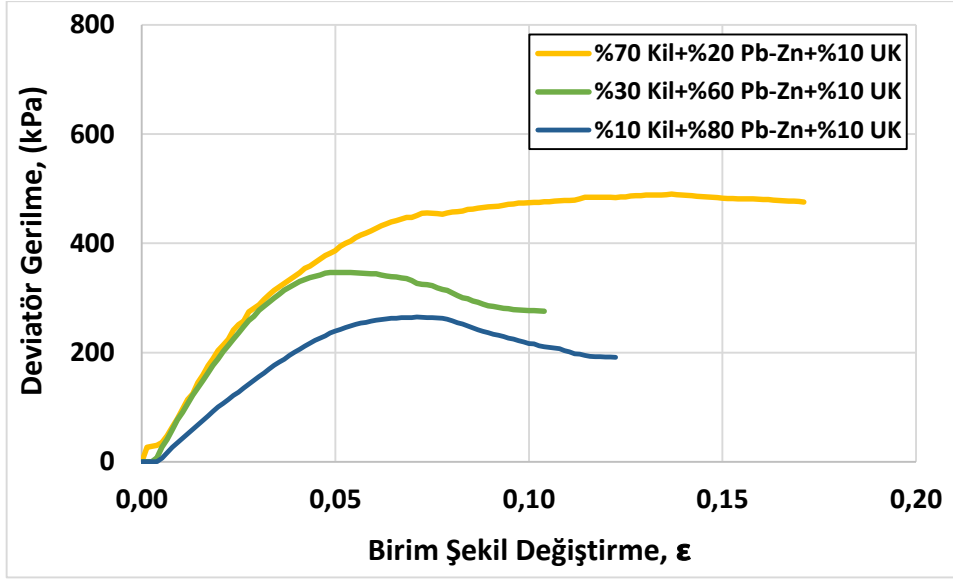


(b)

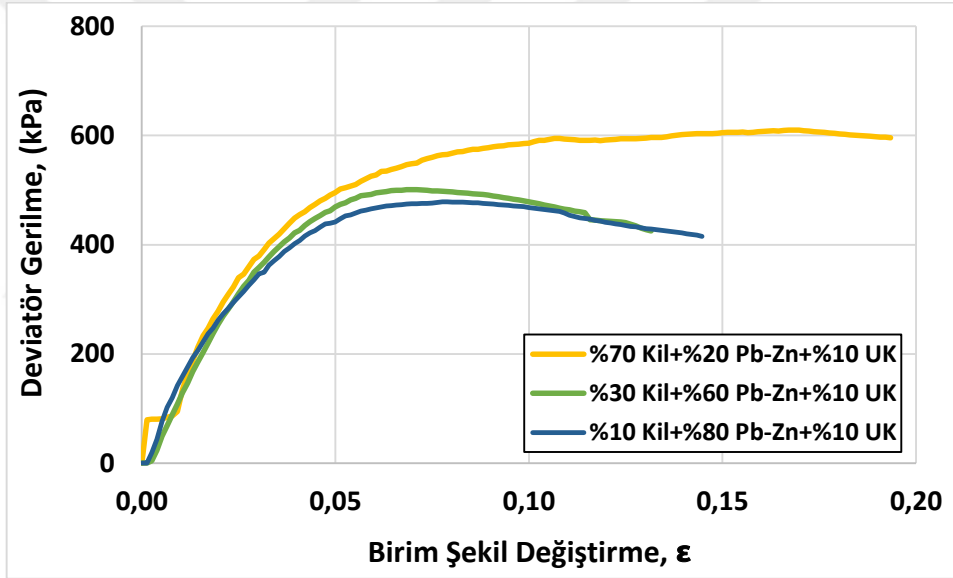
Şekil 4.37 %5 oranında uçucu kül ile harmanlanan karışım numunelerinin kohezyon (a) - içsel sürtünme açısı (b) grafikleri



Şekil 4.38 %5 oranında uçucu kül ile harmanlanan karışım numunelerinin 50 kPa ve 200 kPa çevre basıncı etkisindeki kayma direnci grafikleri



(a)

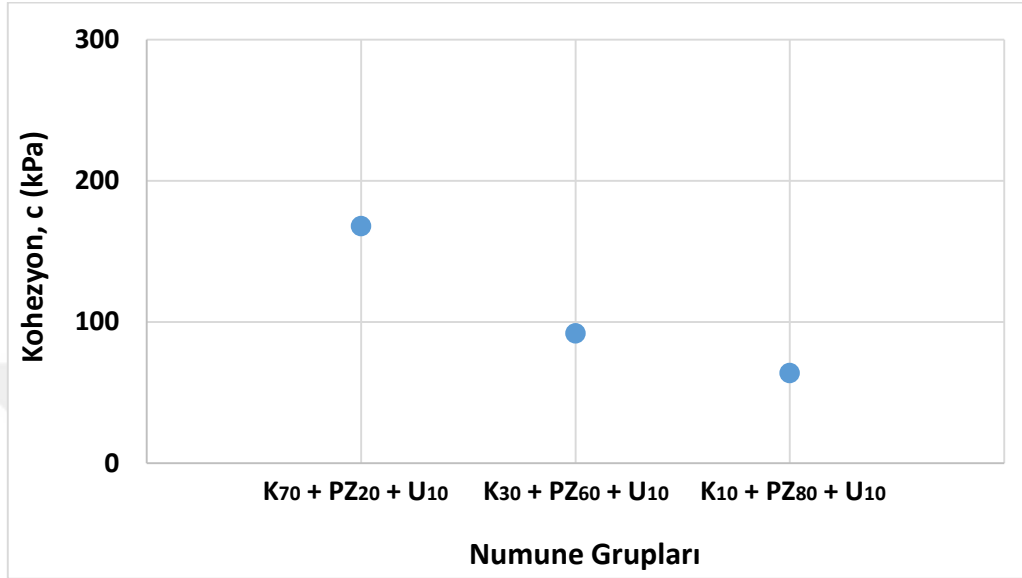


(b)

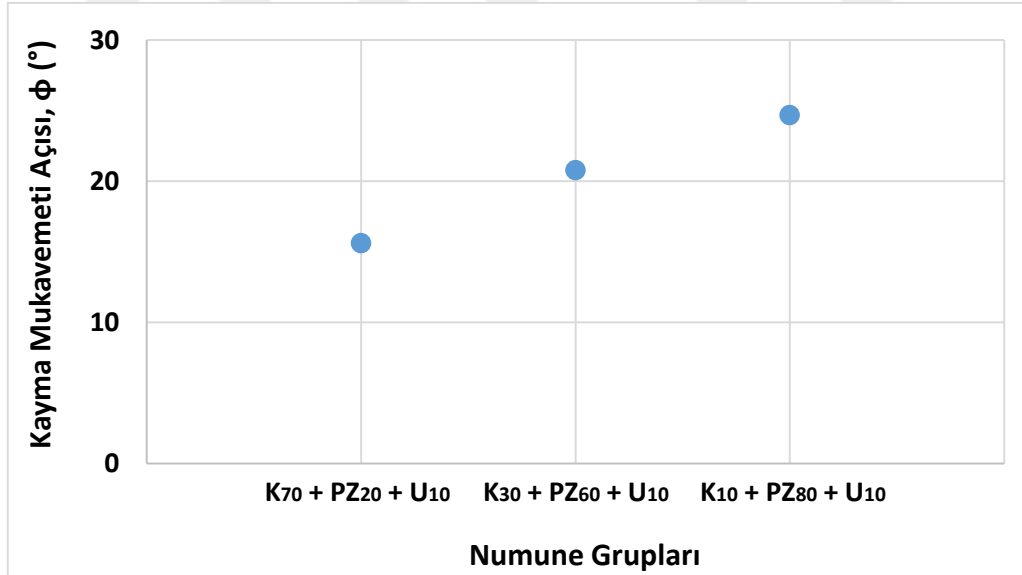
Şekil 4.39 %10 oranında uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin 50 kPa (a) ve 200 kPa (b) çevre basıncı altındaki deviator gerilme – birim şekil değişirme



%10 oranında uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinde, Pb-Zn katkı oranının artışı ile kayma direnci ve kohezyon değerlerinde düşüş, kayma mukavemeti açısı değerlerinde de artış gözlenmiştir. Kayma direnci değerlerinde, katkısız kile göre %19 ile %96 oran aralıklarında iyileşme gözlenmiştir (Şekil 4.40, Şekil 4.41).



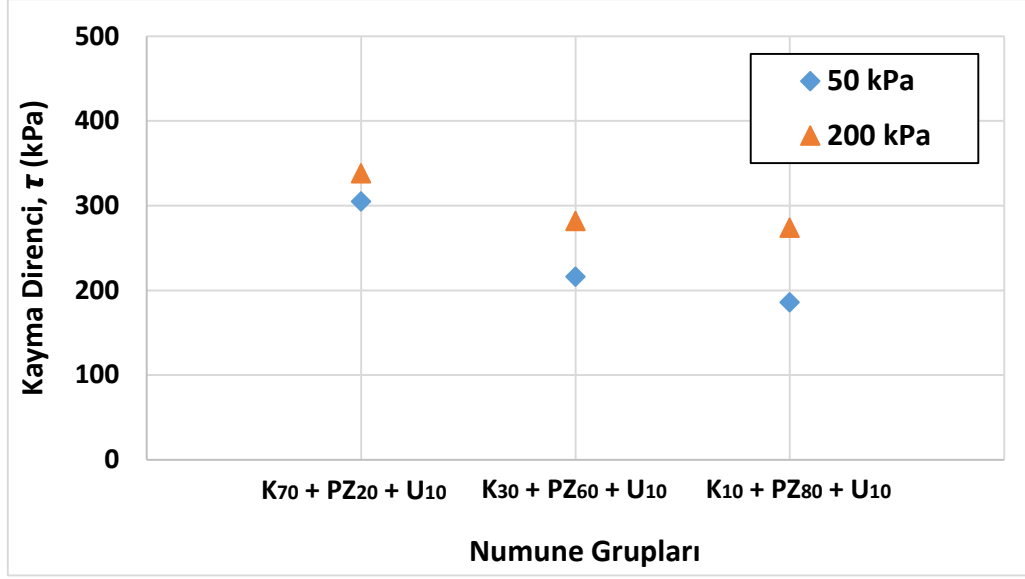
(a)



(b)

Şekil 4.40 %10 oranında uçucu kül ile harmanlanan karışım numunelerinin kohezyon

(a) - içsel sürtünme açısı (b) grafikleri



Şekil 4.41 %10 oranında uçucu kül ile harmanlanan karışım numunelerinin 50 kPa ve 200 kPa çevre basıncı etkisindeki kayma direnci grafikleri

Üç eksenli basınç deneyleri sonucunda elde edilen deviator gerilme, kohezyon, kayma mukavemeti açısı ve kayma direnci verileri Çizelge 4.14'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.14 Uçucu kül ile harmanlanmış Pb-Zn katkılı kil numunelerinin üç eksenli basınç deneyi sonucunda elde edilen parametreleri

Numune Grupları	Deviatör Gerilme, $\sigma_1-\sigma_3$			Kohezyon, c kPa	Kayma Mukavemeti Açısı, $\phi$ °	Kayma Direnci, $\tau$	
	50 kPa	100 kPa	200 kPa			50 kPa	200 kPa
No							
K75 + PZ20 + U5	607	644	673	245	10	354	366
K35 + PZ60 + U5	391	432	532	125	18	250	295
K15 + PZ80 + U5	308	356	487	85	22	208	280
K70 + PZ20 + U10	490	598	610	168	16	305	338
K30 + PZ60 + U10	327	398	501	92	21	216	282
K10 + PZ80 + U10	265	334	479	64	25	186	274

### 4.3 Çimento ile harmanlanan kil-Pb-Zn karışım numuneleri

%20 oranında Pb-Zn katkılı kil numunelerine %1, %2 ve %3 oranlarında çimento ilave edilerek oluşturulan karışım numuneleri, 24 saat süresince desikatörlerde bekletilerek kür edilmişlerdir. Numune grupları Çizelge 4.15’de gösterilmiştir.

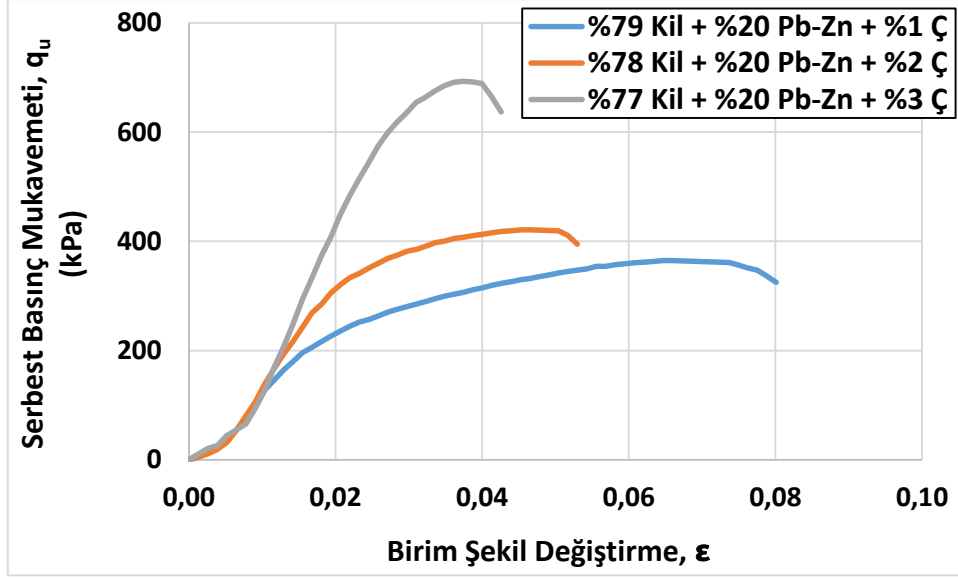
Çizelge 4.15 Çimento ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numuneleri

Numune Grupları	Malzemeler (%)		
	Kil	Pb-Zn	Çimento
No			
K79 + PZ20 + Ç1	79	20	1
K78 + PZ20 + Ç2	78	20	2
K77 + PZ20 + Ç3	77	20	3

#### 4.3.1 Serbest Basınç Deneyi Sonuçları

%20 oranında Pb-Zn katkılı kil numunelerine %1, %2 ve %3 oranlarında çimento ilave edilerek oluşturulan karışım numuneleri, 1 gün ve 7 gün süresince cam desikatörlerde bekletilerek kür edilmişlerdir. Bu süre sonunda, karışım numunelerine serbest basınç mukavemet deneyi uygulanmıştır.

1 gün kür süreli karışım numunelerinde çimento oranının artış göstermesiyle, serbest basınç mukavemet değerlerinde de artış gözlenmiştir. Katkısız kile göre %60, %84 ile %203 oranlarında iyileşme meydana gelmiştir (Şekil 4.42).



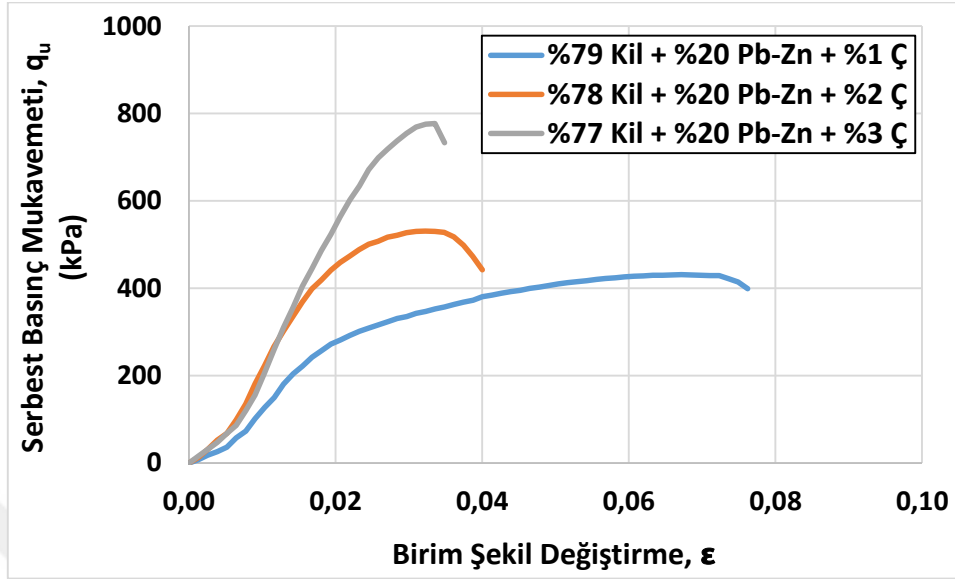
Şekil 4.42 Çimento ilaveli Pb-Zn katkılı kil numunelerin, 1 gün kür süresi sonrasındaki serbest basınç mukavemet – şekil değiştirme grafiği

1 gün kür süresi sonucunda çimento ilaveli Pb-Zn katkılı kil numunelerine uygulanan serbest basınç mukavemet deneyi sonucunda elde edilen değerler Çizelge 4.16'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.16 %1, %2 ve %3 oranlarında çimento ile harmanlanan %20 Pb-Zn katkılı karışım numunelerinin, 1 gün kür süresi sonundaki serbest basınç mukavemet değerleri

Numune Grupları	Kil (%)	Pb-Zn (%)	Çimento (%)	Serbest Basınç Mukavemeti, $q_u$ (kPa)	Drenajsız Kayma Mukavemeti, $c_u$ (kPa)
No $K_{100}$	100	-	-	228	114
$K_{79} + PZ_{20} + Ç_1$	79	20	1	364	182
$K_{78} + PZ_{20} + Ç_2$	78	20	2	420	210
$K_{77} + PZ_{20} + Ç_3$	77	20	3	690	345

7 gün kür süreli karışım numunelerinde çimento oranının artış göstermesiyle, serbest basınç mukavemet değerlerinde de artış gözlenmiştir (Şekil 4.43).



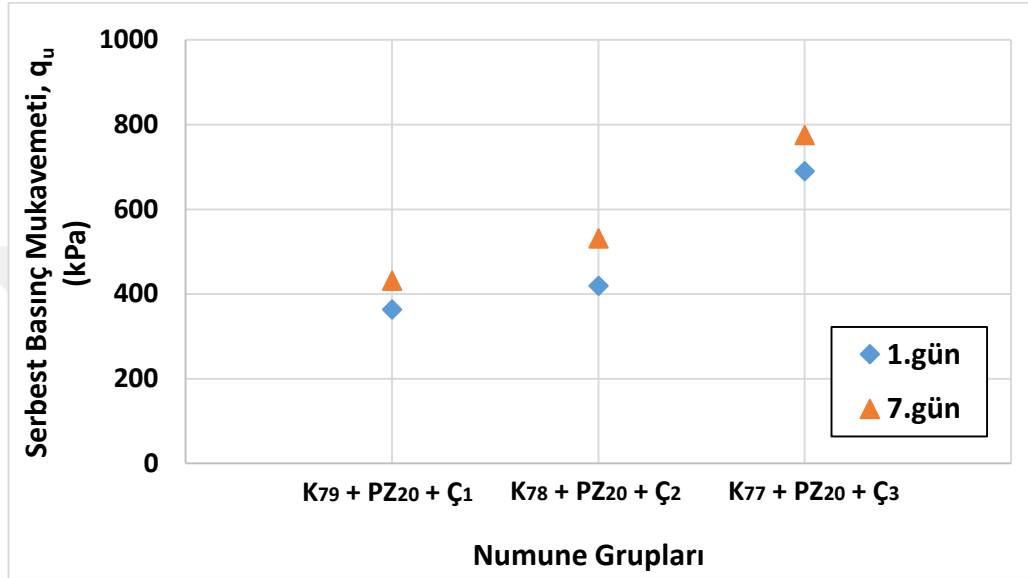
Şekil 4.43 Çimento ilaveli Pb-Zn katkılı kil numunelerin, 7 gün kür süresi sonrasındaki serbest basınç mukavemet – şekil değiştirme grafiği

7 gün kür süresi sonucunda elde edilen serbest basınç mukavemet deney sonuç verileri Çizelge 4.17’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.17 %1, %2 ve %3 oranlarında çimento ile harmanlanan %20 Pb-Zn katkılı karışım numunelerinin, 7 gün kür süresi sonundaki serbest basınç mukavemet değerleri

Numune Grupları	Kil	Pb-Zn	Çimento	Serbest Basınç Mukavemeti, $q_u$	Drenajsız Kayma Mukavemeti, $c_u$
No	(%)	(%)	(%)	(kPa)	(kPa)
K <sub>100</sub>	100	-	-	228	114
K <sub>79</sub> + PZ <sub>20</sub> + Ç <sub>1</sub>	79	20	1	432	216
K <sub>78</sub> + PZ <sub>20</sub> + Ç <sub>2</sub>	78	20	2	530	265
K <sub>77</sub> + PZ <sub>20</sub> + Ç <sub>3</sub>	77	20	3	776	388

%1, %2 ve %3 oranlarında çimento ile harmanlanmış %20 oranında Pb-Zn katkılı kil numuneler, çimentonun süreye bağlı mukavemet özelliklerinin incelenmesi amacıyla 1 ve 7 gün süresince desikatörde bekletilerek kür edilmişlerdir. Kür süreleri sonunda uygulanan serbest basınç mukavemet deneyi sonuçlarına göre, 7 gün kür süreli numunelerin serbest basınç mukavemet değerleri, 1 gün kür süreli numunelere göre %19, %26 ve %13 oranlarında artış göstermiştir (Şekil 4.44).



Şekil 4.44 Çimento ilaveli Pb-Zn katkılı kil numunelerin 1 ve 7 gün kürlenme süresi sonundaki serbest basınç mukavemet – çimento oranı grafiği

Deneyler sonucunda elde edilen serbest basınç mukavemet ve iyileşme yüzdesi değerleri Çizelge 4.18’de gösterilmiştir.

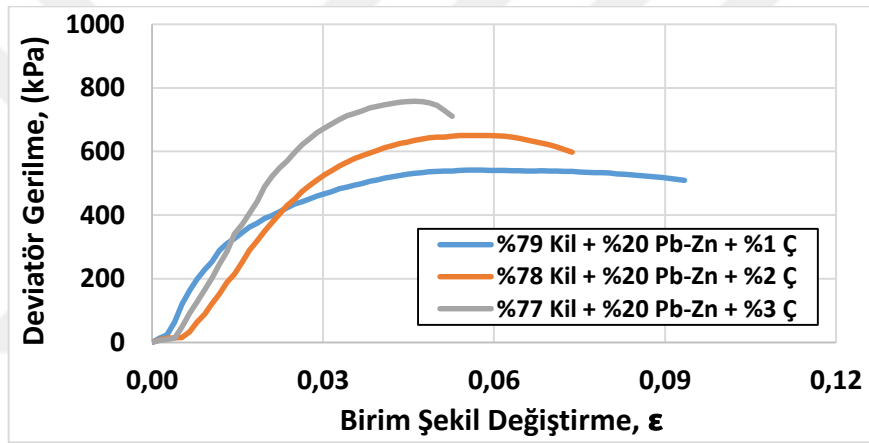
Çizelge 4.18 Çimento ilaveli Pb-Zn katkılı kil numunelerin 1 ve 7 gün kürlenme süresi sonundaki serbest basınç mukavemet ve iyileşme oranı değerleri

Numune Grupları	Serbest Basınç Mukavemeti, $q_u$ (kPa)		1. güne göre iyileşme oranı (%)	7. güne göre iyileşme oranı (%)
	1.gün	7.gün		
No				
K100	228	228	-	-
K79 + PZ20 + Ç1	364	432	59	89
K78 + PZ20 + Ç2	420	530	84	132
K77 + PZ20 + Ç3	690	776	203	240

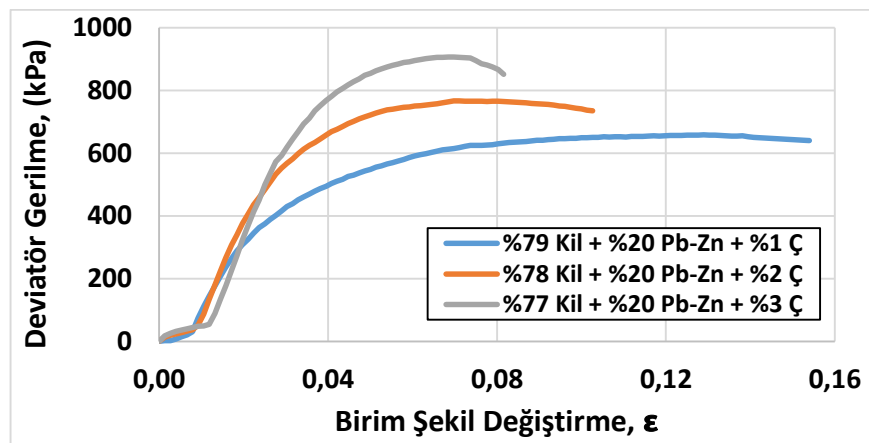
#### 4.3.2 Üç Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları

Çimento malzemesinin, Pb-Zn katkılı kil numunelerine olan etkisinin incelenmesi amacıyla %20 oranında Pb-Zn katkısı içeren kil numunelerine %1, %2 ve %3 oranlarında çimento ilave edilerek oluşturulan karışım numunelerine üç eksenli basınç deneyi uygulanmıştır.

Deneyel çalışma sonucunda, karışım numunelerindeki çimento oranının artırılmasıyla, zeminin kohezyon ve kayma mukavemeti açığı değerlerinde artış meydana gelmiştir. Katkısız kil numunesine göre %1, %2 ve %3 oranlarında çimento ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin kohezyon değerlerinde %57, %94 ve %121 oranlarında artış gözlenmiştir (Şekil 4.46).

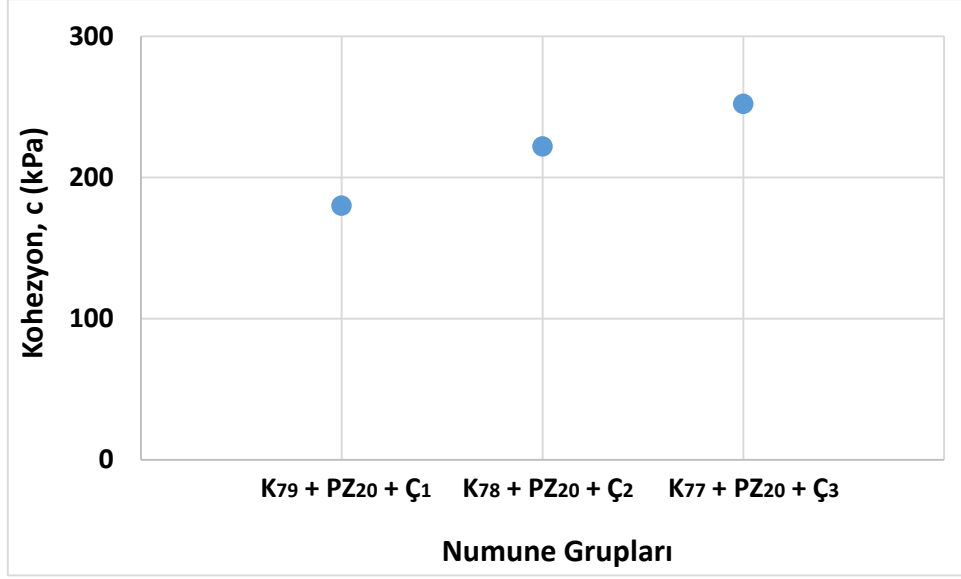


(a)

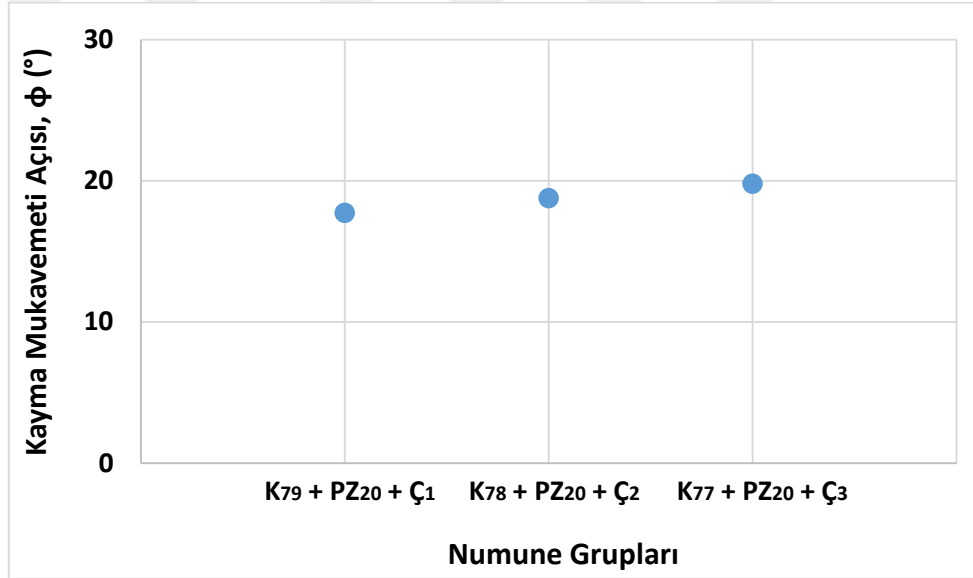


(b)

Şekil 4.45 Farklı oranlarda çimento ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin 50 kPa (a) ve 200 kPa (b) çevre basıncındaki deviator gerilme - şekil değiştirme grafiği



(a)

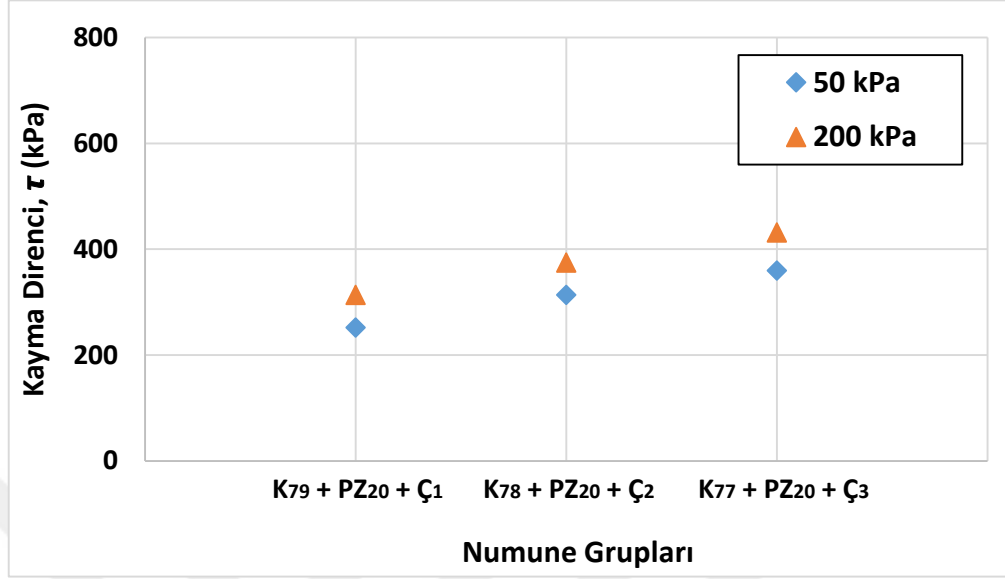


(b)

Şekil 4.46 Farklı oranlarda çimento ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin kohezyon (a) ve kayma mukavemeti açısı (b) grafikleri



Kayma direnci değerlerinde ise, katkısız kile göre %20, %36 ve %44 oranlarında iyileşme gözlenmiştir (Şekil 4.47).



Şekil 4.47 Farklı oranlarda çimento ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin 50 kPa ve 200 kPa çevre basıncı etkisindeki kayma direnci grafiği

DeneySEL çalışma sonucunda elde edilen üç eksenli basınç deneyi parametreleri Çizelge 4.19’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.19 Çimento ile harmanlanmış %20 oranında Pb-Zn katkılı kil numunelerinin üç eksenli basınç deneyi sonucunda elde edilen parametreleri

Deney Grup	Deviatör Gerilme $\sigma_1-\sigma_3$			Kohezyon c	Kayma Mukavemeti Açısı $\phi$	Kayma Direnci, $\tau$	
	50 kPa	100 kPa	200 kPa			50 kPa	200 kPa
Ç1 + PZ20 + K79	531	579	658	180	18	252	314
Ç2 + PZ20 + K78	650	683	767	222	19	314	375
Ç3 + PZ20 + K77	757	791	907	252	20	360	432

#### 4.4 Uçucu kül ve çimento ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numuneleri

%5 oranında uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerine %1 ve %2 oranlarında çimento ilave edilerek kilin iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

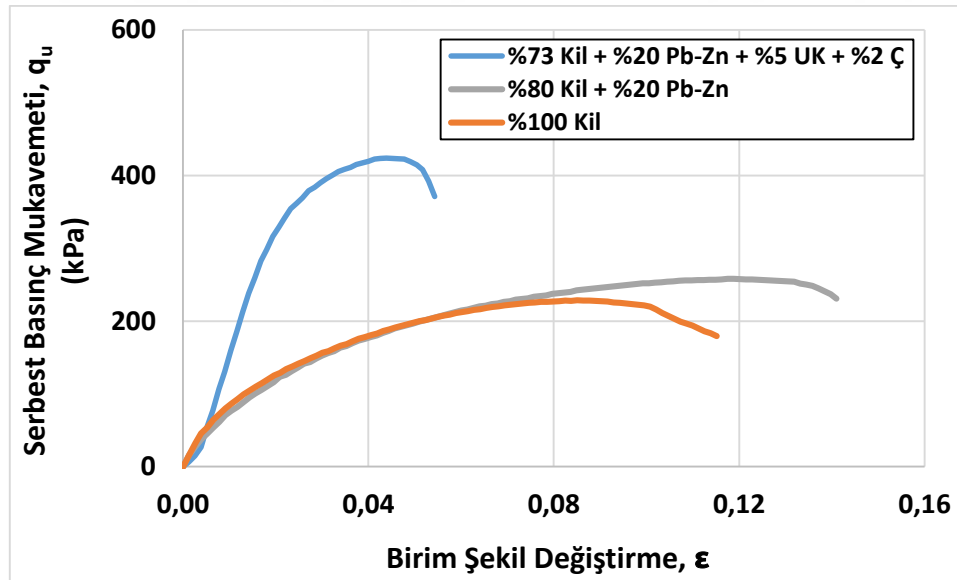
Deneysel çalışmada oluşturulan numune gruplarına serbest basınç ve üç eksenli basınç deneyleri uygulanmıştır. Oluşturulan numune grupları Çizelge 4.20’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.20 Çimento ve uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numuneleri

Numune Grupları No	Malzemeler (%)			
	Kil	Pb-Zn	Uçucu Kül	Çimento
K74 + PZ20 + U5 + Ç1	74	20	5	1
K73 + PZ20 + U5 + Ç2	73	20	5	2

##### 4.4.1 Serbest Basınç Deneyi Sonuçları

%5 oranında uçucu kül ve %2 oranında çimento ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunesinin serbest basınç mukavemet değeri 424 kPa olarak bulunmuş olup, katkısız kile göre %86 oranında mukavemet artışı gözlenmiştir (Şekil 4.48).



Şekil 4.48 Çimento ve uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunesinin serbest basınç mukavemet – birim şekil değişirme grafiği

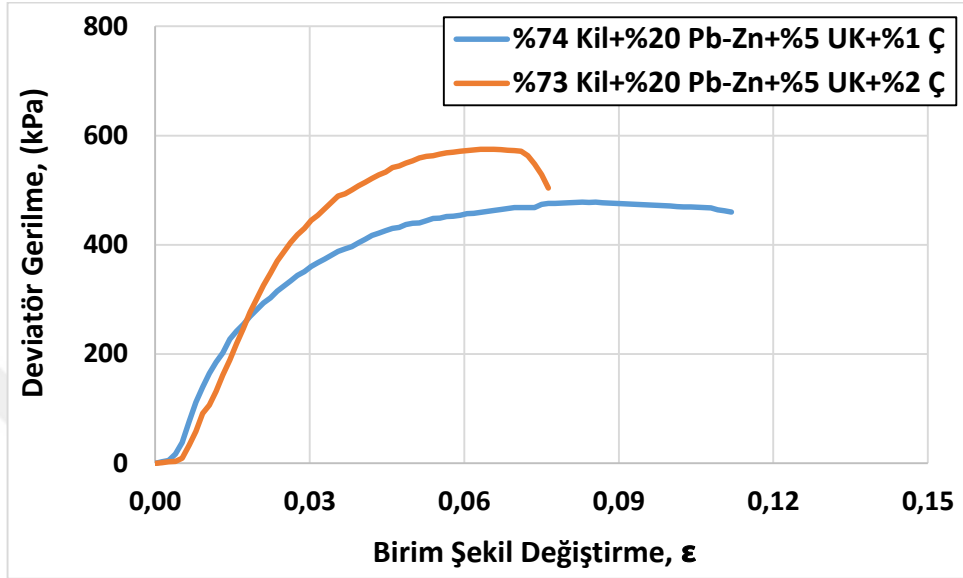
Serbest basınç deneyleri sonucunda elde edilen deney sonuç verileri Çizelge 4.21’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.21 Çimento ve uçuc kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunesinin serbest basınç mukavemet değerleri

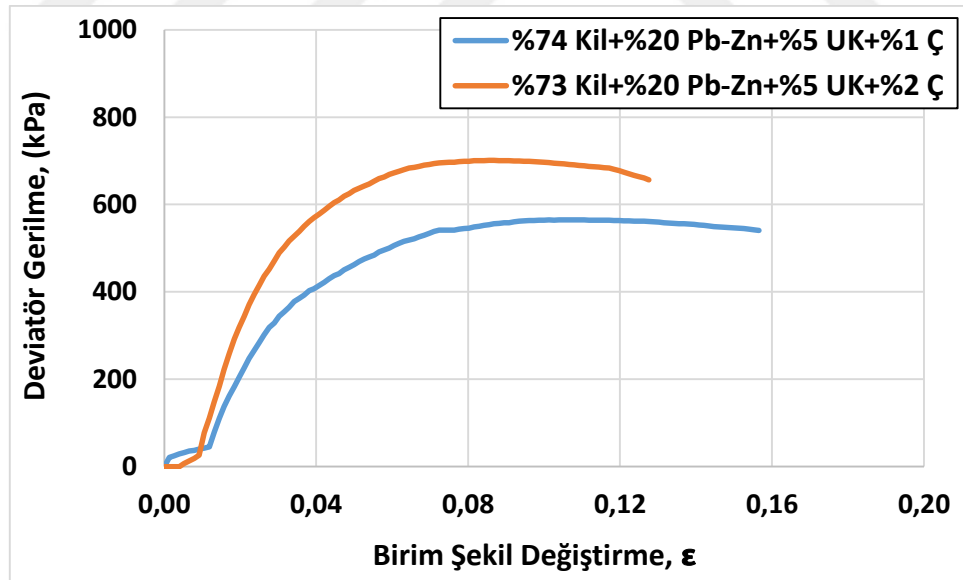
Numune Grupları	Serbest Basınç Mukavemeti ( $q_u$ )	Drenajsız Kayma Mukavemeti, ( $c_u$ )
No	kPa	kPa
K <sub>100</sub>	228	114
K <sub>80</sub> + PZ <sub>20</sub>	258	129
K <sub>73</sub> + PZ <sub>20</sub> + U <sub>5</sub> + Ç <sub>2</sub>	424	212

#### 4.4.2 Üç Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları

%5 oranında uçucu kül ve %1, %2 oranlarında çimento ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelere üç eksenli basınç deneyi uygulanarak kohezyon, kayma mukavemeti açısı ve kayma direnci değerleri bulunmuştur.



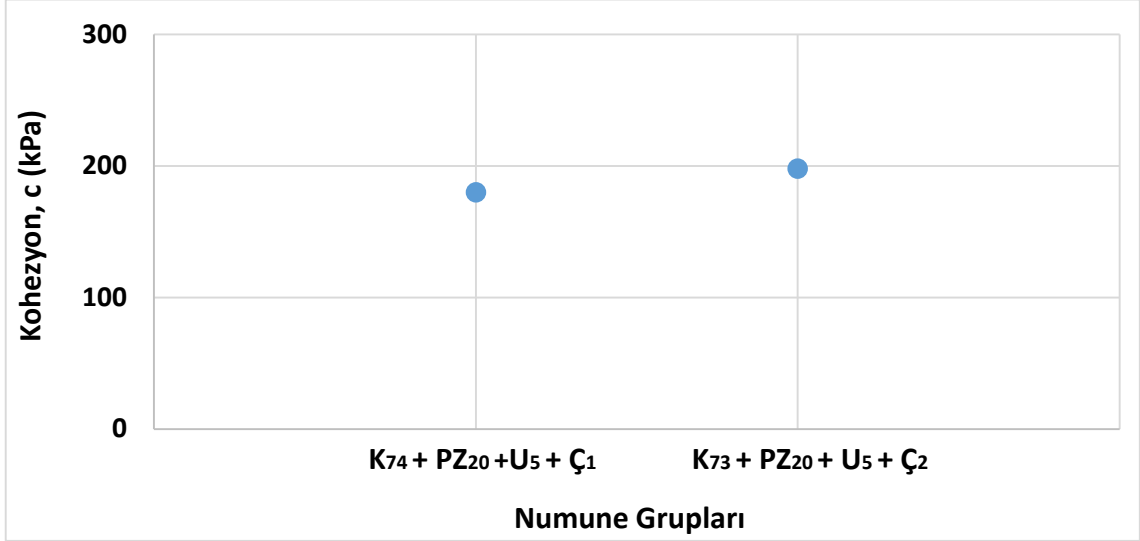
(a)



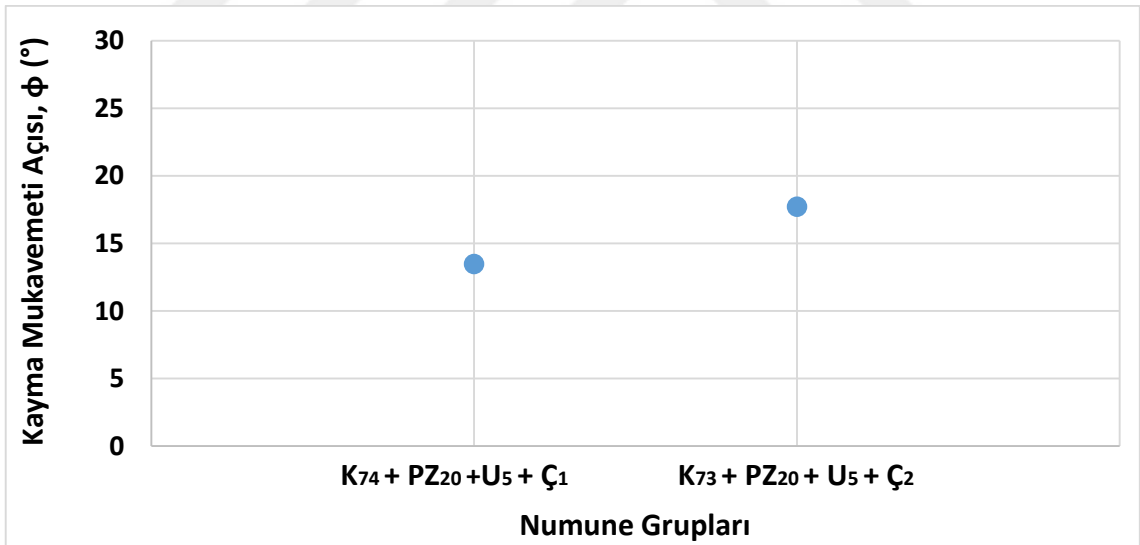
(b)

Şekil 4.49 Çimento ve uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin 50 kPa (a) ve 200 kPa (b) çevre basıncı etkisindeki gerilme - birim şekil değişirme grafiği

Deneysel çalışma sonucunda, çimento oranının artışı ile kohezyon, kayma mukavemeti açısı ve kayma direnci değerlerinde artış gözlenmiştir (Şekil 4.50, Şekil 4.51). %1 ve %2 oranlarında çimento ile harmanlanan karışım numunelerinin kohezyon değeri, katkısız kile göre %15 ve %26 oranlarında artış göstermiştir.

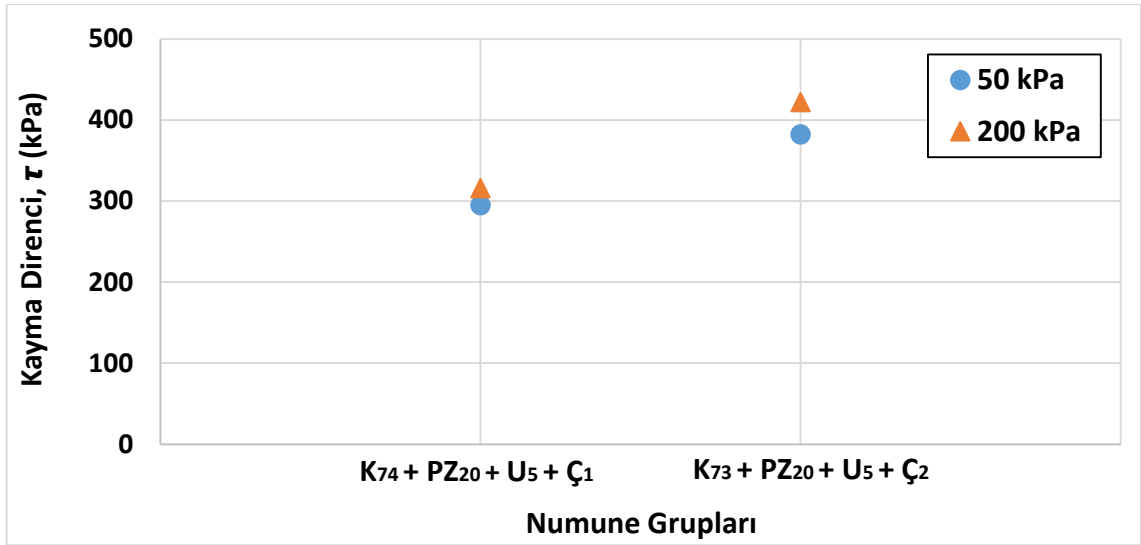


(a)



(b)

Şekil 4.50 Farklı oranlarda uçucu kül ve çimento ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin kohezyon (a) ve kayma mukavemeti açısı (b) grafikleri



Şekil 4.51 Farklı oranlarda uçucu kül ve çimento ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin 50 kPa ve 200 kPa çevre basıncı etkisindeki kayma direnci grafiği

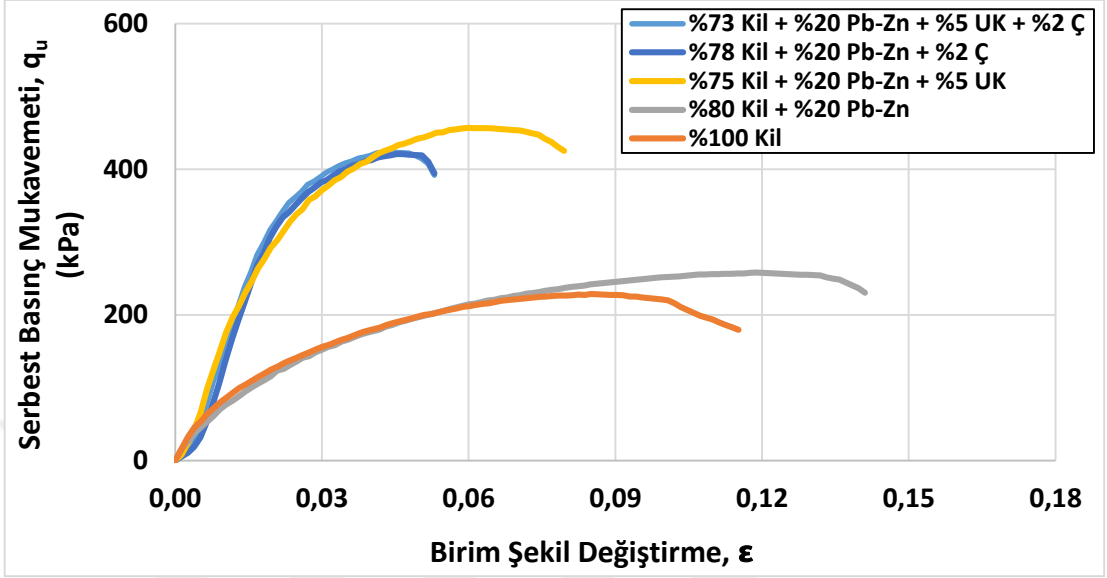
Üç eksenli basınç deneyleri sonucunda elde edilen parametreler, Çizelge 4.22’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.22 Çimento ve uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin üç eksenli basınç deneyi sonucunda elde edilen parametreleri

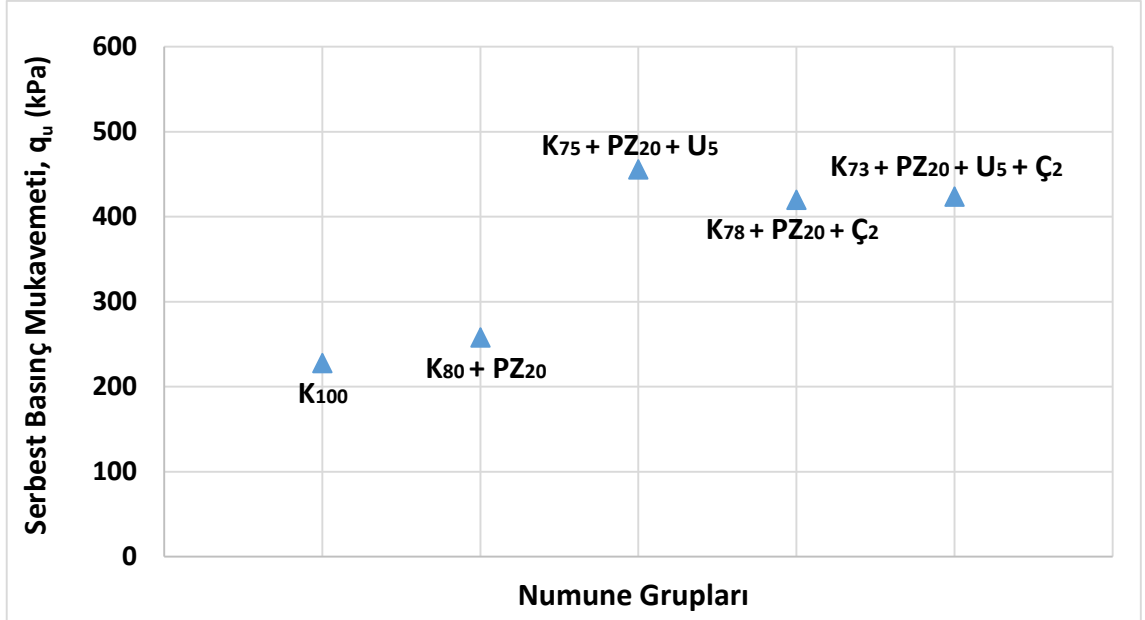
Numune Grupları	Deviatör Gerilme			Kohezyon, c kPa	Kayma Mukavemeti Açısı, $\phi$ °	Kayma Direnci, $\tau$	
	50 kPa	100 kPa	200 kPa			50 kPa	200 kPa
No							
K74 + PZ20 + U5 + Ç1	478	504	565	180	13	295	316
K73 + PZ20 + U5 + Ç2	575	659	701	198	18	382	422

Deneysel çalışmalar sonucunda yüksek plastisiteli bir kil zemine farklı oranlarda Pb-Zn, uçucu kül ve çimento ilave edilerek, kilin mukavemet özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. En yüksek mukavemet değerine %20 oranında Pb-Zn katkılı kil numunesinde ulaşılmıştır. Çalışmada, %20 oranında Pb-Zn katkısı referans değeri alınmış olup, %20 oranında Pb-Zn katkılı kil numunelerine %5 oranında uçucu kül ve %2 oranında çimento ilave edilerek serbest basınç ve üç eksenli basınç deneyi uygulanmıştır.

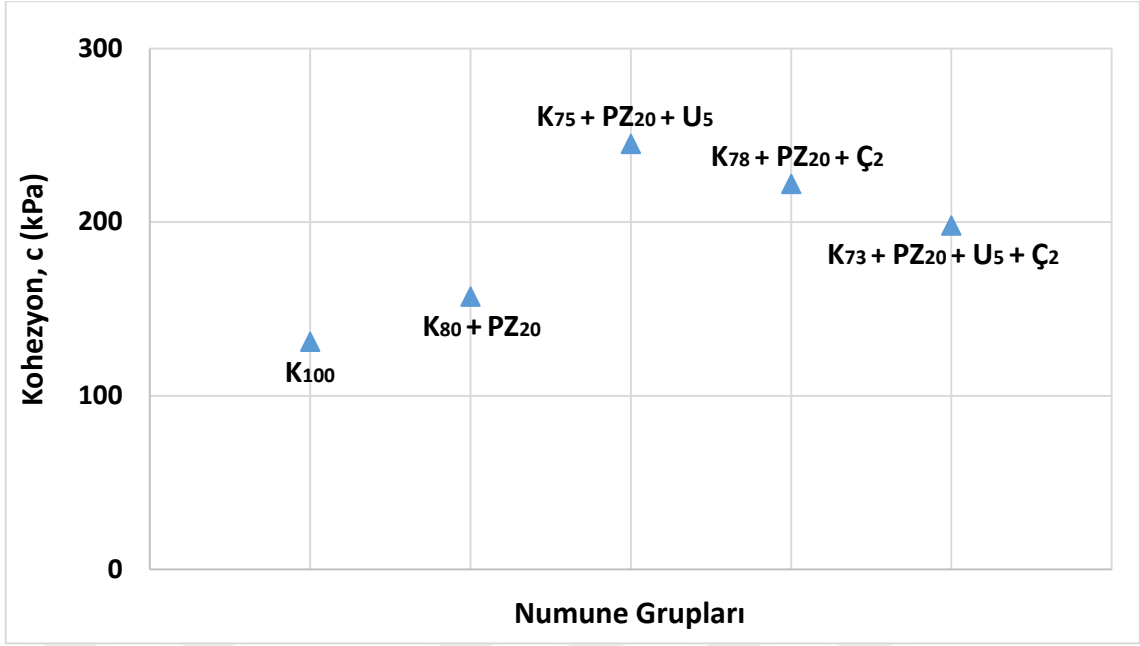
Deneyler sonucunda Pb-Zn, uçucu kül ve çimentonun, katkısız kil numunesinin mukavemet değerlerini %13, %100, %84 ve %86 oranlarında arttırdığı ortaya konmuştur (Şekil 4.52, Şekil 4.53, Şekil 4.54, Şekil 4.55).



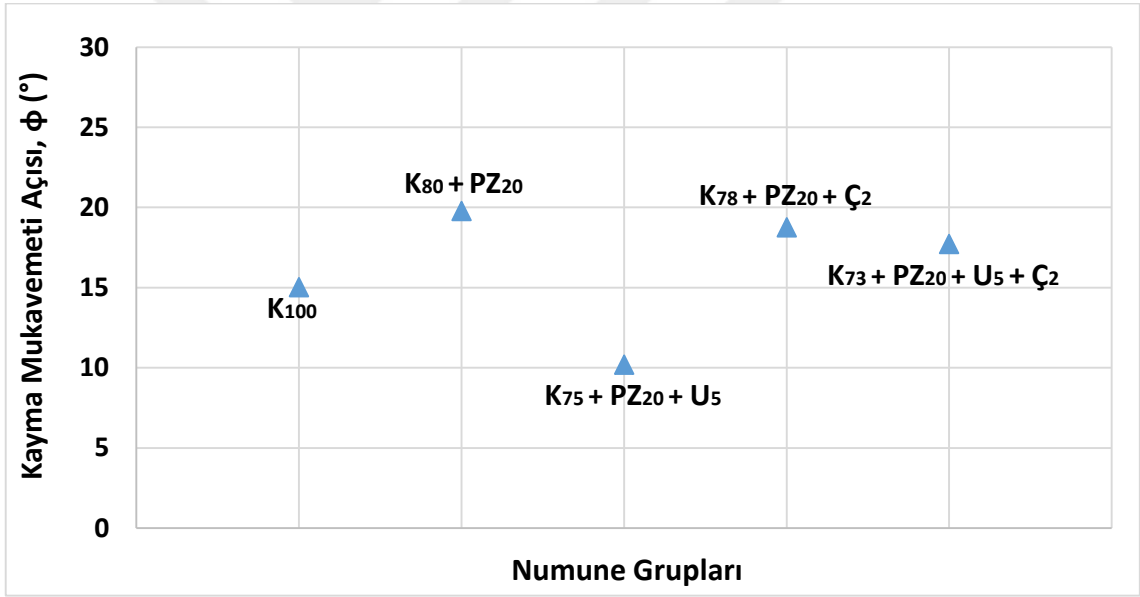
Şekil 4.52 Pb-Zn, uçucu kül ve çimento katkılı karışım numunelerinin serbest basınç mukavemet – birim şekil değişimi grafiği



Şekil 4.53 Pb-Zn, uçucu kül ve çimento katkılı karışım numunelerinin serbest basınç mukavemet – numune grupları grafiği



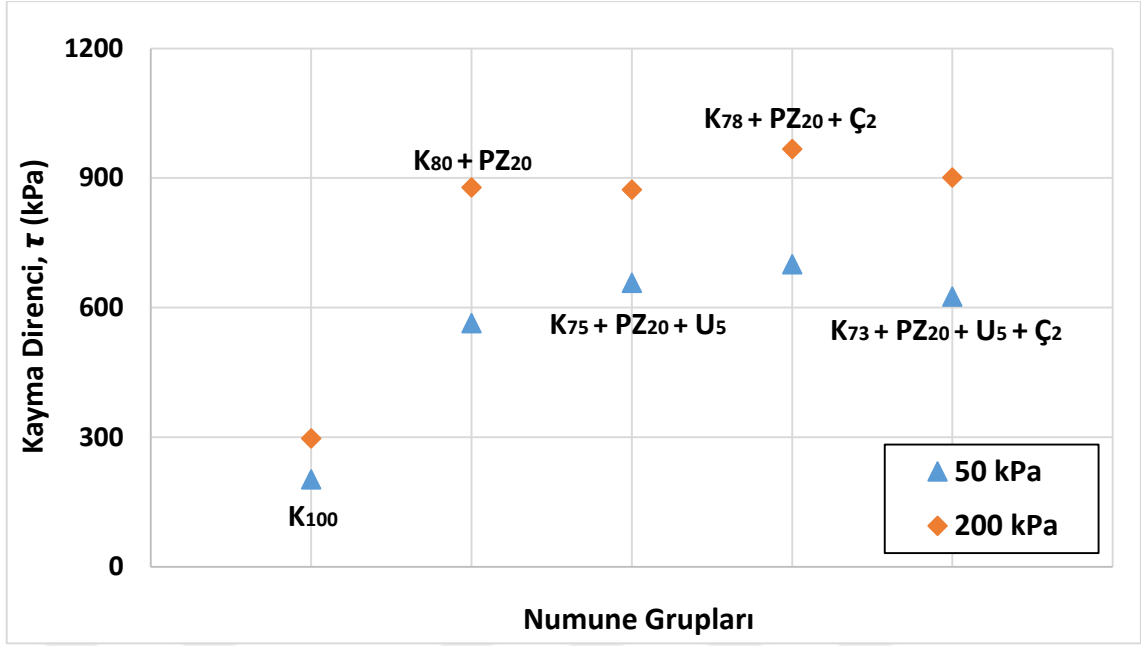
(a)



(b)

Şekil 4.54 Pb-Zn, uçucu kül ve çimento katkılı karışım numunelerinin kohezyon (a), kayma mukavemeti açısı (b) – numune grupları grafikleri





Şekil 4.55 Pb-Zn, uçucu kül ve çimento katkılı karışım numunelerinin 50 kPa ve 200 kPa çevre basıncı etkisindeki kayma direnci – numune grupları grafiği

#### 4.5 Mukavemet Deneyleri Sonucunda Kilde Elde Edilen İyileşme Oranları

Serbest basınç mukavemet deneyleri sonuçlarına göre %20 oranında Pb-Zn katkısı içeren kil numunesinde, katkısız kil numunesine göre %13 oranında mukavemet artışı gözlenmiştir. Daha sonra, Pb-Zn katkılı kil numunelere %5, %10, %20 oranlarında uçucu kül; %1,%2,%3 oranlarında çimento ilave edilerek serbest basınç mukavemet değerleri tayin olunmuştur. En yüksek serbest basınç mukavemet değerlerine %5 oranında uçucu kül ve %3 oranında çimento ilaveli Pb-Zn katkılı kil numunelerinde ulaşılmış olup, katkısız kile göre %100 ve %203 oranlarında iyileşme gözlenmiştir.

Deneyler sonucunda elde edilen serbest basınç mukavemet ve katkısız kile göre iyileşme oranı değerleri Çizelge 4.23’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.23 Uçucu kül ve çimento ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin serbest basınç mukavemet ve katkısız kile göre iyileşme oranı değerleri

Numune Grupları	Serbest Basınç Mukavemeti ( $q_u$ )	Drenajsız Kayma Mukavemeti, ( $c_u$ )	Katkısız kile göre iyileşme oranı
No	kPa	kPa	%
K <sub>100</sub>	228	114	-
K <sub>80</sub> + PZ <sub>20</sub>	258	129	13
K <sub>75</sub> + PZ <sub>20</sub> + U <sub>5</sub>	456	228	100
K <sub>70</sub> + PZ <sub>20</sub> + U <sub>10</sub>	286	143	25
K <sub>60</sub> + PZ <sub>20</sub> + U <sub>20</sub>	272	136	19
K <sub>79</sub> + PZ <sub>20</sub> + Ç <sub>1</sub>	364	182	60
K <sub>78</sub> + PZ <sub>20</sub> + Ç <sub>2</sub>	420	210	84
K <sub>77</sub> + PZ <sub>20</sub> + Ç <sub>3</sub>	690	345	203
K <sub>73</sub> + PZ <sub>20</sub> + U <sub>5</sub> + Ç <sub>2</sub>	424	212	86

Üç eksenli basınç deneyleri sonucuna göre, numune gruplarının katkısız kile göre kohezyon değerlerindeki artış oranı %20 ile %92 aralıklarındadır. Karışım numunelerinde Pb-Zn katkısı, uçucu kül ve çimento oranı arttıkça, kayma mukavemeti açısı değerlerinde artış gözlenmiştir. Literatürdeki araştırmalar sonucunda Rathan Raj, Banupriya ve Dharani [15]'in deneysel çalışmaları, bu tez çalışmasında üç eksenli basınç deneyleri sonucunda elde edilen kohezyon ve kayma mukavemeti açısı değerleri ilişkisini doğrulamaktadır. Elde edilen kohezyon değerleri, serbest basınç mukavemet deneyleri sonucunda elde edilen drenajsız kayma mukavemeti değerlerine benzerlik göstermektedir.

Deneysel çalışmada, en yüksek kohezyon değerlerine %5 oranında uçucu kül ve %3 oranında çimento ilaveli Pb-Zn katkılı kil numunelerinde ulaşılmış olup, katkısız kile göre %87 ve %92 oranlarında iyileşme gözlenmiştir. Serbest basınç ve üç eksenli basınç deneylerinde elde edilen kohezyon değerleri de birbirine benzerlik göstermektedir.

Deneysel çalışma sonucu elde edilen kohezyon, kayma mukavemeti açısı, kayma direnci ve iyileşme oranı değerleri Çizelge 4.24'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.24 Uçucu kül ve çimento ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin üç eksenli basınç deneyi parametreleri ve katkısız kile göre iyileşme oranı değerleri

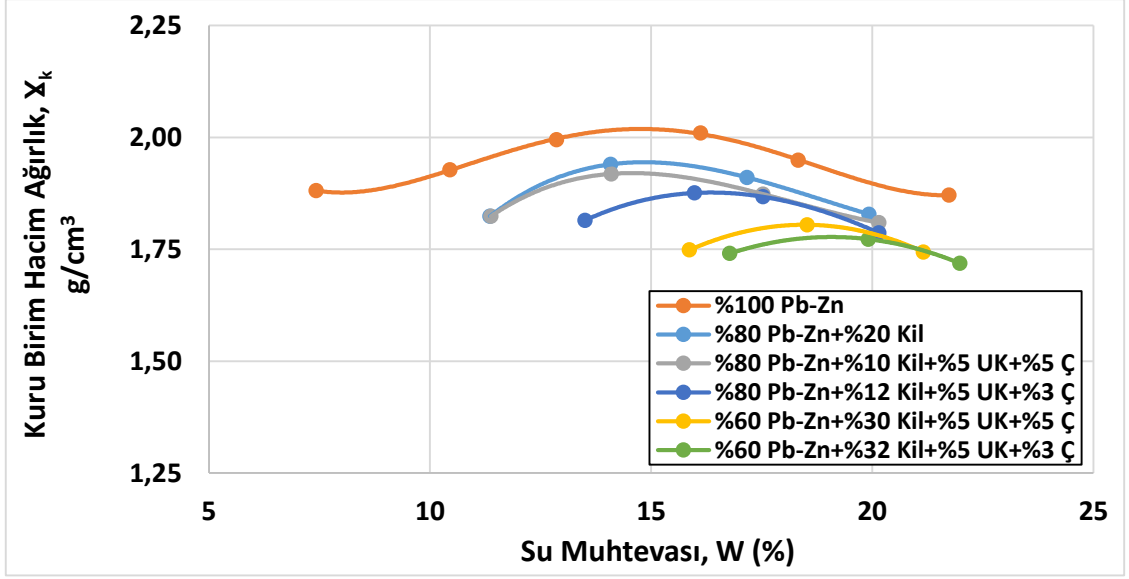
Numune Grupları	Kohezyon, c	Kayma Mukavemeti Açısı, $\phi$	Kayma Direnci, $\tau$		Katkısız Kile göre iyileşme Oranı
			50 kPa	200 kPa	
No	kPa	°			%
K100	131	15	202	297	-
K80 + PZ20	157	20	229	308	20
K75 + PZ20 + U5	245	10	354	366	87
K70 + PZ20 + U10	168	16	305	338	28
K79 + PZ20 + Ç1	180	18	252	314	37
K78 + PZ20 + Ç2	222	19	314	375	69
K77 + PZ20 + Ç3	252	20	360	432	92
K74 + PZ20 + U5 + Ç1	180	13	295	316	37
K73 + PZ20 + U5 + Ç2	198	18	382	422	51

#### 4.6 Pb-Zn madensel atık malzemesinin kil, uçucu kül ve çimento ile iyileştirilmesi

Deneysel çalışmanın bu safhasında, söz konusu Pb-Zn numunesinin doğada tek başına depolanması ve mukavemet özelliklerinin ne düzeyde iyileştirilebileceğini anlamak için, Pb-Zn numunesine %20, %40 oranlarında kil, %5 oranında uçucu kül ve %3, %5 oranlarında çimento ilave edilerek, Pb-Zn numunelerinin mukavemet özelliklerinin iyileştirilmesi araştırılmıştır. Pb-Zn içeren numunelere kompaksiyon, serbest basınç ve üç eksenli basınç deneyleri uygulanarak Pb-Zn numunesinin mukavemet değerlerinin artırılması ve yüksek miktarda Pb-Zn malzemesinin doğadan bertaraf edilmesi amaçlanmıştır.

##### 4.6.1 Kompaksiyon Deney Sonuçları

Pb-Zn numuneleri %5 oranında uçucu kül ile harmanlanıp, %3 ve %5 oranlarında çimento ilave edilerek kompaksiyon deneyi uygulanmıştır. Deney sonucunda, Pb-Zn ve çimento oranı arttıkça, maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinde artış, optimum su muhtevası değerlerinde ise düşüş gözlenmiştir (Şekil 4.56).



Şekil 4.56 Uçucu kül ve çimento ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin kuru birim hacim ağırlık – su muhtevası grafiği

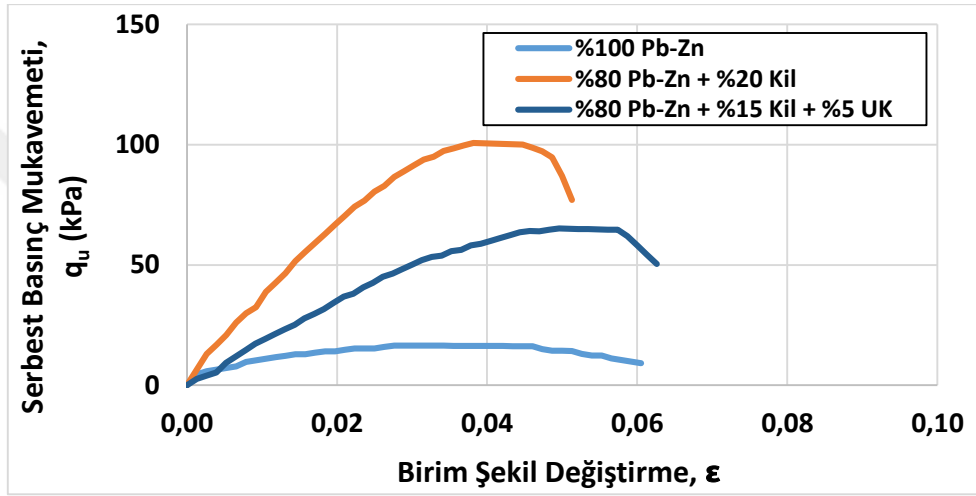
Kompaksiyon deneyleri sonucunda elde edilen deney sonuç verileri, Çizelge 4.25’de belirtilmiştir.

Çizelge 4.25 Uçucu kül ve çimento ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinin optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri

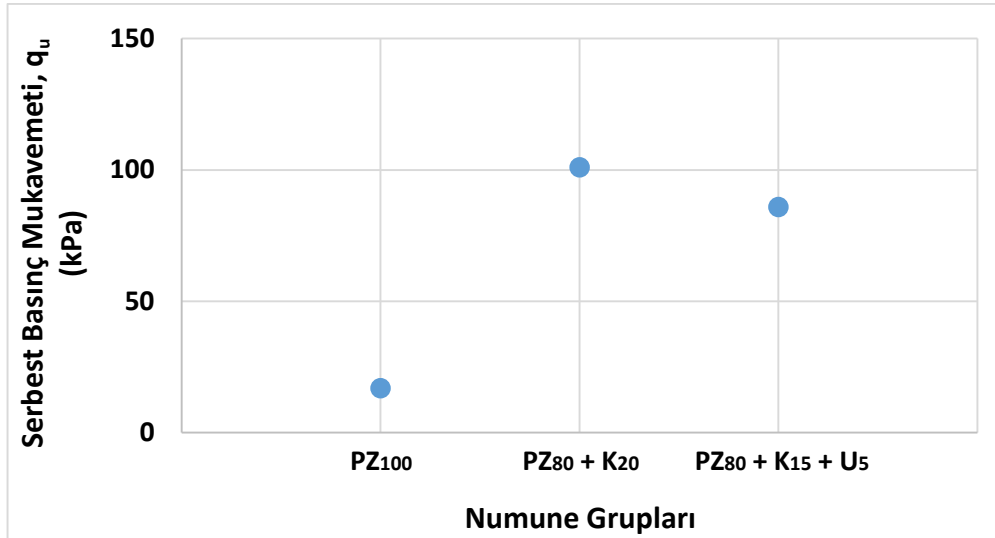
Numune Grupları No	Malzemeler, (%)				Optimum Su Muhtevası, %	Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık, $\gamma_k$
	Kil	Pb-Zn	Uçucu Kül	Çimento		
K32+PZ60+U5+Ç3	32	60	5	3	22,00	1,56
K30+PZ60+U5+Ç5	30	60	5	5	21,20	1,66
K12+PZ80+U5+Ç3	12	80	5	3	20,00	1,70
K10+PZ80+U5+Ç5	10	80	5	5	18,75	1,76
PZ80+K20	20	80	-	-	14,00	1,94
PZ100	-	100	-	-	12,00	2,01

#### 4.6.2 Serbest Basınç Deneyi Sonuçları

Deneyisel çalışmada, Pb-Zn numunesi %20 oranında kil ile harmanlandığında serbest basınç mukavemet değeri 101 kPa, %20 oranında kil ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunesine %5 oranında uçucu kül ilave edildiğinde ise serbest basınç mukavemet değeri 66 kPa değerine düşmüştür. Deneyisel çalışma sonucunda, 18 kPa serbest basınç mukavemet değerine sahip olan Pb-Zn numunesinin mukavemet değeri, katkısız Pb-Zn'ye göre %494 ve %288 oranlarında artış gösterdiği sonucuna varılmıştır (Şekil 4.57, Şekil 4.58).

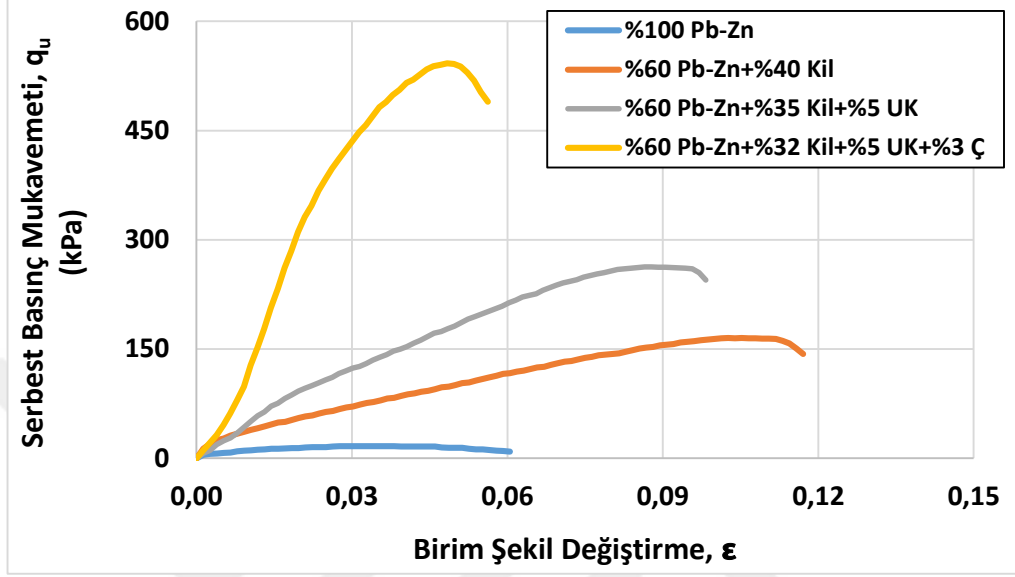


Şekil 4.57 %80 oranında Pb-Zn katkılı karışım numunelerinin serbest basınç mukavemet – birim şekil değiştirme grafiği

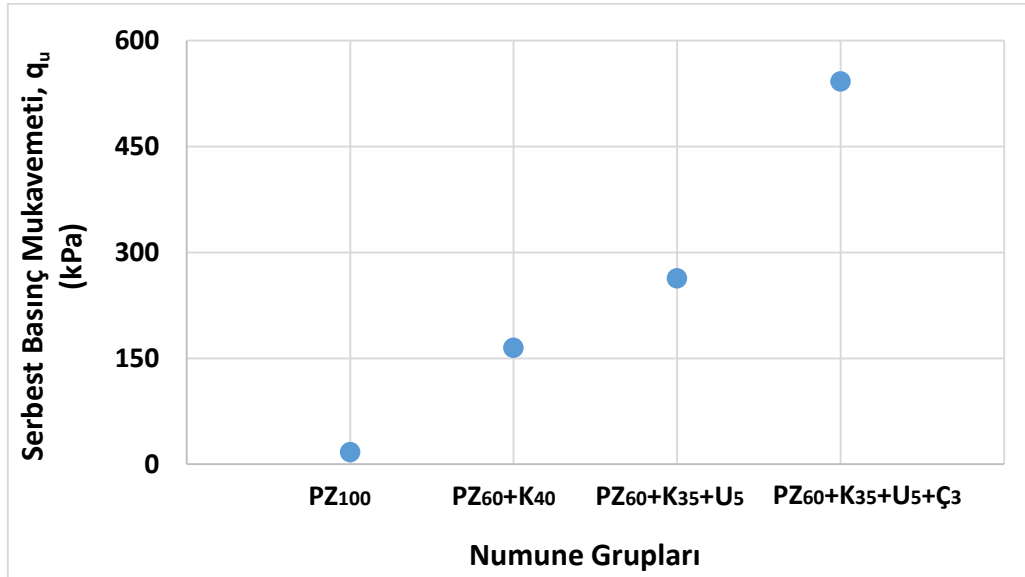


Şekil 4.58 %80 oranında Pb-Zn katkılı karışım numunelerinin serbest basınç mukavemet – numune grupları grafiği

Pb-Zn numunesi %40 oranında kil, %5 oranında uçucu kül ve %3 oranında çimento ile harmanlanarak elde edilen karışım numuneleri 164 kPa, 262 kPa ve 542 kPa serbest basınç mukavemet değerlerine sahip olmuşlardır. Katkısız Pb-Zn'ye göre %871, %1447 ve %3088 oranlarında mukavemet artışı gözlenmiştir (Şekil 4.59, Şekil 4.60).



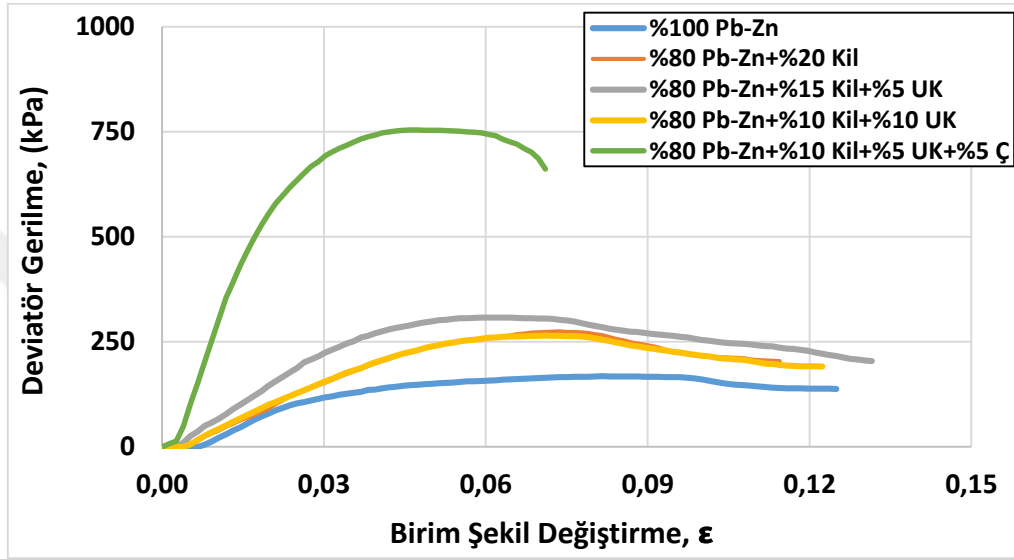
Şekil 4.59 %60 oranında Pb-Zn katkılı karışım numunelerinin katkısız Pb-Zn'ye göre serbest basınç mukavemet – birim şekil değişirme grafiği



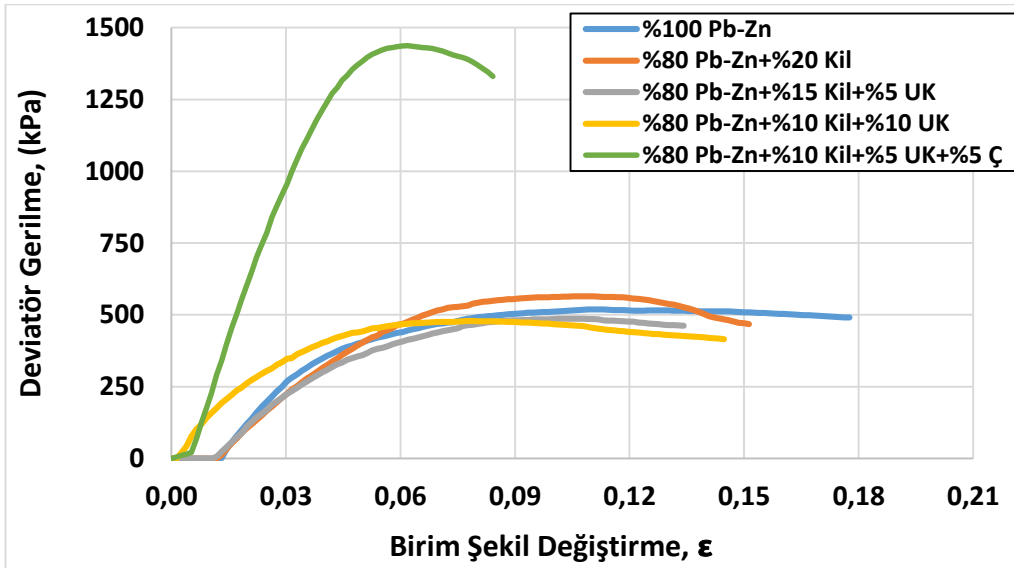
Şekil 4.60 %60 oranında Pb-Zn katkılı karışım numunelerinin serbest basınç mukavemet – numune grupları grafiği

#### 4.6.3 Üç Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları

Pb-Zn numunesi %20 oranında kil, %5 ve %10 oranında uçucu kül, %5 oranında çimento ile harmanlanarak elde edilen karışım numunelerine üç eksenli basınç deneyi uygulanmıştır. Çalışma sonucunda, en yüksek kohezyon ve kayma direnci değerine %5 oranında uçucu kül ve %5 oranında çimento katkılı karışım numunesinde ulaşılmıştır (Şekil 4.62, Şekil 4.63).

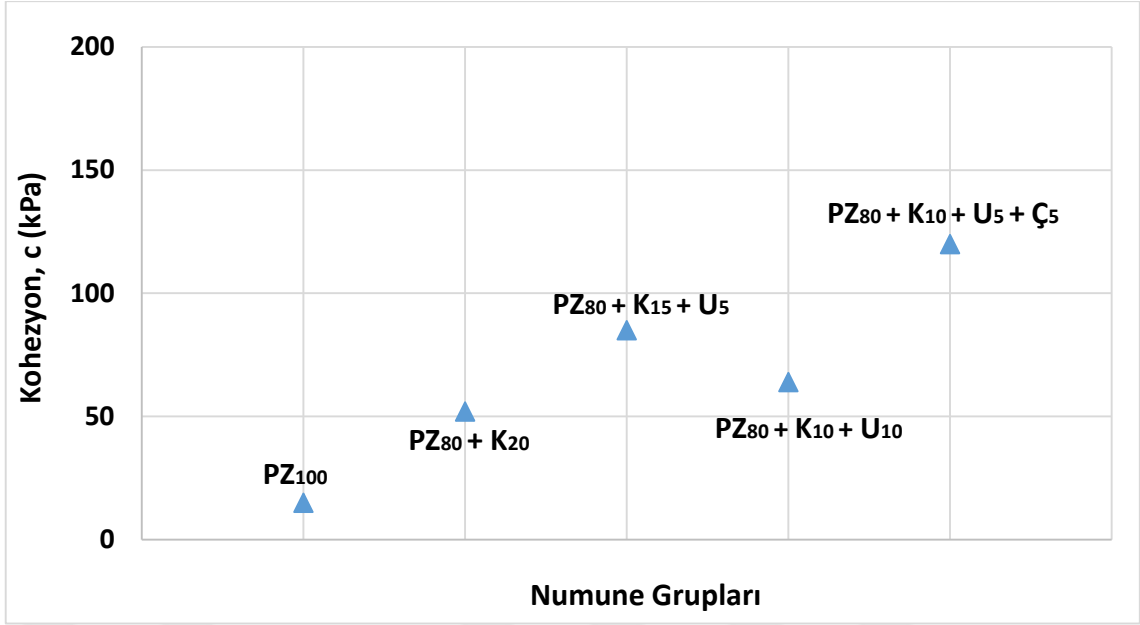


(a)

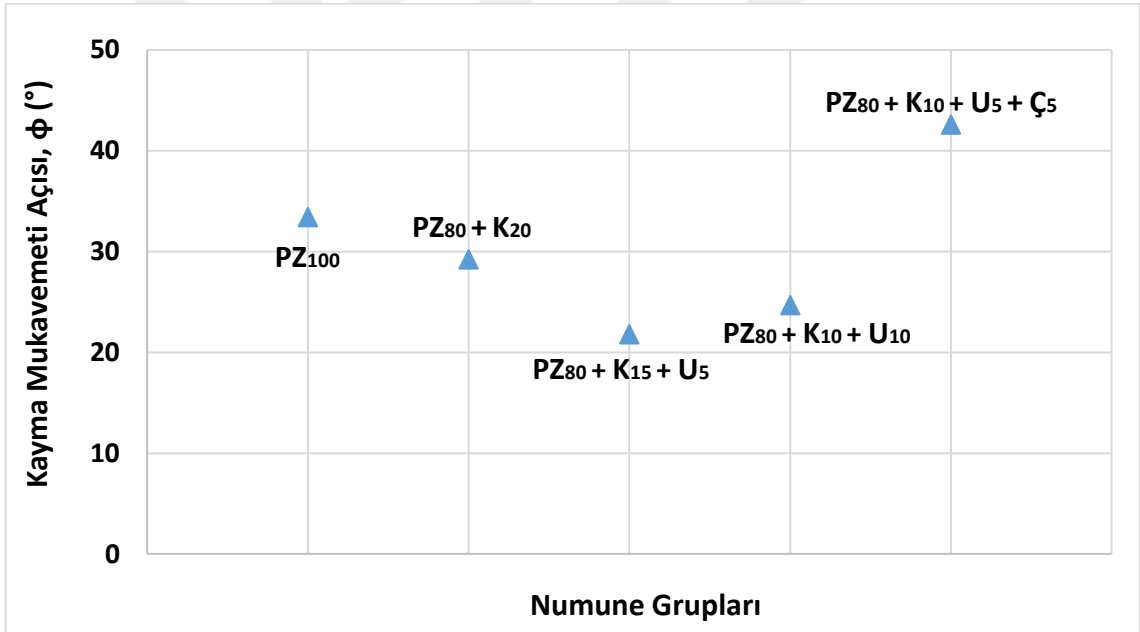


(b)

Şekil 4.61 Pb-Zn katkılı kil numunelerinin 50 kPa (a) ve 200 kPa (b) çevre basıncı altındaki deviator gerilme - şekil değişirme grafikleri



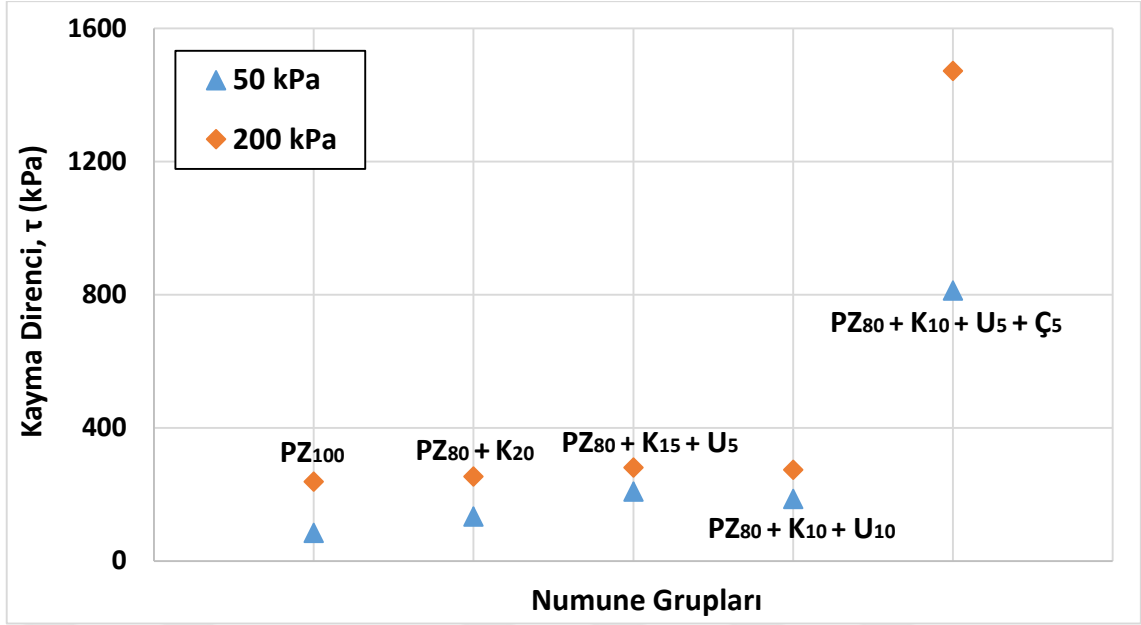
(a)



(b)

Şekil 4.62 Pb-Zn katkılı kil numunelerinin kohezyon (a), kayma mukavemeti açısı (b) – numune grupları grafikleri





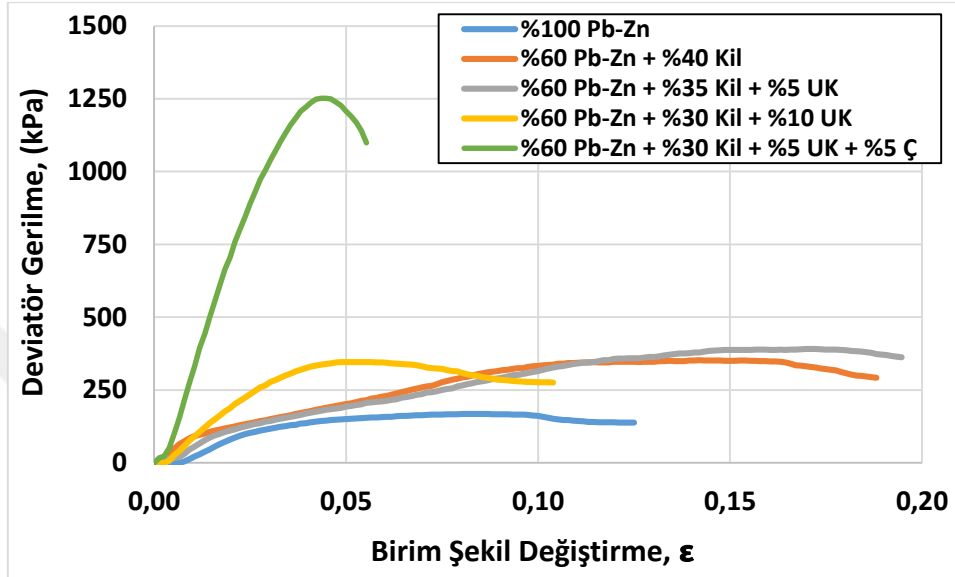
Şekil 4.63 Pb-Zn katkılı kil numunelerinin 50 kPa ve 200 kPa çevre basıncı etkisindeki kayma direnci – numune grupları grafiği

DeneySEL çalışma sonucu elde edilen üç eksenli basınç parametreleri Çizelge 4.26’da gösterilmiştir.

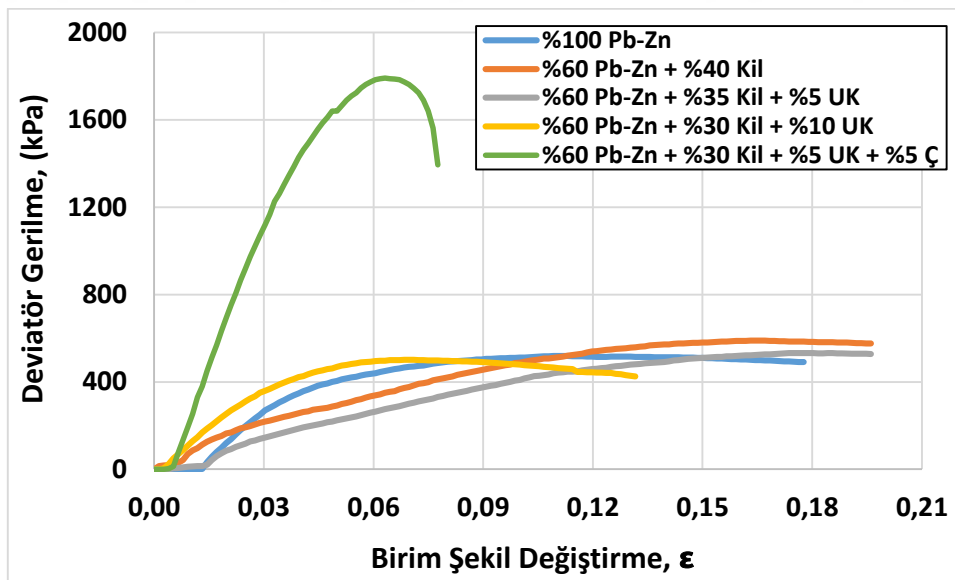
Çizelge 4.26 Pb-Zn katkılı kil numunelerinin üç eksenli basınç deneyi sonuçları

Numune Grupları	Deviatör Gerilme $\sigma_1 - \sigma_3$			Kohezyon, c kPa	Kayma Mukavemeti Açısı, $\phi$ °	Kayma Direnci, $\tau$	
	50 kPa	100 kPa	200 kPa			50 kPa	200 kPa
PZ <sub>100</sub>	168	-	520	15	33	84	238
PZ <sub>80</sub> + K <sub>20</sub>	275	-	565	52	29	133	254
PZ <sub>80</sub> + K <sub>15</sub> + U <sub>5</sub>	308	356	487	85	22	208	280
PZ <sub>80</sub> + K <sub>10</sub> + U <sub>10</sub>	265	334	479	64	25	186	274
PZ <sub>80</sub> + K <sub>10</sub> + U <sub>5</sub> + Ç <sub>5</sub>	754	1004	1437	120	43	812	1472

Deneysel çalışmada, Pb-Zn numunesi %40 oranında kil, %5 ve %10 oranında uçucu kül, %5 oranında çimento ile harmanlanarak elde edilen karışım numunelerine üç eksenli basınç deneyi uygulanmıştır. Çalışma sonucunda, en yüksek kohezyon ve kayma direnci değerine %5 oranında uçucu kül ve %5 oranında çimento katkılı karışım numunesinde ulaşılmıştır (Şekil 4.65, Şekil 4.66).

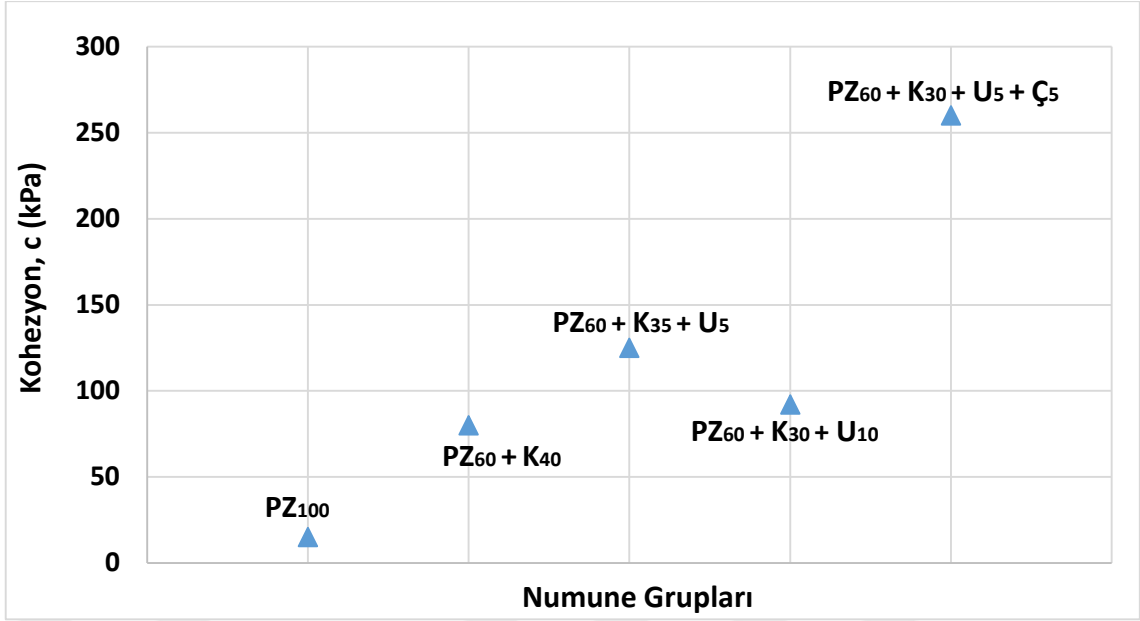


(a)

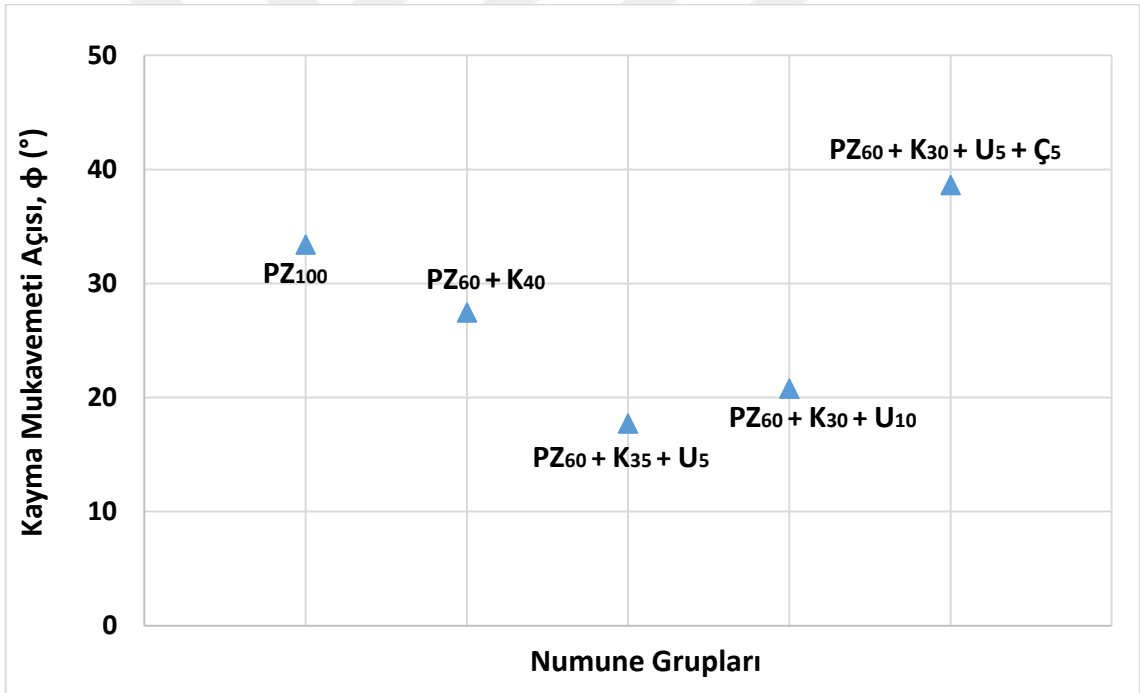


(b)

Şekil 4.64 Pb-Zn katkılı karışım numunelerinin 50 kPa (a) ve 200 kPa (b) çevre basıncı altındaki deviatör gerilme - şekil değiştirme grafikleri

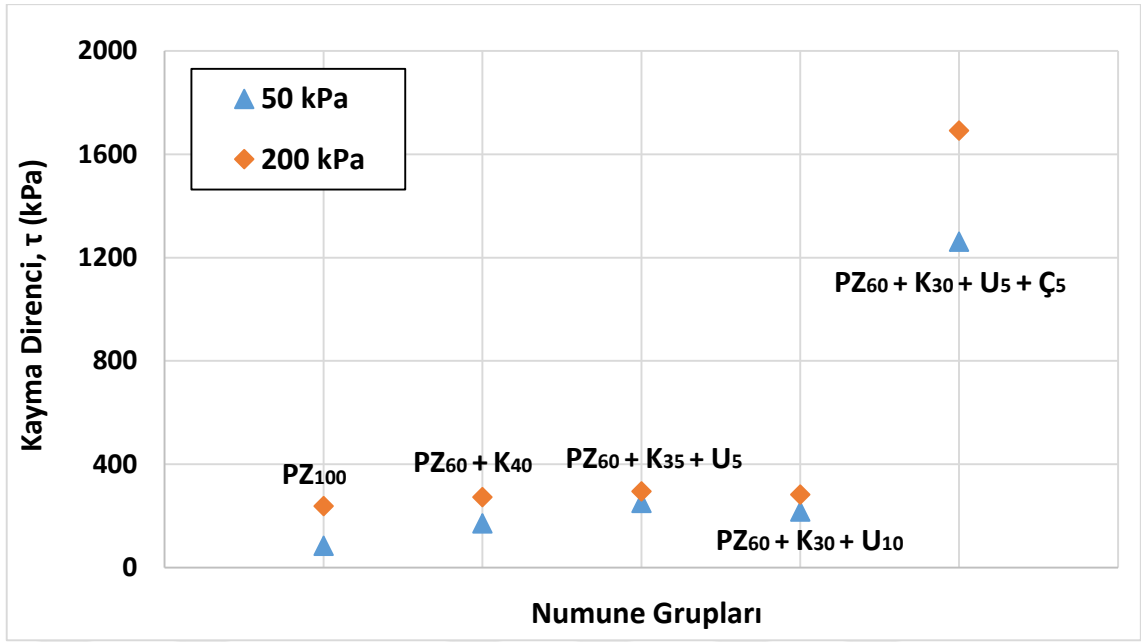


(a)



(b)

Şekil 4.65 Pb-Zn katkılı karışım numunelerinin kohezyon (a), kayma mukavemeti açısı (b) – numune grupları grafikleri



Şekil 4.66 Pb-Zn katkılı kil numunelerinin 50 kPa ve 200 kPa çevre basıncı etkisindeki kayma direnci – numune grupları grafiği

Deneysel çalışma sonucu elde edilen üç eksenli basınç parametreleri Çizelge 4.27'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.27 Pb-Zn katkılı kil numunelerin üç eksenli basınç deneyinden elde edilen sonuçlar

Numune Grupları	Deviatör Gerilme $\sigma_1 - \sigma_3$			Kohezyon, c kPa	Kayma Mukavemeti Açısı, $\phi$ °	Kayma Direnci, $\tau$	
	50 kPa	100 kPa	200 kPa			50 kPa	200 kPa
PZ100	168	-	520	15	33	84	238
PZ60 + K40	351	416	590	80	27	171	272
PZ60 + K35 + U5	391	432	532	125	18	250	295
PZ60 + K30 + U10	327	398	501	92	21	216	282
PZ60 + K30 + U5 + Ç5	1252	1438	1790	260	39	1261	1691

#### 4.7 Mukavemet Deneyleri Sonucunda Pb-Zn Numunelerindeki İyileşme Oranları

Deneysel çalışmada Pb-Zn malzemesi kil ile harmanlanarak, katkısız Pb-Zn'nin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Deneyler sonucunda, %20 oranında kil ile harmanlanan Pb-Zn karışım numunesinin serbest basınç mukavemet değeri, katkısız Pb-Zn karışım numunesine göre %494 oranında artış göstererek, Pb-Zn malzemesinin önemli oranda iyileştirilebileceği sonucuna varılmıştır.

Pb-Zn numunelerine uçucu kül ve çimento ile ilave edilerek mukavemet özelliklerinin daha çok iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Deney sonuçlarına göre uçucu kül ve çimento ile harmanlanan Pb-Zn katkılı karışım numunelerinin, katkısız Pb-Zn karışım numunesine göre serbest basınç mukavemet değerlerinde görülen iyileşme oranı %288 ve %6088 değer aralığındadır (Çizelge 4.28).

Çizelge 4.28 Kil, uçucu kül ve çimento ile harmanlanan Pb-Zn numunelerinin serbest basınç mukavemet ve katkısız Pb-Zn malzemesine göre iyileşme oranı değerleri

Numune Grupları	Serbest Basınç Mukavemeti ( $q_u$ )	Drenajsız Kayma Mukavemeti, ( $c_u$ )	Katkısız Pb-Zn'ye göre iyileşme oranı
No	kPa	kPa	%
PZ <sub>100</sub>	18	9	-
PZ <sub>80</sub> + K <sub>20</sub>	102	51	494
PZ <sub>80</sub> + K <sub>15</sub> + U <sub>5</sub>	66	33	288
PZ <sub>60</sub> + K <sub>40</sub>	164	82	871
PZ <sub>60</sub> + K <sub>35</sub> + U <sub>5</sub>	262	131	1447
PZ <sub>60</sub> + K <sub>30</sub> + U <sub>10</sub>	202	101	1094
PZ <sub>60</sub> + K <sub>32</sub> + U <sub>5</sub> + Ç <sub>3</sub>	542	271	3088
PZ <sub>60</sub> + K <sub>30</sub> + U <sub>5</sub> + Ç <sub>5</sub>	1052	526	6088

Üç eksenli basınç deneylerinde, Pb-Zn numunelerine kil, uçucu kül ve çimento ilave edilerek elde edilen kohezyon değeri, katkısız Pb-Zn numunesinin kohezyon değerine göre %247 ve %1633 oran aralıklarında artış göstermiştir. Deneysel çalışmada, en yüksek kohezyon değerlerine %5 oranında uçucu kül ve %5 oranında çimento ilave edilmiş Pb-Zn katkılı kil numunelerinde ulaşılmış olup, katkısız Pb-Zn'ye göre %700 ve %1633 oranlarında iyileşme gözlenmiştir.

Bu değerler de Pb-Zn malzemesinin kil, uçucu kül ve çimento ile harmanlanarak, mukavemet özelliklerinin önemli oranda iyileştirilebileceği sonucunu ortaya koymuştur. Pb-Zn katkı malzemesinin iyileştirilmesi amacıyla yapılan deneyler sonucu elde edilen kayma gerilmesi, kohezyon, kayma mukavemeti açısı ve katkısız Pb-Zn'ye iyileşme oranı değerleri Çizelge 4.29'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.29 Kil, uçucu kül ve çimento ile harmanlanan Pb-Zn numunelerinin üç eksenli basınç deneyi parametreleri ve katkısız Pb-Zn'ye göre iyileşme oranı değerleri

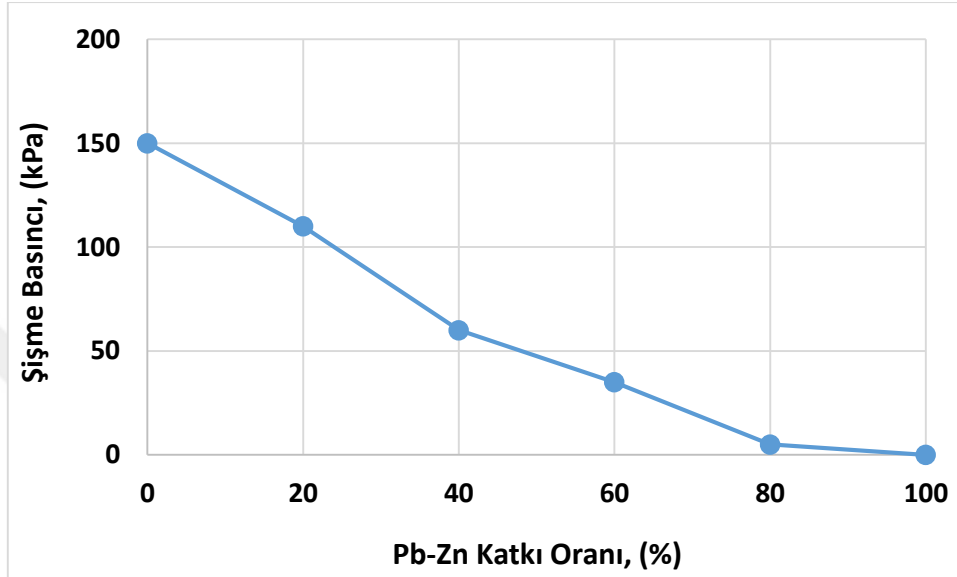
Numune Grupları	Kohezyon, c	Kayma Mukavemeti Açısı, $\phi$	Kayma Direnci, $\tau$		Katkısız Pb-Zn'ye göre iyileşme Oranı
			50 kPa	200 kPa	
No	kPa	°			%
PZ100	15	33	84	238	-
PZ80 + K20	52	29	133	254	247
PZ80 + K15 + U5	85	22	208	280	467
PZ80 + K10 + U10	64	25	186	274	327
PZ80 + K10 + U5 + Ç5	120	43	812	1472	700
PZ60 + K40	80	27	171	272	433
PZ60 + K35 + U5	125	18	250	295	733
PZ60 + K30 + U10	92	21	216	282	513
PZ60 + K30 + U5 + Ç5	260	39	1261	1691	1633

#### 4.8 Şişme Basıncı ve Konsolidasyon Deneyi Sonuçları

Pb-Zn katkı malzemesinin, kil numunelerindeki şişme basıncı özelliklerine olan etkisinin incelenmesi amacıyla şişme basıncı deneyi yapılmıştır. Şişme basıncı deneyinde, ödometre konsolidasyon cihazına yerleştirilen Pb-Zn katkılı kil numunelerine, küçük ağırlık yükleri verildiğinde, suya maruz kalan karışım numunelerinde önce oturma, daha sonra da şişme gerçekleşir. Şişmenin sönümlendiği noktadaki değer, karışım numunesinin şişme basıncı olarak kaydedilir. Daha sonrasında, kademeli yükleme ile konsolidasyon deneyi gerçekleştirilir.

Katkısız kil numunesi için uygulanan deneysel işlemde, kil şişme davranışı göstermiş olup, şişme basıncı aralığının 150 – 200 kPa değer aralığında olduğu bulunmuştur. Pb-Zn katkı malzemesinden oluşan zemin numunesinde de şişme gözlenmediği için, şişme basıncı 0 kPa olarak tayin edilmiştir.

Şişme basıncı deney sonuçlarına göre, Pb-Zn katkılı kil numunelerindeki Pb-Zn katkı oranının artış göstermesiyle, şişme basıncı değerleri düşüş göstermiştir (Şekil 4.67). Literatürde, Ünver [16]'in deneysel çalışması sonucunda elde edilen şişme basıncı – katkı oranı grafiği, bu tez çalışmasındaki şişme basıncı – Pb-Zn katkı oranı grafiği ile benzerlik göstermektedir.



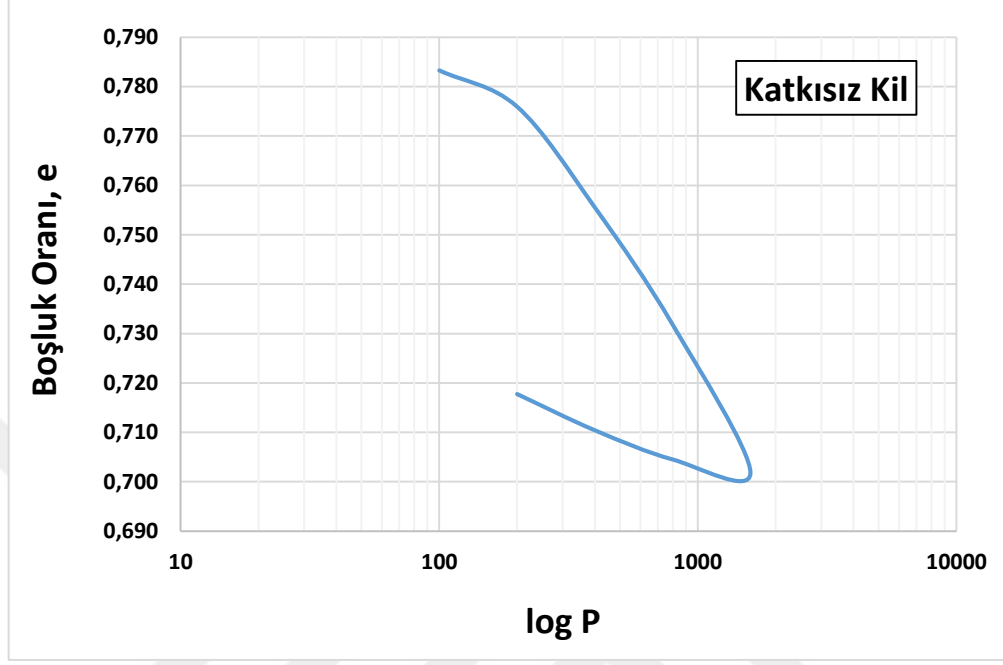
Şekil 4.67 Pb-Zn katkısı ile harmanlanan kil numunelerinin şişme basıncı – Pb-Zn katkı oranı grafiği

Şişme basıncı deneyi sonucunda elde edilen şişme basıncı değerleri Çizelge 4.30'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.30 Farklı oranlarda harmanlanan zemin numunelerinin şişme basıncı değerleri

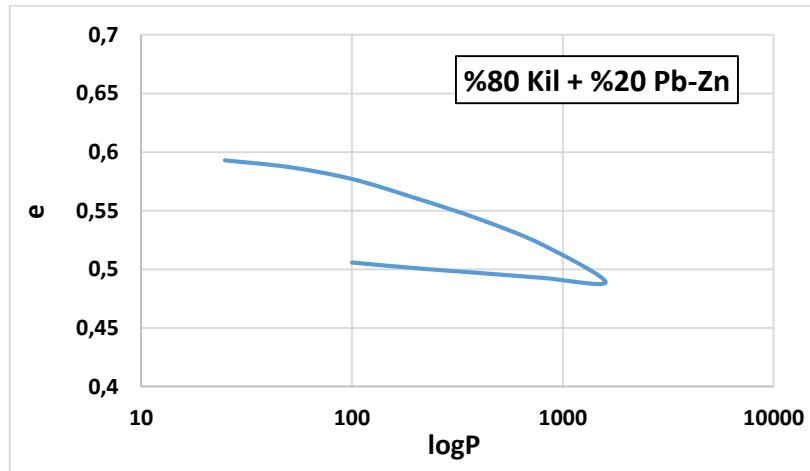
Numune Grupları	Kil (%)	Pb-Zn (%)	Uçucu Kül (%)	Şişme Basıncı Değeri (kPa)
No				
K <sub>100</sub>	100	-	-	150
K <sub>80</sub> + PZ <sub>20</sub>	80	20	-	110
K <sub>60</sub> + PZ <sub>40</sub>	60	40	-	60
K <sub>40</sub> + PZ <sub>60</sub>	40	60	-	35
K <sub>20</sub> + PZ <sub>80</sub>	20	80	-	5
PZ <sub>100</sub>	-	100	-	0
K <sub>80</sub> + PZ <sub>20</sub> + U <sub>5</sub>	75	20	5	125

Optimum su muhtevasında kompakte edilmiş kompaksiyon kalıbından elde olunan katkısız kil numunesine uygulanan konsolidasyon deneyi sonucunda oluşan e-logP grafiği Şekil 4.68’de belirtilmiştir.



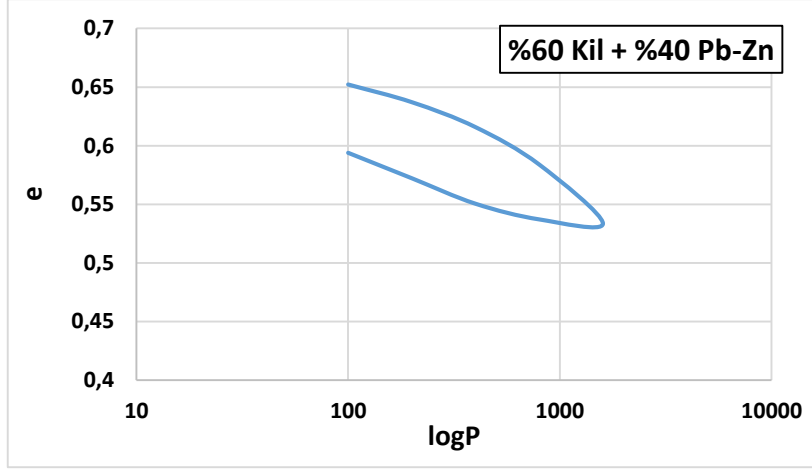
Şekil 4.68 Katkısız kil numunesinin e-log P grafiği

Pb-Zn katkılı kil numunelere konsolidasyon deneyi uygulanmış ve e-logP grafikleri çizilmiştir. Bu grafiklere göre Pb-Zn katkılı kil numunelerinde, Pb-Zn katkı oranı arttıkça sıkışma indisi eğimi azalmıştır. Bu durum, katkı oranı arttıkça, şişme basıncı değerlerinin düşüş göstermesini deneysel olarak desteklemektedir (Şekil 4.69, Şekil 4.70, Şekil 4.71, Şekil 4.72, Şekil 4.73, Şekil 4.74).

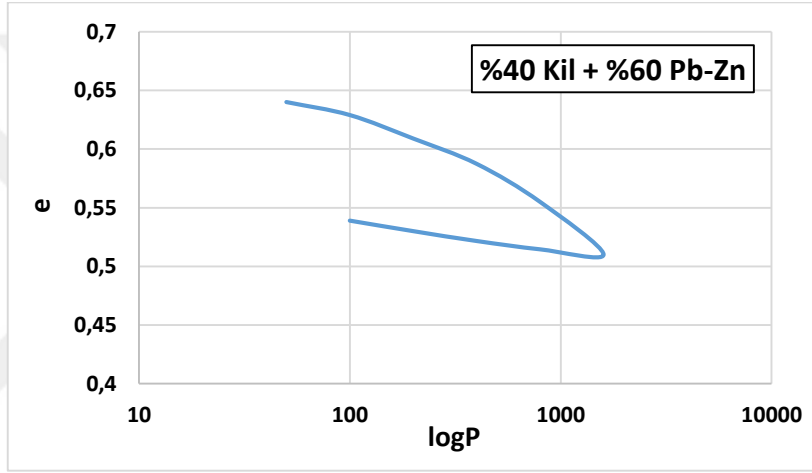


Şekil 4.69 %20 oranında Pb-Zn katkılı kil numunesinin e-logP grafiği

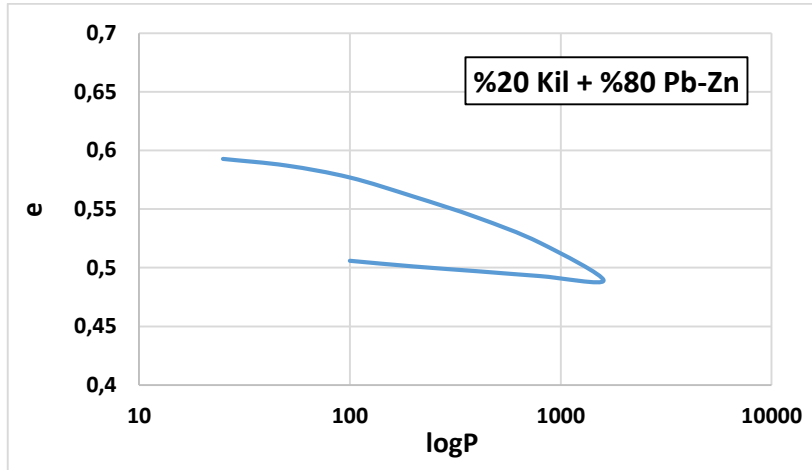




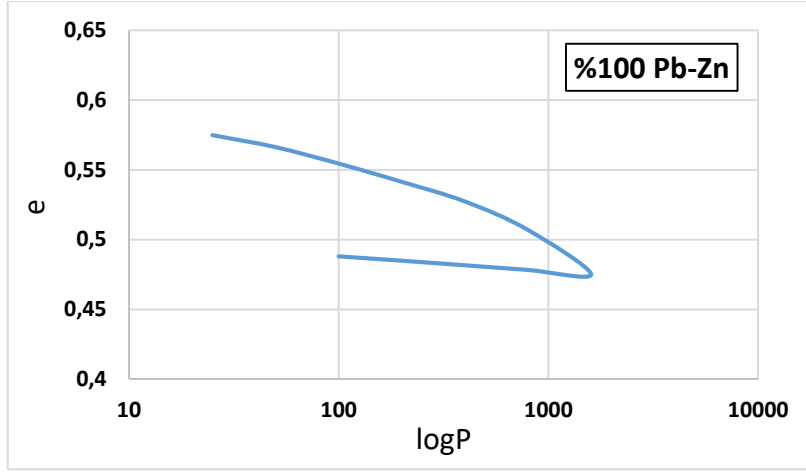
Şekil 4.70 %40 oranında Pb-Zn katkılı kil numunesinin e-logP grafiği



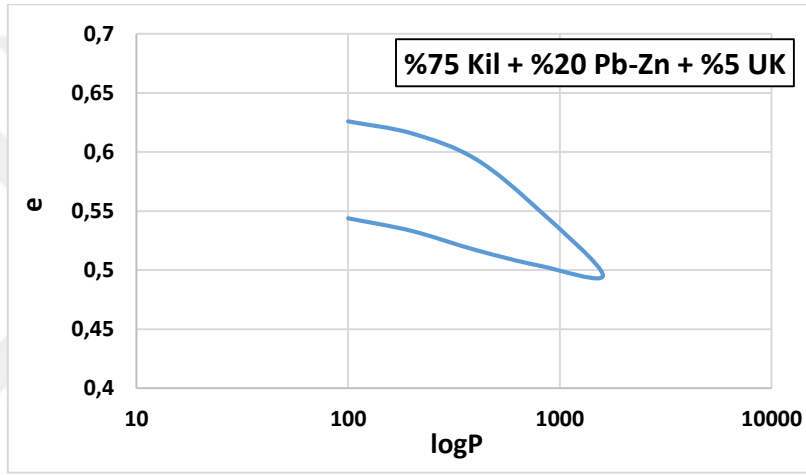
Şekil 4.71 %60 oranında Pb-Zn katkılı kil numunesinin e-logP grafiği



Şekil 4.72 %80 oranında Pb-Zn katkılı kil numunesinin e-logP grafiği

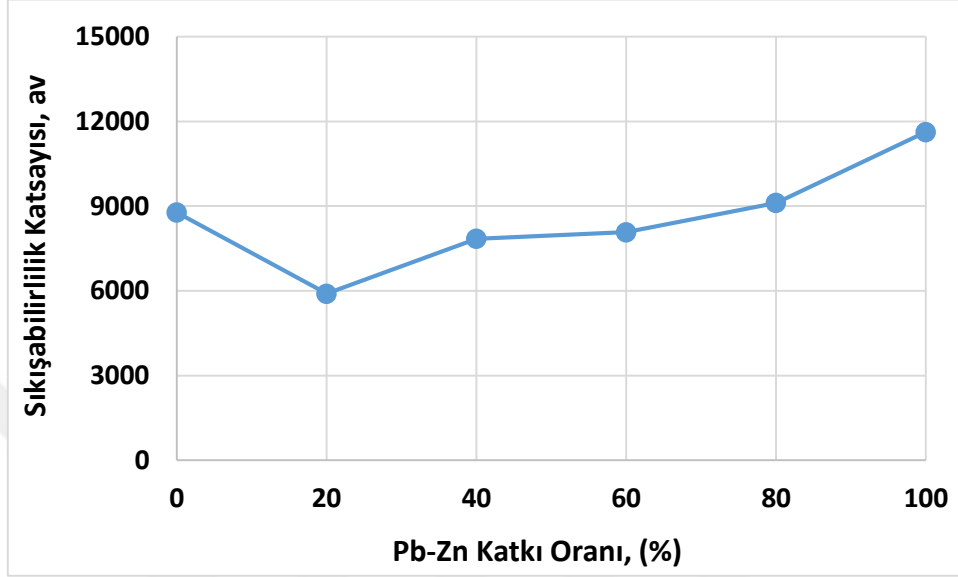


Şekil 4.73 Katkısız Pb-Zn numunesinin e-logP grafiği

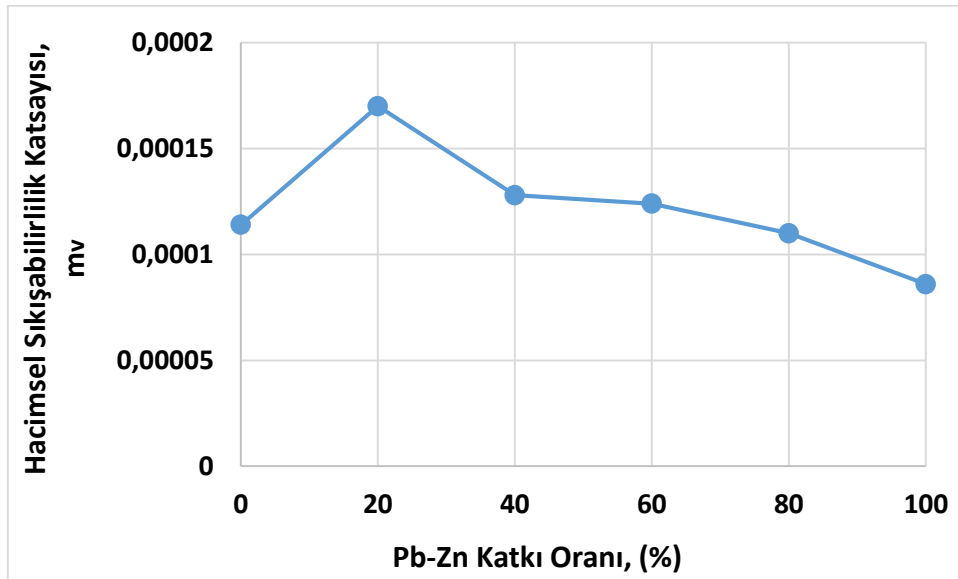


Şekil 4.74 %5 oranında uçucu kül ve %20 oranında Pb-Zn katkılı kil numunesinin e-logP grafiği

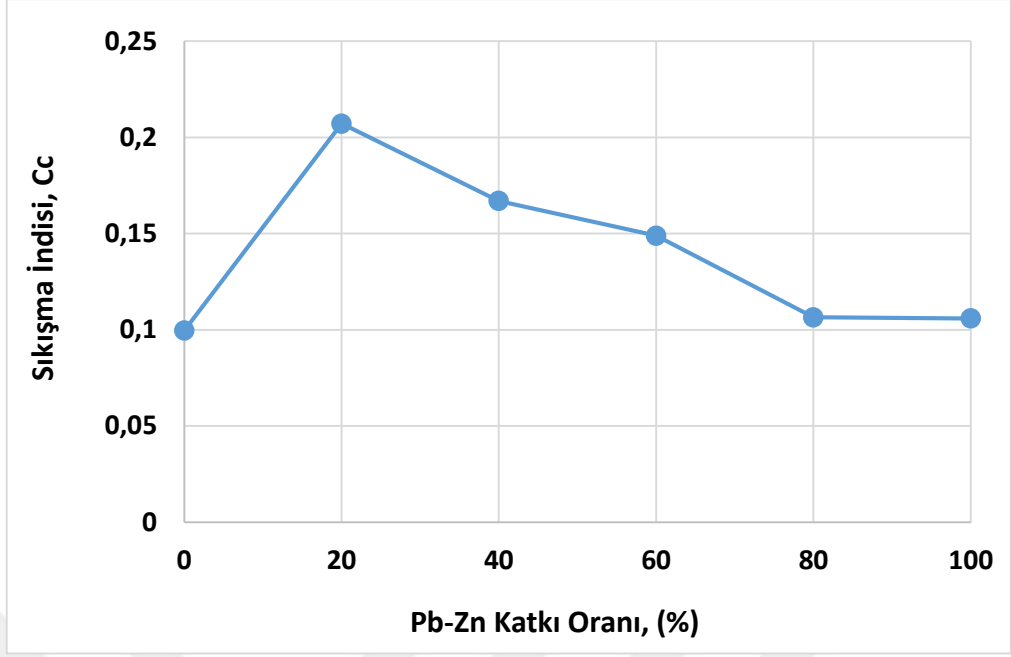
Deneysel çalışma sonucunda, Pb-Zn katkılı kil numunelerindeki Pb-Zn katkı oranı arttıkça sıkışabilirlik katsayısı değerlerinde artış (Şekil 4.75) ; hacimsel sıkışabilirlik katsayısı, sıkışma ve şişme indisi değerlerinde de azalma gözlenmiştir (Şekil 4.76, Şekil 4.77, Şekil 4.78).



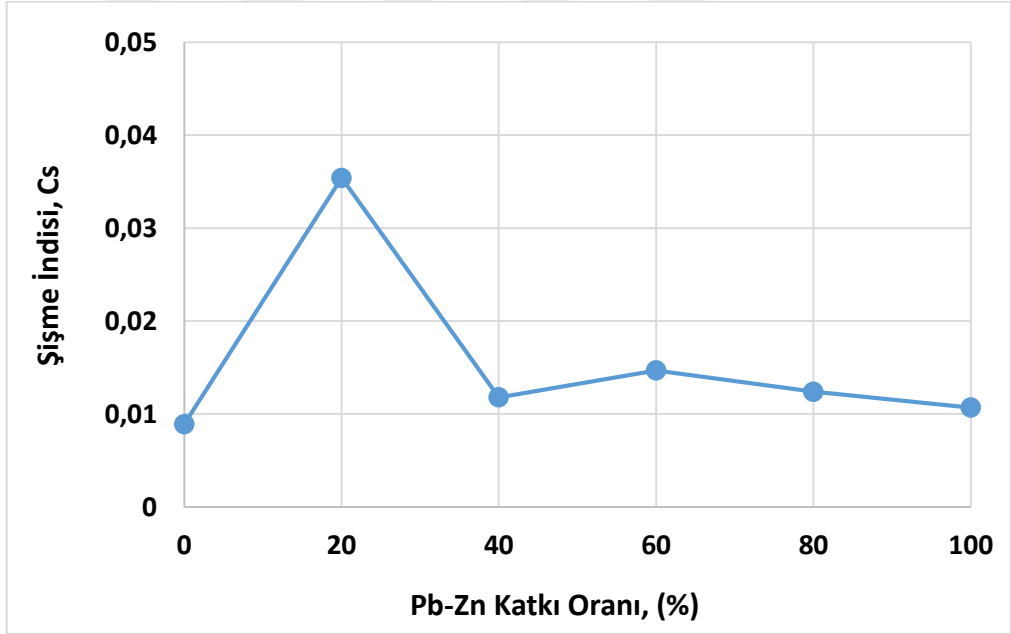
Şekil 4.75 Pb-Zn katkılı kil numunelerinin sıkışabilirlik katsayısı – Pb-Zn katkı oranı grafiği



Şekil 4.76 Pb-Zn katkılı kil numunelerinin hacimsel sıkışabilirlik katsayısı – Pb-Zn katkı oranı grafiği



Şekil 4.77 Pb-Zn katkılı kil numunelerinin sıkışma indisi – Pb-Zn katkı oranı grafiği



Şekil 4.78 Pb-Zn katkılı kil numunelerinin şişme indisi – Pb-Zn katkı oranı grafiği

Konsolidasyon deneyleri sonucunda elde edilen sıkışabilirlik, hacimsel sıkışabilirlik, sıkışma ve şişme indisi değerleri Çizelge 4.31’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.31 Pb-Zn katkılı kil numunelerinin konsolidasyon parametreleri

	Sıkışabilirlik katsayısı	Hacimsel Sıkışabilirlik Katsayısı	Sıkışma İndisi	Şişme İndisi
Numune Grupları	$a_v$	$m_v$	$C_c$	$C_s$
K <sub>100</sub>	8771,93	0,000114	0,0996	0,0089
K <sub>80</sub> + PZ <sub>20</sub>	5899,71	0,000170	0,2072	0,0354
K <sub>60</sub> + PZ <sub>40</sub>	7843,14	0,000128	0,1670	0,0118
K <sub>40</sub> + PZ <sub>60</sub>	8075,91	0,000124	0,1489	0,0147
K <sub>20</sub> + PZ <sub>80</sub>	9111,62	0,000110	0,1065	0,0124
PZ <sub>100</sub>	11627,91	0,000086	0,1059	0,0107
K <sub>75</sub> + PZ <sub>20</sub> + U <sub>5</sub>	7633,59	0,000131	0,1817	0,0274

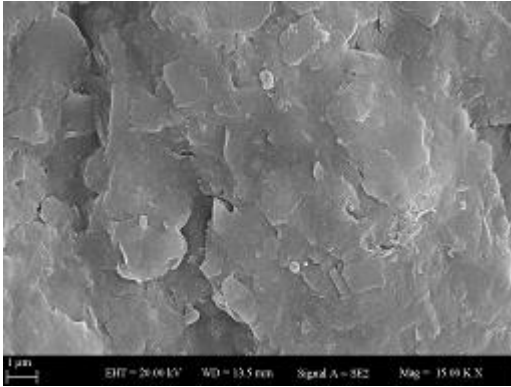
#### 4.9 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analiz Sonuçları

Deneysel çalışmada, Pb-Zn katkılı kil numunelerinin morfolojik olarak analiz edilmesi amaçlanmıştır. Bu sebeple, farklı oranlarda 8 adet numune grubu oluşturularak, numunelerin 1000x, 10000x, 15000x ve 20000x boyutlarında taramalı elektron mikroskop cihazı ile görüntüleri alınmıştır. Oluşturulan numune grupları Çizelge 4.32’de gösterilmiştir.

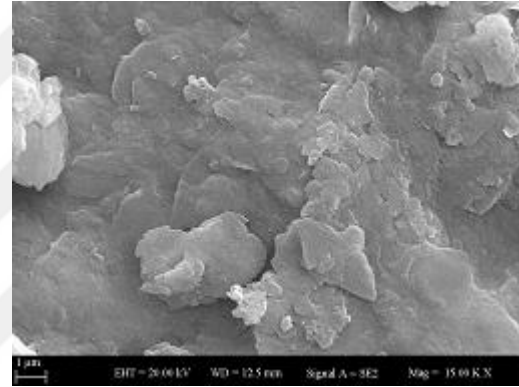
Çizelge 4.32 SEM analizi uygulanan numune grupları

Numune Grupları	Malzemeler (%)			
	Kil	Pb-Zn	Uçucu Kül	Çimento
No				
K <sub>100</sub>	100	-	-	-
K <sub>80</sub> + PZ <sub>20</sub>	80	20	-	-
K <sub>60</sub> + PZ <sub>40</sub>	60	40	-	-
K <sub>20</sub> + PZ <sub>80</sub>	20	80	-	-
PZ <sub>100</sub>	-	100	-	-
K <sub>75</sub> + PZ <sub>20</sub> + U <sub>5</sub>	75	20	5	-
K <sub>78</sub> + PZ <sub>20</sub> + Ç <sub>2</sub>	78	20	-	2
K <sub>18</sub> + PZ <sub>20</sub> + Ç <sub>2</sub>	18	80	-	2

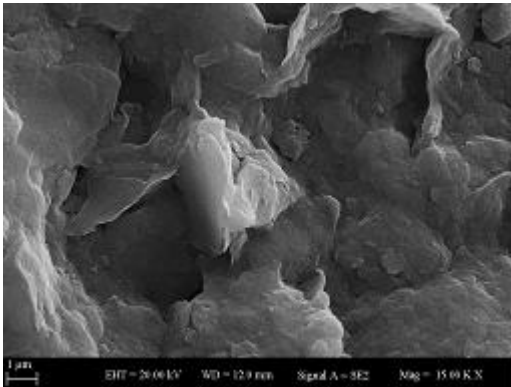
SEM analizinde elde edilen görüntüler incelendiğinde, %20 oranında Pb-Zn katkılı kil numunesinin yüzeyi, katkısız kil numunesine göre daha sıkı yapıdadır (Şekil 4.79). Bu durum, katkısız kile göre kohezyon artışını morfolojik olarak desteklemekte ve mukavemet değerinin daha yüksek olduğunu belirtmektedir. %20 oranındaki Pb-Zn katkısından daha yüksek oranda katkı içeren kil numunelerinin yüzeylerinde, katkı oranı arttıkça, sıkı yapının azaldığı görülmüştür. Bu da, Pb-Zn katkılı kil numunelerindeki katkı oranının artışıyla, kohezyon değerinin azaldığını göstermektedir. Literatür araştırmasında, Cömert ve Ural [22]'in deneysel çalışma sonucunda elde edilen SEM analiz değerlendirmeleri, bu tez çalışmasındaki SEM analiz verileri ile benzerlik göstermektedir.



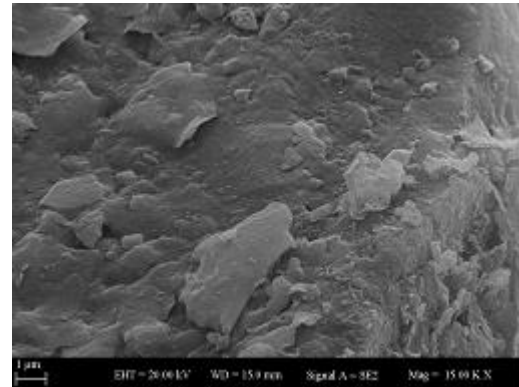
**%100 Kil**



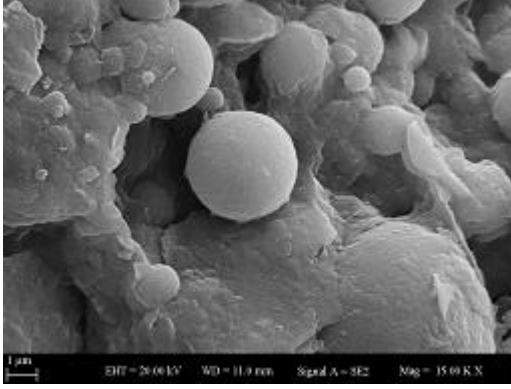
**%80 Kil + %20 Pb-Zn**



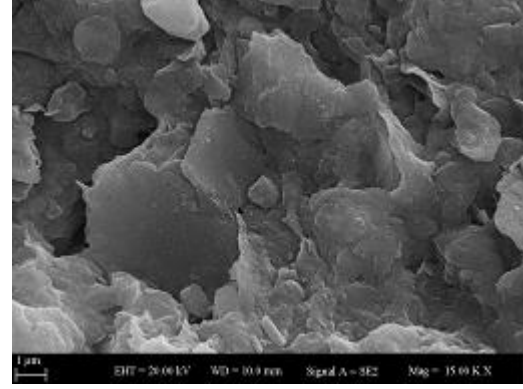
**%60 Kil + %40 Pb-Zn**



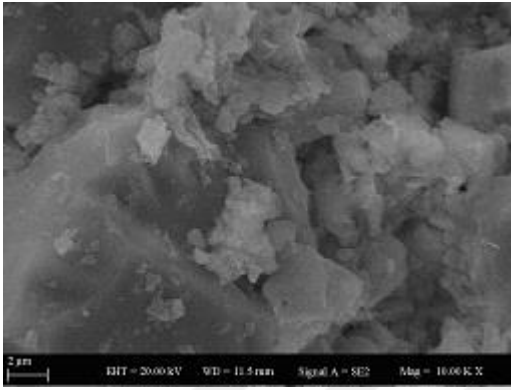
**%40 Kil + %60 Pb-Zn**



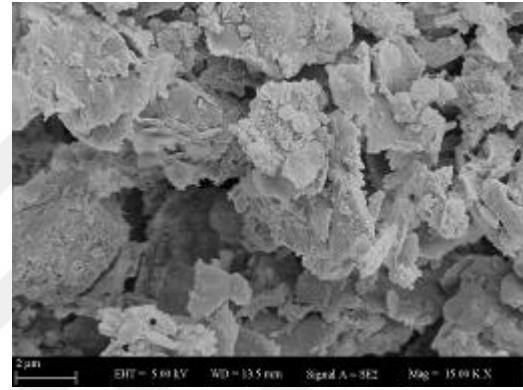
**%75 Kil + %20 Pb-Zn + %5 Uçucu Kül**



**%78 Kil + %20 Pb-Zn + %2 Çimento**



**%100 Pb-Zn**



**%18 Kil + %80 Pb-Zn + %2 Çimento**

Şekil 4.79 Pb-Zn, uçucu kül ve çimento katkılı kil numunelerinin 10000x boyutundaki SEM görüntüleri

### SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, yüksek plastisiteli bir kil zemine farklı oranlarda, toz haldeki kurşun-çinko maden atık malzemesi ilave edilerek, zeminin mukavemet özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında, öncelikle kile ve kurşun-çinko maden katkısına zemin endeks, kıvam ve kompaksiyon deneyleri uygulanarak, malzemelerin fiziksel özellikleri bulunmuştur. Sonrasında, Pb-Zn katkı malzemesi ile farklı oranlarda harmanlanan kil numunelerine kıvam, kompaksiyon, serbest basınç, üç eksenli basınç, direkt kesme kutusu, konsolidasyon deneyleri ve SEM analizi uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, %20 oranında Pb-Zn katkılı kil numunesinde en yüksek mukavemet değerine ulaşılmıştır. Deneysel çalışmanın diğer aşamasında da Pb-Zn katkılı kil numunelere %5, %10 ve %20 oranlarında uçucu kül; %1, %2, %3, %5 ve %20 oranlarında çimento ilave edilerek, kilin ve Pb-Zn katkısının mukavemet özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

Deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir :

- Pb-Zn katkılı kil numunelerde, katkı oranının artışı ile katkılı kil numunelerin özgül ağırlık değerlerinde artış gözlenmiştir.
- Pb-Zn katkılı kil numunelerde, katkı oranının artışı ile kil numunelerin likit limit ve plastisite indisi değerleri düşüş gözlenmiştir. %10 oranında uçucu kül ile



harmanlanan kil numunelerinde de aynı parametrelerde düşüş meydana gelmiştir.

- Standart kompaksiyon deneylerinde, Pb-Zn katkılı kil numunelerde, katkı oranı arttıkça, maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinde artış ve optimum su muhtevası değerlerinde de düşüş gözlenmiştir.
- Serbest basınç deneylerinde, %20 oranında Pb-Zn katkılı kil numunesinin serbest basınç mukavemet değeri 258 kPa olarak bulunmuş, 228 kPa serbest basınç mukavemet değerine sahip olan katkısız kil numunesine göre %13 oranında mukavemet artışı gözlenmiştir. %5 oranında uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinde, katkısız kile göre %100 oranında iyileşme meydana gelmiştir.

%20 oranında Pb-Zn katkılı kil numuneleri %1, %2 ve %3 oranlarında çimento ile harmanlanarak 1 ve 7 gün süresince kür edildikten sonra, 1 gün kür süresi sonucu katkısız kile göre %59, %84 ve %203 oranlarında mukavemet artışı; 7 gün kür süresi soncun katkısız kile göre %89, %132 ve %240 oranlarında mukavemet artışı gözlenmiştir.

- Üç eksenli basınç deneylerinde, %20 oranında Pb-Zn katkılı kil numunesinde elde edilen kohezyon değeri katkısız kil numunesine göre %17 oranında artış göstermiştir. %5 ve %10 oranlarında uçucu kül ile harmanlanan Pb-Zn katkılı kil numunelerinde, katkısız kile göre %15 ve %5 oranlarında artış meydana gelmiştir. %1, %2 ve %3 oranlarında çimento ile harmanlanan %20 Pb-Zn katkılı kil numunelerde, katkısız kil numunesine göre %10, %15, %21 oranlarında mukavemet artışı gözlenmiştir. Üç eksenli basınç deney sonuçları incelendiğinde, karışım numunelerindeki Pb-Zn katkı oranı arttıkça, kohezyon değerlerinde düşüş, kayma mukavemeti açısı değerlerinde artış gözlenmiştir. Ayrıca, deneyler sonucunda elde edilen kohezyon değerleri, serbest basınç mukavemet deneyindeki, drenajsız kayma mukavemeti değerleri ile benzerlik göstermiştir.

- Direkt kesme kutusu deneylerinde, %20 oranında Pb-Zn katkılı kil numunesinde elde edilen kohezyon değeri, katkısız kile göre %20 oranında artış göstermiştir. %20 oranından yüksek miktarda Pb-Zn katkısı içeren kil numunelerinde kohezyon değeri düşüş göstermiştir. Direkt kesme kutusu deneyinde incelenen Pb-Zn katkılı kil numunelerinde, katkı oranı arttıkça kayma mukavemeti açığı değerleri de artış göstermiştir. Direkt kesme kutusunda elde edilen kayma mukavemeti açığı değerleri, üç eksenli basınç deneyinde elde edilen açığı değerlerine göre daha yüksek değerde elde edilmiş olup, kohezyon değerleri serbest basınç ve üç eksenli basınç deneylerinde elde edilen kohezyon değerleri ile benzerlik göstermiştir.
- Konsolidasyon deneylerinde, öncelikle Pb-Zn katkılı kil numunelerine şişme basıncı deneyi uygulanmış, sonrasında konsolidasyon deneyi ile devam edilerek boşluk oranı, hacimsel sıkışma katsayısı ve şişme indisi parametreleri incelenmiştir. Konsolidasyon deneyi sonuçlarına göre katkısız kil numunesinin şişme basıncı değerinin 150 kPa olduğu bulunmuştur. Pb-Zn katkılı kil numunelerinde, katkı oranı arttıkça, şişme basıncı ve boşluk oranı değerlerinde düşüş gözlenmiştir. Katkısız Pb-Zn katkısının şişme basıncı değeri 0 kPa olarak tayin edilmiş ve katkının şişme davranışı göstermediği sonucuna varılmıştır.
- Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) analizinde, Pb-Zn katkılı kil numunelerinin 1000x, 10000x, 15000x ve 20000x boyutlarında görüntüleri alınarak, morfolojik yapıları incelenmiştir. %20 oranında Pb-Zn katkılı kil numunesinin morfolojik yapısı incelendiğine, katkısız kil numunesinin yüzeyine göre daha sıkı yapıda olduğu gözlenmiştir. %20 oranından daha yüksek miktarda Pb-Zn katkısı ile harmanlanan kil numunelerinde ise zemin yüzeyinin gevşek yapıda olduğu görülmüştür. Bu da, Pb-Zn katkılı kil numunelerinde, Pb-Zn katkı oranının artışıyla, kohezyon değerinin düşüş gösterdiğini morfolojik olarak desteklemektedir.
- Deneysel çalışmalar sonucunda elde olunan verilere göre kil zeminlere belirli oranda ilave edilen Pb-Zn katkı malzemesinin, zeminlerin kayma mukavemetini

iyileştirdiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, Pb-Zn katkı malzemesine kil, uçucu kül ve çimento ilave edilerek, Pb-Zn katkı malzemesinin kayma mukavemeti değerlerinin önemli oranında iyileştiği görölmüştür. Bu durum, Pb-Zn katkısının doğadan yüksek oranda bertaraf edilip, geoteknik uygulamalarda dolgu malzemesi olarak kullanılabilceğini deneysel olarak ortaya koymuştur.

Bununla beraber konu hakkında daha detaylı bilgi edinmek için farklı deneysel araştırmalara ihtiyaç vardır.



## KAYNAKLAR

---

- [1] Roth, J.P., (1966). "Diagnosis of Automata Failures: A Calculus and a Method", IBM Journal of Research and Development, 10:278-291.
- [2] Aysu, E., (2011). Şehir Planlamasında Yoğunluk, Yıldız Üniversitesi Yayınları, 214, İstanbul (baskıda).
- [3] Neubauer, C.H., Thompson, M.R., (1972). "Stability Properties of Uncured-Lime-Treated Fine-Grained Soils", Highway Research Record, (381):20-26, USA.
- [4] Kılıç, G., (2008). Çimento ile Zemin Stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [5] Çetin, A.Y., (2011). Yüksek Plastisiteli Kil Zeminlerin Alternatif Malzemeler ile Yüzeysel Zemin Stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [6] Karthik, S., Ashok, E., Gowtham, P., Elango, G., Gokul, D., Thangaraj, S., "Soil Stabilization By Using Fly Ash", IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, 6:20-26, Jan 2014.
- [7] Görgün, B., Ural, N., (2015). "Utilization of Marble Waste in Geotechnical Engineering", 2nd International Sustainable Buildings Symposium, 28-30 May 2015, Ankara.
- [8] Pandey, A., Rabbani, (2017). "Soil Stabilization Using Cement", International Journal of Civil Engineering and Technology, 8:316-322, June 2017.
- [9] Yılmaz, F., Yurdakul, M., (2016). "Evaluation of Marble Dust for Soil Stabilization", 3rd International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering, Bayburt.
- [10] Selekoğlu, B., (2015). "Investigation of Engineering Properties of Soils Stabilized with Steel Slag", 6. Geoteknik Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- [11] Negi, C., Yadav, R.K., Singhai, (2013). "Effect of Silica Fume on Engineering Properties of Black Cotton Soil", International Journal of Computational Engineering Research.

- [12] Azzawi, A.A., Daud, K.A., Sattar M.A.A., (2012). "Effect of Silica Fume Addition on the Behaviour of Silty-Clayey Soils", Journal of Engineering and Development.
- [13] Vural, İ., Akgül, T., Aydın, E., (2017). "İnşaat Yıkıntı Atıkları Kullanılarak Zeminlerin Serbest Basınç Dayanımının İyileştirilmesi", 5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, 29-30 September 2017, Baku.
- [14] Al-Kaki, A., Çanakçı, H., Çelik, F., (2016). "Stabilization of Clay with Waste Soda Lime Glass Powder", World Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning Symposium, Procedia Engineering, 161:600-605.
- [15] T.C. Orman Genel Müdürlüğü, Ağaç Türlerimiz, [www.ogm.gov.tr/agaclar.htm](http://www.ogm.gov.tr/agaclar.htm), 11 Mart 2003.
- [16] Ünver, E., (2015). Problemlili Kil Zeminlerin Uçucu Kül ile İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [17] Alpyürür, M., Şenol, A., (2018). "Yüzeysel Zemin İyileştirmesinde Yeni Bir Malzeme Olarak Atık Gazbeton Kullanımı", The Journal Of Graduate School Of Natural And Applied Sciences Of Mehmet Akif Ersoy University, 9(2):168-178.
- [18] Hassan, D.İ., Çabalar, A.F., Akbulut, N., (2015). "Improving a Clay By Waste Granite Tiles", 6. Geoteknik Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- [19] Kalkan, E., (2006). "Utilization Of Red Mud As a Stabilization Material For The Preparation Of Clay Liners", Engineering Geology, 87:220-229.
- [20] Pekdemir, Y., (2013). "Silis Dumanı, Kırmızı Çamur ve Kireç ile Muamele Edilmiş Mikronize Bir Kilin Bazı Geoteknik Özelliklerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- [21] Mahmoudi, M., Altun, S., (2018). "EAF Cürufu Katkısının Kohezyonlu Zeminlerin Mühendislik Özellikleri Üzerine Etkisi", Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 17. Ulusal Konferansı, İstanbul Üniversitesi, 26-28 Eylül 2018, İstanbul.
- [22] Batman, A., (2015). "Öğütülmüş Kuvars Kumunun Kilin Mukavemet Özelliklerine Etkisinin Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- [23] Cömert, A.T., Ural, N., (2015). "Effect of Marble Dust on Properties and CBR of Clay Soil", 6. Geoteknik Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- [24] Holtz, R.D., Kovacs, W.D., A.T., (2010). Geoteknik Mühendisliğine Giriş, 2. Basım, Nobel Akademik, İstanbul.
- [25] Lambe, T.W., (1964). "Methods of Estimating Settlement", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Divisions, 90:43-67.
- [26] O'Neill ve Poormoayed, 1980 "Methods of Estimating Settlement", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Divisions, 90:43-67.

- [27] Van der Merwe, T.W., D.H., (1964). "The Prediction of Heave From the Plasticity Index and the Percentage Clay Fraction", South African Institution of Civil Engineer, 6:103-107.
- [28] Önalp, A. (2007). Geoteknik Bilgisi 1, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [29] Yıldırım, S. (2009). Zemin İncelemesi ve Temel Tasarımı, Güncelleştirilmiş Yeni Baskı, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [30] Aytekin M., (2002). "Zeminlerin Değirmen Atığı Malzeme ile Stabilizasyonu", Anadolu Üniversitesi Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 9. Ulusal Kongresi, 30 Eylül-1 Ekim, 718-725.
- [31] Van Impe, W.F., (1989). "Soils Improvement Techniques and Their Evolution", A.A. Balkema.
- [32] Edil, T.B., (2011). "Sürdürülebilir Geoteknik İnşaata Yaklaşım", 4. Geoteknik Sempozyumu, Adana.
- [33] Broderick, G.P., Daniel, D.E., (1990). Stabilizing Compacted Clay Against Chemical Attack, ASCE J Geotech Eng Div, 116(10):1549-1567.
- [34] Little, D.N. (1995). "Handbook for Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime", The National Lime Association, Kendall/Hunt Pub. Co., Dubuque, Iowa, USA.
- [35] Bell, F.G., (1988). "Stabilization and Treatment of Clay Soils with Lime, Ground Engineering, 21:10-15.
- [36] Nelson, J.D., Miller, J.D., (1992). "Expansive Soil Problems and Practise in Foundation and Pavement Engineering", J. Willey and Sons, 259.
- [37] Wang, L., Reston, E.Y., (2007). "Analysis of Asphalt Pavement Materials and Systems Emerging Methods", Proceedings of the Symposium on the Mechanics of Flexible Pavements, 25-30 June, 2006, Boulder, Colorado, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, USA.
- [38] Das, B., (2007). "Principles of Foundation Engineering", 6th Edition, Thomson Learning.
- [39] Balta, L., (1984). Doğu Karadeniz Bölgesi Topraklarının Çimento ve Kireçle Stabilizasyonu, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [40] Littlejohn, G.S., (1982). "Design of Cement Based Grouts", Grouts in Geotechnical Engineering, ASCE, New York, 35-48.
- [41] Gökçe, A., (1995). Farklı İnceliklerdeki Uçucu Küllerin Betondaki Performanslarının Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [42] Morrison, R.E., (1970). "A Review of Ash Specifications", Symposium on Fly Ash Utilization, Pittsburgh, 24-31.
- [43] Mehta, P.K., (1986). "Concrete Structure, Properties and Materials", Prentice Hall, New Jersey.

- [44] Aruntaş, H.Y., (2006). "Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanımı", Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 21(1):193-203.
- [45] Demiröz, A., 2009, Uçucu küllerin geoteknik mühendisliğinde kullanımı, Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Teknik-Online Dergi, 8(3), 2009.
- [46] Moseley, M.P., Kirsch, K., (2004). "Ground Improvement", 2nd Edition, Spon Press, New York, USA.
- [47] Tokyay, Y., Erdoğan, K., (1998). "Türkiye Termik Santrallerinden Elde Edilen Uçucu Küllerin Karakterizasyonu", Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, 98(3).
- [48] Wasti, Y., (1990). "Uçucu Küllerin Geoteknik Özellikleri ve Kullanım Olanakları", İMO Teknik Dergi, 1(4):177-188.
- [49] Eftelioğlu, M., Bowders, J.J., (1992). "Permeability Testing of Fly Ash/Grout Specimens", Environmental Geotechnology, 495-501, Rotterdam.
- [50] Aruntaş, H.Y., 2006. Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanımı. G.Ü. Müh. Mim. Fak. Dergi-si, 21(1):193-203.
- [51] Al-azzawi, A.A., (2012). "Effect of Silica Fume Addition on the Behavior of Silty Clayey Soils," J. Eng. Dev., 16(92):105.
- [52] Superior Abrasives, Silica Fume, [www.microsilica-fume.com/product/94-silica-fume.html](http://www.microsilica-fume.com/product/94-silica-fume.html), 24 Mart 2019.
- [53] Görgün, B., Ural, N., (2015). "Mermer Atığının Geoteknik Mühendisliğinde Kullanılması", 2nd International Sustainable Buildings Symposium, ISBS, 28-30 May 2015, Ankara, 129-132.
- [54] Yıldız, A.H., (2008). Mermer Atıklarının Yol İnşaatında Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta. Mermer ve Mermercilik, Ankara Basım ve Ciltevi, Ankara.
- [55] Ilıcalı, M., (1998). Karayolu Üstyapısında Erdemir Cürufunun Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [56] Erol, B., (2008). Atık Maddelerin Yol İnşaatlarında Temel Malzemesi Olarak Kullanımı, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- [57] Yalçın, N., Sevinç, V., (2000). "Utilization of Bauxite Waste in Ceramic Glazes", Ceramic International, 26:485-493.
- [58] Kara, M., Ekerim, A., Emrullahoğlu Ö.F., (1995). "Kil İlaveli Kırmızı Çamurun İnşaat Sanayinde Kullanılabilirliğinin Araştırılması", TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 29-30 Kasım 1995, 161-169.
- [59] Amritphale, S.S., Patel, M., (1987). "Utilization of Red Mud, Fly Ash For Manufacturing Bricks With Pyrophyllite, Silicates Industriels, 3(4):31.

- [60] Komnintsas, K., Bartzas, G., Paspaliaris, I., (2004). "Efficiency of Limestone and Red Mud Barriers: Laboratory Column Studies", Minerals Engineering, 17:183-194.
- [61] Shiao, S.J., Akashi, G., (1997). "Phosphate Removal From Aqueous Solution by Red Mud", JWPCF, 280-285.
- [62] AKG Gazbeton, Gazbeton Nedir, [www.akg-gazbeton.com](http://www.akg-gazbeton.com), 13 Mart 2019.
- [63] Dongxing, X., (2010). "Cement Treated Recycled Demolition Waste as a Road Base Material", Journal of Wuhan University of Technology, 25(4):696-699.
- [64] Environment Protection Authority Victoria, Construction Waste, <https://www.epa.vic.gov.au/your-environment/waste/construction-and-demolition-waste>, 30 Mart 2019.
- [65] Uzuner, B.A., (2000). Temel Mühendisliğine Giriş, Derya Yayınevi.
- [66] Anton Paar, Bitumen, <https://anton-paar.com/corp-en/products/industries/application/asphalt-bitumen/>, 24 Mart 2019.
- [67] Seed, H.B., Chan, C.K., (1959). "Structure and Strength Characteristics of Compacted Clays", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 85(SM5):87-128.
- [68] Lambe, T.W., (1967). "The Structure of Compacted Clay", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 84(SM2):1654-1 – 1654-34.
- [69] The Telegraph, Leaning Tower of Pisa, <https://www.telegraph.co.uk/news/worldnews/1555945/Leaning-Tower-of-Pisa-is-saved-from-collapse.html>.
- [70] Research Gate, Landslide, [https://www.researchgate.net/figure/Landslide-on-National-Freeway-No-3-in-Taiwan-photo-taken-on-April-25-2010\\_fig1\\_327157537](https://www.researchgate.net/figure/Landslide-on-National-Freeway-No-3-in-Taiwan-photo-taken-on-April-25-2010_fig1_327157537), 14 Şubat 2019.
- [71] Geotechnical Engineering, Total Settlement, <https://kshitiija.wordpress.com/2006/05/05/significance-of-geotechnical-engineering-part-ii-total-settlement/>, 31 Mart 2019.
- [72] Tüylü, S., (2016). Maden Tesis Atıklarının Yerüstünde Depolanmasında En Uygun Tasarım Koşullarının Belirlenmesi, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [73] Casagrande, A., (1932). "Research on the Atterberg Limits of Soils", Pub. Roads, 13(136):121-130.
- [74] Özyaydın, K., (2011). Zemin Mekaniği, Güncelleştirilmiş Baskı, Birsen Yayınevi, İstanbul, 226.
- [75] Yılmaz, I., Yıldırım, M., Keskin, İ., (2014). Zemin Mekaniği Laboratuvar Deneyleri ve Çözümlü Problemler, 2. Baskı, Seçkin Yayınevi, Ankara.
- [76] Akbulut, S., Sağlamer, A., (2003). "Evaluation of Fly Ash and Clay in Soil Grouting. Grouting and Ground Treatment", 10(1061/40663):1192-1199.



- [77] Akbulut, S., Kurt, Z.N., Arasan, S., Pekdemir, Y., (2013). "Geotechnical Properties of Some Organoclays", Indian Academy of Sciences, Sadhana, 38(2):317-329, April 2013.
- [78] Akbulut, S., Kurt, Z.N., (2017). "Some Geotechnical Properties of Clay Nanocomposites", Periodica Polytechnica Civil Engineering, 61(3):381-388.



## YAYINLARI

### Bildiri

1. Balatan, F., Akbulut, S., (2018). "The Experimental Investigation of the Effect of Lead-Zinc and Flying Ash on the Strength Features of Clay", 3rd International Conference on Civil and Environmental Engineering Conference E-book, ICOCEE, 24-27 April 2018, Çeşme-İzmir.
2. Balatan, F., Akbulut, S., (2018). "The Effect of Lead-Zinc on the Strength of Clay Soil with Fly Ash", Book of Proceedings of The IV International Conference on Engineering and Natural Sciences, ICENS, 2-6 May 2018, Kiev-Ukraine, 573-581.
3. Balatan, F., Akbulut, S., (2018). "Kurşun-Çinko Katkılarının Bir Kil Zeminin Mukavemet Özelliklerine Etkisinin Deneysel Olarak Araştırılması", Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 17. Ulusal Konferansı Bildiri Kitapçığı, ZMGM 18, 28-30 Eylül 2018, İstanbul, 3:1095-1104.