



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



ATIK LASTİK PARÇALARININ, KİREÇ VE
UÇUCU KÜL İLE STABİLİZE EDİLEN
YÜKSEK PLASTİSİTELİ KİL ZEMİN
ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Muhammed BÜYÜKOFLAZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Şubat-2023
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Muhammed BÜYÜKOFLAZ tarafından hazırlanan “Atık Lastik Parçalarının, Kireç ve Uçucu Kül ile Stabilize Edilen Yüksek Plastisiteli Kil Zemin Üzerindeki Etkisi” adlı tez çalışması 18/01/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Mustafa YILDIZ

.....

Danışman

Doç. Dr. Ali Sinan SOĞANCI

.....

Üye

Prof. Dr. Adnan ÖZDEMİR

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. İbrahim KALAYCI
FBE Müdürü

Bu tez çalışması Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu (BAP) tarafından 221319004 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Muhammed BÜYÜKOFLAZ
Tarih:

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ATIK LASTİK PARÇALARININ, KİREÇ VE UÇUCU KÜL İLE STABİLİZE EDİLEN YÜKSEK PLASTİSELİ KİL ZEMİN ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Muhammed BÜYÜKOFLAZ

**Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Doç. Dr. Ali Sinan SOĞANCI

Yıl, 166 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Ali Sinan SOĞANCI

Prof. Dr. Mustafa YILDIZ

Prof. Dr. Adnan ÖZDEMİR

Dünya genelinde artan insan nüfusuna ve yapılaşma ihtiyacına bağlı olarak, inşaat projeleri için elverişli olan zeminler giderek azalmaktadır. Bu nedenle yapılaşmaya uygun olmayan zeminlerde, çeşitli yöntemlerle zemin iyileştirmesinin yapılması zorunlu hale gelmiştir. Bu çalışma kireç ve uçucu kül ile stabilize edilen yüksek plastisiteli kil bir zemine atık lastik ilavesinin etkileri üzerine odaklanmaktadır. Tez kapsamında kireç oranı optimum seviyede sabit tutulmuş, altı farklı oranda uçucu kül (%3, %6, %9, %12, %15, %18) ve üç farklı oranda atık lastik parçaları (%0.5, %1, %1.5) kullanılarak karışımlar hazırlanmıştır.

Karışımlar üzerinde sırasıyla kıvam limit, kompaksiyon, şişme potansiyeli, serbest basınç deneyleri ve mikroanalizler (XRF, XRD, SEM) gerçekleştirilmiştir. Optimum su muhtevasında hazırlanan karışımlar; 2, 7, 28 ve 56 günlük kürden sonra serbest basınç deneyine tabii tutulmuştur. Deney sonuçları zemine kireç, uçucu kül ve atık lastik eklenmesiyle şişme potansiyeli değerinin azaldığını göstermiştir. Ayrıca atık lastik katkısıyla birlikte karışımların dayanımları artmış, gevrek kırılma davranışı değişerek sünek kompozitler elde edilmiştir. Bu kompozitler sıkıştırılmış toprak üretiminde, ulaşım yapılarında temel ve alt-temel olarak dayanma duvarlarında ise dolgu olarak kullanılabilirler.

Anahtar Kelimeler: Atık lastik, kireç, uçucu kül, sürdürülebilir üretim, yüksek plastisiteli kil, zemin iyileştirme

ABSTRACT

MS THESIS

EFFECT OF WASTE RUBBER PARTICLES ON HIGH PLASTICITY CLAY STABILIZED WITH LIME AND FLY ASH

Muhammed BÜYÜKOFLAZ

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN CIVIL ENGINEERING**

Advisor: Doç. Dr. Ali Sinan SOĞANCI

Year, 166 Pages

Jury

Doç. Dr. Ali Sinan SOĞANCI

Prof. Dr. Mustafa YILDIZ

Prof. Dr. Adnan ÖZDEMİR

Due to increasing human population and the demand for construction around the world, the available soils to apply engineering projects are gradually decreasing. Therefore, soil improvement using various methods performed on the soils which are not suitable for construction has become a necessary process. This study focuses on the effects of adding waste tire to a high plasticity clay soil stabilized with lime and fly ash. In the study, the lime rate was kept at the optimum level, six fly ash dosage (%3, %6, %9, %12, %15, %18) and three percentage of rubber particles (%0.5, %1, %1.5) were determined after the preliminary tests.

The tests namely, Atterberg limits, compaction, swelling potential, unconfined compressive strength and micro analysis (XRF, XRD, SEM) were conducted on the mixtures. After the samples which are prepared at the optimum water content had been cured for 2, 7, 28 and 56 days, the unconfined compressive strength tests were carried out on the mixtures. The results showed that adding lime, fly ash and rubber particles reduces the free swelling potential. Furthermore, the incorporation of rubber particles improves the unconfined compressive strength of composites and alters the brittle failure behavior of clay stabilized using lime and fly ash to ductile behavior. These composites can be used in manufacturing rammed earth, highway projects as base and sub-base, retaining walls as a backfill.

Keywords: Fly ash, high plasticity clays, lime, soil improvement, sustainable production, waste rubber particles

ÖNSÖZ

Tez çalışmam Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu (BAP) tarafından desteklenmiştir. Bu proje desteği için Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu (BAP)'a teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasının gerçekleştirilmesinde ve yüksek lisans eğitimim süresince desteğini esirgemeyen danışman hocam Sayın Doç. Dr. Ali Sinan SOĞANCI' ya teşekkürlerimi sunarım.

İnsani ve mesleki açıdan verdiği değerli bilgiler ve ayırdığı kıymetli zamanı için örnek aldığım hocam Sayın Prof. Dr. Adnan ÖZDEMİR' e teşekkürü borç bilir, saygılarımı sunarım.

Laboratuvar çalışmalarında bilgi ve birikimlerini hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocalarım Araştırma Görevlisi Dr. Yavuz Yenginar' a ve Araştırma Görevlisi Dr. İlyas Özkan'a teşekkür eder, en içten şükranlarımı sunarım.

Hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen sevgili annem Fatma Betül BÜYÜKOFLAZ' a sevgili babam Mustafa BÜYÜKOFLAZ' a ve ablam Fatiha Nur BAŞÜNAL' a sevgilimi iletir, saygılarımı sunarım.

Muhammed BÜYÜKOFLAZ
KONYA-2023

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR	xvi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. İlgili Çalışmalar	3
2.2. Problemlı Zeminler	18
2.2.1. Şişen Zeminler	19
2.2.2. Göçebilen (Çökebilen) Zeminler	29
2.2.3. Kontrolsüz Moloz Dolgular	33
2.2. Problemlı Zeminlerde Zemin İyileştirme Yöntemleri	34
2.3. Katkı Maddeleri ile Zemin İyileştirme Yöntemleri	39
2.3.1. Kireç ile Zemin İyileştirilmesi	39
2.3.2. Çimento ile Zemin Stabilizasyonu.....	45
2.3.3. Uçucu Kül ile Zemin Stabilizasyonu	51
2.3.4. Kullanılmış Atık Lastikler ile Zemin Stabilizasyonu	63
2.3.5. Metal Cürufu ile Yüzeysel Zemin Stabilizasyonu	68
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	69
3.1. Malzemeler	69
3.1.1. Yüksek Plastisiteli Kil Zemin	69
3.1.2. Kireç.....	70
3.1.3. Uçucu Kül	72
3.1.4. Atık Lastik	74
3.2. Yöntem.....	76
3.2.1. Zeminin Sınıflandırılması	76
3.2.2. Özgöl Ağırlık Deneyi.....	83
3.2.3. Kompaksiyon (Proctor) Deneyi	85
3.2.4. Şişme Potansiyeli Deneyi	88
3.2.5. Numunelerin Hazırlanması ve Adlandırılması	91
3.2.6. Serbest Basınç Deneyi	95
3.2.7. Mikroyapı Testleri	97

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	101
4.1. Elek Analizi ve Hidrometre Deneyi Sonuçları	101
4.2. Likit Limit ve Plastik Limit Deneyi Sonuçları	102
4.2.1. Aktivite	107
4.3. Özgül Ağırlık Deney Sonuçları	108
4.4. Kompaksiyon Deney Sonuçları	109
4.5. Şişme Potansiyeli Deney Sonuçları	115
4.6. Serbest Basınç Deneyi Sonuçları	116
4.6.1. Kireç ve Uçucu Kül Katkılı Numuneler	117
4.6.2. Kireç, Uçucu Kül ve Atık Lastik Katkılı Numuneler	119
4.7. Mikroyapı Test Sonuçları	131
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	140
5.1. Sonuçlar	140
5.2. Öneriler	143
6. KAYNAKLAR	144
EKLER	150
EK-1 Kireç ve Uçucu Kül Katkılı Zeminlerin Serbest Basınç Grafikleri	150
EK-2 2 Günlük Kür Süresi Sonunda Kompozitlerin Karşılaştırmalı Serbest Basınç Deneyi Sonuçları.....	153
EK-3 7 Günlük Kür Süresi Sonunda Kompozitlerin Karşılaştırmalı Serbest Basınç Deneyi Sonuçları.....	156
EK-4 28 Günlük Kür Süresi Sonunda Kompozitlerin Karşılaştırmalı Serbest Basınç Deneyi Sonuçları.....	159
EK-5 56 Günlük Kür Süresi Sonunda Kompozitlerin Karşılaştırmalı Serbest Basınç Deneyi Sonuçları.....	162

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil		Sayfa
Şekil 2.1.	Aktiviteye ve kil yüzdesine bağlı olarak zeminin şişme potansiyeli.....	23
Şekil 2.2.	Plastisite indisi ve kil yüzdesine bağlı olarak zeminin şişme potansiyeli.....	23
Şekil 2.3.	Şişen zeminin karayolunda oluşturduğu çatlaklar.....	24
Şekil 2.4.	Serbest şişme deneyi A yöntemi.....	27
Şekil 2.5.	Yük altında şişme deneyi- B yöntemi.....	28
Şekil 2.6.	C yöntemi ile şişme basıncının tespit edilmesi.....	28
Şekil 2.7.	Göçebilen zeminlerde su teması ile oluşan hacim değişimi.....	29
Şekil 2.8.	Zemindeki yük artışı ile oluşan çökme mekanizması.....	30
Şekil 2.9.	Çift odometre deneyi sonucunda elde edilen grafik.....	31
Şekil 2.10.	Karayolundaki göçen zemin hasarı.....	32
Şekil 2.11.	Moloz dolguda bulunması muhtemel malzemeler.....	34
Şekil 2.12.	Zemin iyileştirme yöntemleri.....	38
Şekil 2.13.	Kireç numunesi.....	40
Şekil 2.14.	Sahada kireç ile zemin stabilizasyonu.....	43
Şekil 2.15.	Portland çimentosu.....	45
Şekil 2.16.	Farklı zemin türlerinde çimento içeriğine bağlı olarak serbest basınç mukavemetlerindeki değişimler	48
Şekil 2.17.	Çimento-zemin karışımında, sıkıştırma zamanının dayanıma etkisi.....	49
Şekil 2.18.	Zeminde yeni dolgu ve çimento stabilizasyonun karşılaştırılması	51
Şekil 2.19.	Farklı kimyasal yapı ve renkte bulunan uçucu kül numuneler....	56
Şekil 2.20.	C ve F sınıfı uçucu kül numuneleri.....	59
Şekil 2.21.	C sınıfı uçucu külün elektron mikroskopunda görüntüsü.....	61
Şekil 2.22.	Uçucu külün zemine serilmesi işlemi.....	62
Şekil 2.23.	Uçucu kül ile zeminin karıştırılması işlemi.....	63
Şekil 2.24.	Değişik şekil ve boyuttaki atık lastikler.....	66

Şekil 3.1.	Numunelerin kurutulması ve öğütülmesi işlemleri Seyitömer uçucu külü XRD analizi.....	69
Şekil 3.2.	Seyitömer uçucu külü XRD analizi.....	73
Şekil 3.3.	a) Kür sonrası dağılan numuneler 4.75 ve 2.8 mm lastik içerikli, b) Elenmeden önce lastik içeriği.....	75
Şekil 3.4.	Numunelerin hazırlanmasında kullanılan atık lastiklerin tane dağılımları ve ölçüleri; a) en yüksek lastik uzunluğu, b) lastik numune karışımı, c) elenen lastik numuneleri.....	75
Şekil 3.5.	Islak Elek Analizi: a) 0.075 mm elekten numunenin elenmesi, b) 0.075 mm elek üzerinde kalan malzeme, c) 0.075 mm elek üzerinde kalan numunenin elek takımından elenmesi, d) Elek ve numunelerin etüvde kurutulması.....	77
Şekil 3.6.	Koni penetrasyon ve Casagrande deneyi: a) Zemine su ilave edilip yoğrulması, b) Zeminin koni penetrasyon kalıbına yerleştirilmesi, c) Koninin zemin üzerine yerleştirilmesi, d) Koni penetrasyon cihazının çalıştırılması, e-f) Casagrande deneyi.....	79
Şekil 3.7.	Plastik limit deneyi: a) zemin numunesi, b) numunelerin silindir hale getirilmesi.....	80
Şekil 3.8.	Plastik limit deneyi: a) Silindir hale getirilmiş numuneler, b) tartım işlemi.....	81
Şekil 3.9.	Hidrometre Deneyi.....	81
Şekil 3.10.	Özgül ağırlık deneyi: a) Deney ekipmanları, b) Tartım işlemi, c) Piknometreye su eklenmesi.....	84
Şekil 3.11.	Özgül ağırlık deneyi: a) vakumlama işlemi, b) su banyosu.....	85
Şekil 3.12.	Proctor deneyi: a) Proctor kalıbının tartılması, b) sıkıştırma işlemi, c) sıkıştırılan zeminin tartılması, d) sıkıştırılan zeminden örnek alınması ve tartılması	87
Şekil 3.13.	Kompaksiyon deneyi: a) deney ekipmanları, b) sıkıştırılan zemin, c) kalıba yerleştirme işlemi, d) numunelerin yüksekliklerinin ölçülmesi.....	90
Şekil 3.14.	Kompaksiyon deneyi: a) numunenin kompaksiyon aletine yerleştirilmesi, b) su ile örtülmesi, c) şişmenin ölçülmesi, d) şişme görüntüsü.....	90

Şekil 3.15.	Numunelerin hazırlanması: a) zemin ve katkı maddeleri, b) karıştırma işlemi, c) suyun ilave edilmesi, d) karışımın dinlendirilme süreci.....	93
Şekil 3.16.	Karışımların hazırlanması: a) Proctor ile sıkıştırılan numune, b) zemine penetre ettirilen tüpler, c) tüplerin zeminden ayrılması, d) serbest basınç için hazırlanan numune.....	94
Şekil 3.17.	Serbest basınç deneyi numuneleri: a) numunelerin ölçülmesi, b) numunelerin küre bırakılması, c) kür sonrası numuneler.....	95
Şekil 3.18.	Serbest basınç deneyi: a) numunenin cihaza yerleştirilmesi, b)-c) deney sonrası numuneler, d) serbest basınç deneyine tabii tutulan karışımlar.....	96
Şekil 3.19.	Mikroyapı testleri için etüvde kurutulmuş kompozit numuneler.....	98
Şekil 3.20.	X-ışını floresans spektrometresi test cihazı.....	99
Şekil 3.21.	X-ışını difraktometre cihazı.....	99
Şekil 3.22.	SEM deneyi: a) deney cihazı, b) laboratuvar numunesi, c) deney öncesi numunelerin görüntüsü.....	100
Şekil 4.1.	Doğal zemin dane çapı dağılımı eğrisi.....	101
Şekil 4.2.	Atık lastik dane çapı dağılımı eğrisi.....	102
Şekil 4.3.	Doğal numune likit limit deney grafiği.....	103
Şekil 4.4.	%6 kireç katkılı zeminin likit limit deneyi ($S_{94}L_6FA_0RP_0$).....	103
Şekil 4.5.	%6 kireç ve %3 uçucu kül içeren karışımın likit limit değeri ($S_{91}L_6FA_3RP_0$).....	104
Şekil 4.6.	%6 kireç ve %6 uçucu kül içeren karışımın likit limit değeri ($S_{88}L_6FA_6RP_0$).....	104
Şekil 4.7.	%6 kireç ve %9 uçucu kül içeren karışımın likit limit değeri ($S_{85}L_6FA_9RP_0$).....	105
Şekil 4.8.	%6 kireç ve %12 uçucu kül içeren karışımın likit limit değeri ($S_{82}L_6FA_{12}RP_0$).....	105
Şekil 4.9.	%6 kireç ve %15 uçucu kül içeren karışımın likit limit değeri ($S_{79}L_6FA_{15}RP_0$).....	106
Şekil 4.10.	Zeminin plastisite kartında yeri ve sınıflandırılması.....	108
Şekil 4.11.	Doğal zeminin kompaksiyon eğrisi, optimum su muhtevası.....	109
Şekil 4.12.	%6 kireç katkılı karışımın kompaksiyon eğrisi.....	110

Şekil 4.13.	%6 kireç ve %3 uçucu kül katkılı karışımın kompaksiyon eğrisi..	110
Şekil 4.14.	%6 kireç ve %6 uçucu kül katkılı karışımın kompaksiyon eğrisi..	111
Şekil 4.15.	%6 kireç ve %9 uçucu kül katkılı karışımın kompaksiyon eğrisi..	111
Şekil 4.16.	%6 kireç ve %12 uçucu kül katkılı karışımın kompaksiyon eğrisi	111
Şekil 4.17.	%6 kireç ve %15 uçucu kül katkılı karışımın kompaksiyon eğrisi	112
Şekil 4.18.	%6 kireç ve %18 uçucu kül katkılı karışımın kompaksiyon eğrisi	112
Şekil 4.19.	$S_{90.5}L_6FA_3RP_{0.5}$ karışımının kompaksiyon deney eğrisi.....	113
Şekil 4.20.	$S_{90}L_6FA_3RP_1$ karışımının kompaksiyon deney eğrisi.....	113
Şekil 4.21.	$S_{89.5}L_6FA_3RP_{1.5}$ karışımının kompaksiyon deney eğrisi.....	114
Şekil 4.22.	Doğal zemin serbest basınç dayanımı.....	116
Şekil 4.23.	$S_{94}L_6FA_0RP_0$ karışımının 2, 7, 28 ve 56 gün kür uygulanmış serbest basınç dayanımları.....	117
Şekil 4.24.	$S_{79}L_6FA_{15}RP_0$ karışımının 2, 7, 28, 56 ve 84 gün kür uygulanmış serbest basınç dayanımları.....	119
Şekil 4.25.	$S_{90.5}L_6FA_3RP_{0.5}$ karışımının 2, 7, 28 ve 56 gün kür uygulanmış serbest basınç dayanımları.....	120
Şekil 4.26.	$S_{90}L_6FA_3RP_1$ karışımının 2, 7, 28, 56 ve 84 gün kür uygulanmış serbest basınç dayanımları.....	120
Şekil 4.27.	$S_{89.5}L_6FA_3RP_{1.5}$ karışımının 2, 7, 28 ve 56 gün kür uygulanmış serbest basınç dayanımları.....	121
Şekil 4.28.	$S_{87.5}L_6FA_6RP_{0.5}$ karışımının 2, 7, 28 ve 56 gün kür uygulanmış serbest basınç dayanımları.....	121
Şekil 4.29.	$S_{87}L_6FA_6RP_1$ karışımının 2, 7, 28 ve 56 gün kür uygulanmış serbest basınç dayanımları.....	123
Şekil 4.30.	$S_{86.5}L_6FA_6RP_{1.5}$ karışımının 2, 7, 28 ve 56 gün kür uygulanmış serbest basınç dayanımları.....	123
Şekil 4.31.	$S_{84.5}L_6FA_9RP_{0.5}$ karışımının 2, 7, 28 ve 56 gün kür uygulanmış serbest basınç dayanımları.....	124
Şekil 4.32.	$S_{84}L_6FA_9RP_1$ karışımının 2, 7, 28 ve 56 gün kür uygulanmış serbest basınç dayanımları.....	125
Şekil 4.33.	$S_{83.5}L_6FA_9RP_{1.5}$ karışımının 2, 7, 28 ve 56 gün kür uygulanmış serbest basınç dayanımları.....	125

Şekil 4.34.	$S_{81.5}L_6FA_{12}RP_{0.5}$ karışımının 2, 7, 28 ve 56 gün kür uygulanmış serbest basınç dayanımları.....	126
Şekil 4.35.	$S_{81}L_6FA_{12}RP_1$ karışımının 2, 7, 28 ve 56 gün kür uygulanmış serbest basınç dayanımları.....	127
Şekil 4.36.	$S_{80.5}L_6FA_{12}RP_{1.5}$ karışımının 2, 7, 28 ve 56 gün kür uygulanmış serbest basınç dayanımları.....	127
Şekil 4.37.	$S_{78.5}L_6FA_{15}RP_{0.5}$ karışımının 2, 7, 28 ve 56 gün kür uygulanmış serbest basınç dayanımları.....	128
Şekil 4.38.	$S_{78}L_6FA_{15}RP_1$ karışımının 2, 7, 28 ve 56 gün kür uygulanmış serbest basınç dayanımları.....	129
Şekil 4.39.	$S_{77.5}L_6FA_{15}RP_{1.5}$ karışımının 2, 7, 28 ve 56 gün kür uygulanmış serbest basınç dayanımları.....	129
Şekil 4.40.	$S_{91}L_6FA_3RP_0$ içerikli karışımın 56 gün kür sonrası SEM görüntüsü.....	133
Şekil 4.41.	$S_{88}L_6FA_6RP_0$ içerikli karışımın 56 gün kür sonrası SEM görüntüsü.....	133
Şekil 4.42.	$S_{85}L_6FA_9RP_0$ içerikli karışımın 56 gün kür sonrası SEM görüntüsü.....	134
Şekil 4.43.	$S_{82}L_6FA_{12}RP_0$ içerikli karışımın 56 gün kür sonrası SEM görüntüsü.....	134
Şekil 4.44.	$S_{82}L_6FA_{15}RP_0$ içerikli karışımın 7 gün kür sonrası SEM görüntüsü.....	135
Şekil 4.45.	$S_{82}L_6FA_{15}RP_0$ içerikli karışımın 56 gün kür sonrası SEM görüntüsü.....	136
Şekil 4.46.	$S_{82}L_6FA_3RP_{0.5}$ içerikli karışımın 56 gün kür sonrası SEM görüntüsü.....	137
Şekil 4.47.	$S_{82}L_6FA_{12}RP_{0.5}$ içerikli karışımın 56 gün kür sonrası SEM görüntüsü.....	137
Şekil 4.48.	$S_{81.5}L_6FA_{12}RP_{0.5}$ içerikli kompozitin 2 gün kür süreli XRD difraksiyon grafiği	138
Şekil 4.49.	$S_{81.5}L_6FA_{12}RP_{0.5}$ içerikli kompozitin 56 gün kür süreli XRD difraksiyon grafiği.....	139

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge		Sayfa
Çizelge 2.1.	Problemlili geoteknik malzemeler ve potansiyel sorunları.....	18
Çizelge 2.2.	Bazı kil minerallerinin iklim ve ana kaya koşullarına göre oluşumu.....	20
Çizelge 2.3.	Sık rastlanan üç kil mineralindeki KDK değerleri.....	21
Çizelge 2.4.	Üç ana kil mineralinin aktivite değerleri.....	22
Çizelge 2.5.	Şişen zeminlerin, kolloid miktarı, plastisite indisi, rötre limitine bağlı olarak sınıflandırılması.....	22
Çizelge 2.6.	Plastisite indisine bağlı olarak zeminin şişme potansiyelinin tahmini.....	22
Çizelge 2.7.	Zeminlerin çökme potansiyeline göre sınıflandırılması.....	32
Çizelge 2.8.	Killi zeminlerde kireç katkısının plastisiteye etkisi.....	41
Çizelge 2.9.	Farklı zemin türlerinde kireç ile zemin stabilizasyonu	44
Çizelge 2.10.	Farklı zemin türleri için hacimsel çimento yüzdeleri.....	47
Çizelge 2.11.	Çimento katkılı ve katkısız zeminlerin serbest basınç mukavemetleri.....	48
Çizelge 2.12.	TSE ve ASTM'ye göre uçucu kimyasal uygunluk koşulları.....	58
Çizelge 2.13.	ASTM'ye göre F ve C sınıfı uçucu küllerin ağırlıkça içerdikleri bileşenler.....	59
Çizelge 2.14.	Kullanılmış atık lastiklerin kesim sonrası boyutları.....	66
Çizelge 3.1.	Sönmüş Kirecin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	70
Çizelge 3.2.	Seyitömer uçucu külünün kimyasal yapısı.....	72
Çizelge 3.3.	Kompaksiyon deneyi kapsamında kalıp ve elek seçimi.....	87
Çizelge 3.4.	Hazırlanan karışımlar ve oranları.....	92
Çizelge 4.1.	Karışımların likit ve plastik limit değerleri, plastisite indisleri..	107
Çizelge 4.2.	Zemin, kireç, uçucu kül ve lastiğin özgül ağırlıkları.....	109
Çizelge 4.3.	Karışımların, optimum su muhtevası, ρ_{kmax} ve su/katkı maddesi oranları.....	114
Çizelge 4.4.	Doğal zeminin ve karışımların şişme potansiyeli değerleri.....	116

Çizelge 4.5.	Kireç ve uçucu kül katkılı numunelerin 2, 7, 28 ve 56 günlük UCS dayanımları.....	118
Çizelge 4.6.	%6 kireç %3 uçucu kül ve atık lastik katkılı kompozitlerin serbest basınç dayanımları.....	122
Çizelge 4.7.	%6 kireç %6 uçucu kül ve atık lastik katkılı kompozitlerin serbest basınç dayanımları.....	124
Çizelge 4.8.	%6 kireç %9 uçucu kül ve atık lastik katkılı kompozitlerin serbest basınç dayanımları.....	126
Çizelge 4.9.	%6 kireç %12 uçucu kül ve atık lastik katkılı kompozitlerin serbest basınç dayanımları.....	128
Çizelge 4.10.	%6 kireç %15 uçucu kül ve atık lastik katkılı kompozitlerin serbest basınç dayanımları.....	130
Çizelge 4.11.	Yollarda temel-alt temel ve sıkıştırılmış toprak için minimum UCS değerleri.....	130
Çizelge 4.12.	XRF deney sonuçları.....	131

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	: Aktivite
S_w	: Şişme potansiyeli
ΔH	: Kabarma miktarı
H_o	: Numunenin başlangıç yüksekliği
e	: Boşluk oranı
σ	: Normal gerilme
m	: Oturma oranı
H_f	: Dolgunun maksimum yüksekliği: boşluk oranı
C_p	: Çökme potansiyeli
e_o	: Zeminin tabii haldeki boşluk oranı
σ_T	: Dolaylı çekme mukavemeti
E_s	: Elastisite modülü
μ	: Mikron
w_L	: Likit limit
C	: Kil yüzdesi
ρ_{kmax}	: Maksimum kuru birim hacim ağırlık

Kısaltmalar

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Official (Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaşım Yetkilileri Derneği)
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Kurumu)
CBR	: California Bearing Ratio (Kaliforniya Taşıma Oranı)
KDK	: Katyon Değişirme Kapasitesi
LASDER	: Lastik Sanayicileri Derneği
LL	: Likit Limit
PI	: Plastisite İndisi
TMMOB	: Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
USCS	: Unified Soil Classification System (Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi)
PL	: Plastik Limit
UCS	: Unconfined Compressive Strenght (Serbest Basınç Dayanımı)
XRF	: X-ışını floresans spektrometresi
XRD	: X-ışını difraktometresi
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
TÇMB	: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği
CH	: Yüksek Plastisiteli Kil
CL	: Düşük Plastisiteli Kil
MPa	: Megapascal
kPa	: Kilopascal
STS	: Splitting Tensile Strenght Test (Yarma Çekme Mukavemeti Testi)

1. GİRİŞ

Dünya çapında artan nüfusa ve giderek büyüyen yapılaşmaya bağlı olarak, yapılar için uygun alan miktarı giderek azalmaktadır. Bu nedenle yapılaşma için uygun olmayan problemlili zeminlerinde, çeşitli yöntemlerle iyileştirilip kullanılması zorunlu hale gelmiştir. Problemlili zeminlerle, uzun güzergahlara sahip olmaları ve değişik zeminler üzerine inşa edilme zorunlulukları sebebiyle özellikle ulaşım yapılarında sıkça karşılaşılmaktadır. Bu çalışmanın konusu olan ve problemlili zeminler kategorisinde bulunan şişen zeminler genellikle kil içeriği yüksek zeminlerden oluşmaktadır. Kil içeriği yüksek ya da kil davranışı gösteren zeminler, geoteknik mühendisliği uygulamalarında istenmeyen sonuçlara yol açabilmeleriyle tanınmaktadırlar. Mühendisler düşük mukavemet değeri, yüksek sıkışma ve düşük geçirgenlik özelliklerinden dolayı killi zeminler üzerine yüksek katlı bina, yol baraj vb. yapıların inşasını zorunlu olmadıkça tercih etmemektedirler. Bu tür zeminlerde su içeriğinin değişmesine bağlı olarak, hacimsel artış veya azalışlar gözlemlenir. Hacimdeki bu değişimler yapı temelinde oturmalara ya da istenmeyen gerilmelere sebep olabilmektedir. Bu sorunlara ek olarak zeminin işlenebilirliği de olumsuz şekilde etkilenebilmektedir. Killi zeminlerin oluşturduğu bu problemlilere karşı ön yükleme, kompaksiyon, su içeriğinin kontrol edilmesi, ön ıslatma ve son olarak katkı maddeleriyle iyileştirme yöntemleri kullanılabilirlerdir.

Deprem ve fırtına hasarlarına kıyasla, şişen zeminlerin etkilerinin ve oluşturduğu maliyetlerin göz ardı edildiği söylenebilir. Bu duruma zemin içinde oluşan hareketlerin uzun dönemde gözlemlenebilmesi ve yapılar üzerindeki etkilerinin yüzeysel olarak algılanması sebep olmaktadır. Ancak bu algının aksine şişen zeminlerin oluşturduğu hasar ve maliyetler ciddi boyutlara ulaşabilmekte, yapının taşıyıcı sisteminde deformasyona ve kullanım ömründe azalmalara sebep olabilmektedir. Şişen zeminlerle özellikle ülkemizin İç ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinde ayrıca Batı Anadolu'daki bazı alanlarda karşılaşılabilmektedir. Bu tür zeminler üzerinde yapılacak inşa projelerinde, zeminin özelliklerinin ayrıntılı şekilde ortaya konulması ve tasarım parametrelerinin bu bilgiler dikkate alınarak yapılması önem arz etmektedir.

Günümüzde problemlili zeminlerle karşılaşma sıklığının artmasının yanı sıra, artan sanayi ve inşaat artıklarının oluşturduğu çevre problemlerinde de ciddi artışların meydana

geldiği bilinmektedir. Bu atıklar yalnızca ülkemizin bir sorunu olmayıp, küresel ölçekte aşılması gereken bir problemdir. Zemin stabilizasyonunda kullanılan materyaller çimento, kireç ve yapay polimerler vb. yapı malzemeleri olabildiği gibi, metal cürufu, uçucu kül ve atık lastik gibi sanayi atıkları da olabilmektedir. Bahsi geçen tüm bu atık malzemelerin geoteknik mühendisliği projelerinde kullanılmasının, ekonomik olarak ve çevre koşullarının iyileştirilmesinde önemli katkıları bulunmaktadır. Katkı maddeleriyle zemin iyileştirmesinde, zemine bir veya birden fazla katkı malzemesi karıştırılmasıyla zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır.

Son yıllarda araştırmacılar katkı maddeleriyle zemin iyileştirmesi uygulamalarında alternatif malzemeler kullanılması üzerinde yoğunlaşmışlardır. Özellikle çeşitli üretim süreçlerinin sonucunda oluşan atık malzemelerin kullanılabilirliği, birçok araştırmaya konu olmuştur. Bahse konu olan atık maddelerin önemli bir kısmı, tekrar ekonomiye kazandırılacağı güne kadar depolanmakta; bu süreçte de doğaya, çevreye ve insan sağlığına zarar vermektedir. Bu bilgiler ışığında, tez çalışmasının temel iki hedefi bulunmakta bunlardan ilki; düşük taşıma kapasitesine sahip olan, su içeriğindeki artışla beraber şişen, su içeriğindeki azalmayla beraber hacimce küçülen ve oturmalara neden olan yüksek plastisiteli kil bir zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesidir. İkinci hedef olarak ise zemin iyileştirilmesinin mümkün mertebe atık malzemeler kullanılarak yapılmasıdır.

Yapılan kapsamlı literatür incelemesi sonucunda, konuyla ilgili yapılan araştırmaların çoğunun, kil zemine farklı boyutlardaki lastik parçalarının eklenmesi üzerine olduğu tespit edilmiştir. Araştırmacılar çoğunlukla atık lastik katkılı kil zeminlerin davranışları üzerinde durmuşlardır. Ancak geleneksel olarak zemin stabilizasyonunda kullanılan çimento, uçucu kül, kireç, silis dumanı gibi malzemeler ile ikinci katkı malzemesi olarak atık lastik kullanımı üzerine yapılan çalışma sayısının kısıtlı olduğu belirlenmiştir. Son dönemde çimento ile stabilize edilen kil zeminlere, atık lastik ilavesinin etkileri araştırılmaya başlanmış ve bu tür kompozitlerin davranışları incelenmiştir. Ancak atık lastik parçalarının, kireç ve uçucu kül ile stabilize edilen zeminlerin geoteknik özellikleri üzerindeki etkileri üzerine bir çalışma yapılmamıştır. Sonuç olarak atık lastik parçalarının, kireç ve uçucu kül ile iyileştirilmiş killi zeminler üzerindeki etkisinin değerlendirilebilmesi için kapsamlı bir çalışmaya ihtiyaç olduğu belirlenmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Çalışma kapsamında yüksek plastisiteli kil bir zemin üzerinde katkı maddeleriyle zemin iyileştirmesi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla zemin iyileştirmesine ihtiyaç duyan problemlili zeminlerin tanımlanması, kil mineralleri ve oluşumları, zeminlerin şişme özellikleri hakkında bilgiler verilmiştir. Ayrıca problemlili zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılan metotlar ve çeşitli katkı maddeleriyle yapılan zemin stabilizasyonu konularına bu bölümde değinilmiştir. Kaynak araştırması yapılırken, kireç ve uçucu külün etkilerinin birlikte değerlendirildiği ve atık lastiğin ikincil katkı malzemesi olarak kullanıldığı çalışmalar dikkate alınmıştır. Bu çalışma geleneksel bir yöntem olan kireç ve uçucu külün zemin üzerindeki etkilerinden ziyade; kil, kireç, uçucu kül ve atık lastik katkılı kompozit malzemenin davranışını araştırmaktadır.

2.1. İlgili Çalışmalar

Bu bölümde kil zeminler üzerinde kireç, uçucu ya da atık lastik kullanılarak gerçekleştirilen zemin iyileştirme çalışmaları ele alınmaktadır. Literatürde söz konusu katkı maddelerinin tekil olarak zemin iyileştirmesinde kullanılmasına yönelik birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarda elde edilen olumlu sonuçların ardından, araştırmacılar birden fazla katkı maddesinin zemine farklı oranlarda eklenmesinin etkilerini araştırmaya başlamışlardır. Bu çalışmalarda katkı maddelerinin zemin üzerindeki etkilerine ek olarak, birbirleriyle olan etkileşimleri de incelenmiştir. Çoğunlukla üretilen bu kompozit malzemeler, katkı maddelerinin tekil olarak kullanılmasına kıyasla daha etkili olmuştur. Bu bilgiler dikkate alınarak, tez çalışmasının literatürde doğru şekilde konumlandırılması amacıyla genişletilmiş SCI, Scopus dergileri ve hakemli tematik konferanslar incelenmiş, ilgili çalışmalar ise aşağıda listelenmiştir.

Chu ve arkadaşları 1955'te yaptıkları çalışmada dört farklı zemin üzerinde uçucu kül ve kireç kullanarak zemin iyileştirmesi yapmışlardır. Dört zeminden ikisi kil diğer ikisi siltli kil şeklindedir. Zemin ile uçucu kül-kireç karışımı oranı %75 ile %25 te sınırlanmıştır. %25 'lik uçucu kül-kireç karışımında kireç/uçucu kül oranı değiştirilmiştir. Kireç oranı artırılarak 28 günlük serbest basınç dayanımları incelenmiştir. Kireç oranı arttıkça serbest basınç dayanımının düştüğü tespit edilmiştir. Ayrıca çalışmada kireç-uçucu kül oranı 1/2 olarak sabit tutulmuş, genel karışımdaki kireç-uçucu kül oranı %10'dan %25'e

kadar arttırılmıştır. Deneyler sonucunda genel karışımdaki uçucu kül- kireç karışımı arttıkça dayanımın arttığı gözlemlenmiştir. Dayanıma kür süresinin etkisinin incelenmesi amacıyla %8.3 kireç %16.7 uçucu kül %75 zemin karışımları hazırlanmış ve 60 güne kadar kür uygulanmıştır. Artan kür süresiyle tüm zeminlerin dayanımı da doğru orantılı olarak artmıştır. Aynı zeminde değişen uçucu kül kireç karışımları hazırlanmış, %8.3 kireç %16.7 uçucu kül içerikli karışım ile %5 kireç ve %20 uçucu kül içerikli karışımlar kıyaslanmış, 1/2 oranlı karışımın daha iyi dayanım verdiği sonucuna ulaşılmıştır (Chu vd., 1955).

Ji-ru ve Xing 2002'de yaptıkları çalışmada yüksek plastisiteli kil bir zemin üzerinde değişen oranlarda kireç-zemin, uçucu kül-zemin ve kireç, uçucu kül- zemin karışımları hazırlayarak deneyler gerçekleştirmiştir. F tip uçucu kül kullanılan bu çalışmada %4L %96S, %5L%95S, %6L%94S, %40F%60S, %50F%50S, %4L%40F%56S (L:lime, F:Fly ash, S:Soil) şeklinde karışımlar hazırlanmıştır. Deneyler sonucunda zemine kireç eklenmesiyle plastik limitte ciddi artışlar gözlemlenmiş, plastisite indisinde ise yarı yarıya düşüşler meydana gelmiştir. Zemine yalnızca uçucu kül ilave edildiğinde ise, plastik limitte göze çarpan bir değişim gözlenmemiş buna karşın likit limitte ciddi düşüşler olmuştur. Sonuç olarak plastik limit gözle görülür şekilde düşmüştür. Kireç, uçucu kül-zemin karışımında ise plastik limit artmış likit limit düşmüş, plastisite indisi en düşük seviyeyi görmüştür. Kuru birim hacim ağırlıkta zemine artan oranlarda kireç ilave edilmesiyle düşüş gözlemlenmiş, zemine yalnızca uçucu kül ilave edilmesiyle kuru birim hacim ağırlıkta kireç katkısına göre daha büyük bir düşüş gözlemlenmiştir. En düşük kuru birim hacim ağırlık, kireç-uçucu kül- zemin karışımında meydana gelmiştir. CBR testinde en iyi sonucu %5L%95S karışımı vermiştir, ancak %4L%40F%56S ile çok yakın dayanım gözlemlenmiştir. Şişme potansiyeli zemine kireç ve uçucu kül ilavesiyle düşmüştür (Ji-ru ve Xing, 2002).

Shen ve arkadaşlarının 2007'de yaptıkları çalışmada kapsamlı bir şekilde yol alt malzemesi olarak, uçucu kül, kireç, çimento, fosfojips içerikli karışımlar hazırlanmış, kısa ve uzun dönem dayanımları karşılaştırılmıştır. Kireç olarak sönmüş kireç, modifiyeli sönmemiş kireç ve hızlı kireç olarak üç ayrı kireç kullanılmış, uçucu kül olarak F tipi uçucu kül kullanılmıştır. Karışımlar %8 sönmüş kireç- %92 uçucu kül, %8 hızlı kireç- %92 uçucu kül, %8 modifiye kireç-%92 uçucu kül katkılı ve %8 sönmüş kireç-%46 fosfojips- %46 uçucu kül, %8 hızlı kireç-%46 fosfojips-%46 uçucu kül, %8 modifiye

kireç-%46 fosfojips- %46 uçucu kül olarak hazırlanmıştır. 7 ve 28 günlük dayanımlar incelendiğinde en yüksek dayanım %8 modifiye kireç-%46 fosfojips- %46 uçucu kül karışımında gözlemlenmiştir. Modifiye edilmiş kireç oranı %10'da maksimum değere ulaşmıştır. Optimum fosfojips oranı 7 günlük dayanım için %23-34 arasında, 28 günlük dayanım için %18-23 bulunmuştur. Optimum fosfojips içerikli karışımın, fosfojips içermeyen uçucu kül kireç karışımından %90 oranında daha fazla dayanım verdiği görülmüştür. Bir yıla kadar yapılan kür işlemi sonrasında en yüksek dayanımlar sırasıyla kireç-uçucu kül-fosfojips karışımı, kireç-uçucu kül, kireç-uçucu kül-zemin, çimento-kireç-zemin, sönmüş kireç-zemin, çimento zemin şeklinde gerçekleşmiştir. Sonuç olarak kireç-uçucu kül-fosfojips karışımının yol temel malzemesi olarak kullanılabileceğini, ayrıca hali hazırda bazı otoyol projelerinde kullanıldığı ve iyi etkiler verdiği belirtilmiştir (Shen vd., 2007).

Mateos ve Davidson'ın 1962'de yaptıkları çalışmada, dört farklı zemin üzerinde (kum, silt ve iki adet farklı bölgelerden alınmış yüksek plastisiteli kil) geoteknik laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Deneylerde kireç, uçucu kül ve Portland çimentosu katkı malzemesi olarak kullanılmıştır. Deneyler sonucunda her zemin için ortak bir kireç-uçucu kül oranı bulunmamıştır. Uçucu kül ve kireç oranı iyileştirme yapılan zemine göre değişmektedir. Granüle zeminler için optimum kireç miktarı %3 ile %6 arasında, uçucu kül oranı ise %10 ile %25 oranında gerçekleşmiştir. Killi zeminler için optimum kireç oranı %5 ile %9 arasında değişmekte, uçucu kül oranı %10 ile %25 oranında değişmektedir. Dolomitik hidratlı kireç genellikle kireç-uçucu kül-zemin karışımlarında, kalsitik hidratlı kireç içeren karışımlardan iyi sonuç vermiştir. Uçucu kül ilavesi kireç-zemin karışımlarının hepsinde faydalı olmuştur. Portland çimentosu zeminlerin çoğunda etkili bir stabilizer olarak tespit edilmiştir. Bu tür karışımlarda dayanım hızlı bir şekilde yükselmiş ve en yüksek dayanıma ulaşma göreceli olarak kısa sürmüştür. Ancak kireç-uçucu kül- zemin karışımlarında dayanım kazanımı uzun süreli olarak gerçekleşmiştir. En yüksek dayanımın birkaç yıl sürebileceği tahmini yapılmıştır. 28 günlük kürün ardından çimento-zemin karışımı optimum dayanıma %90 oranında ulaşmış, kireç-uçucu kül-zemin karışımında bu oran %50 olarak gerçekleşmiştir (Mateos ve Davidson, 1962).

Zumrawi ve Hamza'nın 2014'te yaptıkları çalışmada yüksek plastisiteli kil bir zemin üzerinde CBR, UCS, serbest şişme, şişme basıncı ve zemin endeks özelliklerinin belirlenmesi amacıyla deneyler yapılmıştır. Karışımlar hazırlanırken sönmüş kireç, F tipi

uçucu kül ve CH tip zemin kullanılmıştır. Karışımlar %5 kireç-%5 uçucu kül, %5 kireç-%10 uçucu kül, %8 kireç-%5 uçucu kül, %8 kireç katkıli olarak hazırlanmıştır. Zemine artan oranlarda kireç ve uçucu kül ilave edildiğinde zeminin plastisite indisi düşmüştür. Serbest şişme indeks deneyinde, artan kireç-uçucu kül katkısı zeminin serbest şişme oranını ciddi oranda düşürmüştür. Şişme basıncı zemine %8 kireç ve %5 kireç-%5 uçucu kül ilave edildiğinde 167 Kpa'dan 0 değerine düşmüştür. CBR ve UCS deneylerinde artan kür süresiyle dayanım artış göstermiştir. Zemine %8 kireç ilave edildiğinde en iyi dayanım değerine ulaşmış, sonrasında sırasıyla en iyi dayanımı %8 kireç %5 uçucu kül, %5 kireç-%10 uçucu kül, %5 kireç-%5 uçucu kül ve son olarak doğal zemin göstermiştir (Zumrawi ve Hamza, 2014).

Athanasopoulou'nun 2014'te yaptığı çalışmada iki farklı yüksek plastisiteli kil zemin kireç ve uçucu kül ile iyileştirilerek, yol alt temel olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Karışımlar %4 uçucu kül-zemin, %8 uçucu kül- zemin, %12 uçucu kül-zemin, %16 uçucu kül-zemin, %4 kireç- zemin, %8 kireç- zemin, %12 kireç- zemin şeklinde hazırlanmıştır. Karışım içerisindeki kireç ya da uçucu kül oranı arttığında, zeminin plastisite indisi düşmüştür, plastisite indisindeki düşüş kireç eklenen karışımlarda daha yüksek olmuştur. Zemine uçucu kül ve kireç ilavesiyle CBR değeri ciddi şekilde artmış, ancak kireç ilaveli zeminler çok daha büyük dayanım göstermiştir (Athanasopoulou, 2014).

Mishra'nın 2012'de yaptığı çalışmada düşük plastisiteli kil bir zemin üzerinde sönmüş kireç ve uçucu kül ile zemin iyileştirmesi yapılmış, elde edilen karışımların yol alt temel olarak kullanılabilirliği incelenmiştir. Bu amaçla karışımlar üzerinde CBR ve kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Bu amaçla %10 uçucu kül-zemin, %20 uçucu kül-zemin, %30 uçucu kül-zemin, %40 uçucu kül-zemin, %50 uçucu kül-zemin, %1 kireç-zemin, %2 kireç-zemin, %3 kireç-zemin, %4 kireç-zemin, %5 kireç-zemin, %10 uçucu kül-%2 kireç-zemin, %10 uçucu kül-%3 kireç-zemin, %20 uçucu kül-%2 kireç-zemin, %20 uçucu kül-%3 kireç-zemin, %30 uçucu kül-%2 kireç-zemin, %30 uçucu kül-%3 kireç-zemin karışımlar hazırlanmıştır. CBR değerinde en iyi kireç-uçucu kül-zemin karışımına, %30 uçucu kül-%3 kireç-zemin karışımında ulaşılmıştır (Mishra, 2012).

Davidson ve arkadaşlarının 1959'da yaptığı çalışmada kum-uçucu kül-kireç içerikli zemine 47 farklı kimyasal katkı maddesi eklenmiş, farklı oranlarda hazırlanan karışımlar sonucu kimyasalların dayanıma olan katkısı incelenmiştir. Karışımlar %75 kum-%25 kireç-uçucu kül içerikli olarak hazırlanmış, kireç-uçucu kül içeriği %22.5-%2.5 ve %20-

%5 şekilde değiştirilmiştir. Hazırlanan bu karışımlara %0.5 ve %1 oranında 47 farklı kimyasal ilave edilmiş, hazırlanan numuneler 7 gün, 28 gün ve 4 ay süreyle küre tabii tutulmuştur. Ayrıca kimyasalların toz olarak ve suyla karıştırılarak zemine eklenmesinin dayanım üzerindeki etkileri incelenmiştir. Toz halde eklenmesi, solüsyon halde zemine eklenmesine kıyasla daha olumlu sonuçlar veren kimyasallar bulunmuş, bu bilgi kullanılarak diğer karışımlar hazırlanmıştır. Genel olarak dayanım değerleri incelendiğinde %75 kum-%20 uçucu kül-%5 kireç içerikli karışımlar, %75 kum-%22.5 uçucu kül-%2.5 kireç içeren karışımlara kıyasla daha iyi dayanım vermiştir. Ayrıca artan kür süresinin malzemelerin dayanımları üzerinde olumlu etkisi tespit edilmiştir. Hazırlanan karışımlarda kimyasalların %0.5 ve %1 oranında ilave edilmesinin, dayanım üzerinde farklı etkileri olmuştur. Bazı karışımlarda %0.5 oranı yüksek dayanım verirken, diğerlerinde %1 oranı daha yüksek dayanım göstermiştir. Sonuç olarak en iyi dayanımı %75 kum %20 uçucu kül-%5 kireç %0.5 sodyum karbonat içerikli ve 4 ay süreyle kür uygulanan karışım göstermiştir (Davidson vd., 1959).

Nalbantoğlu'nun 2004 yılında yaptığı çalışmada yüksek ve düşük plastisiteli iki kil zemin üzerinde C tipi uçucu kül kullanılarak, zemin iyileştirmesi yapılmıştır. Zemine artan miktarlarda uçucu kül ilave edilmesiyle, yüksek plastisiteli kil zeminin likit limiti düşmüş, düşük plastisiteli kil zeminin likit limit değerinde ise küçük bir yükselme gözlenmiştir. Plastik limit değerinde ise her iki zeminde artış yaşanmış ve plastisite indisinde düşüş meydana gelmiştir. Ayrıca artan uçucu kül ilavesi her iki zeminin büzülme limiti azalmıştır. Hazırlanan yüksek plastisiteli kil zemin numuneler üzerinde yapılan şişme potansiyeli deneyinde, artan uçucu kül katkısının şişme potansiyelini ciddi oranda düşürmüştür. Ayrıca artan kür süresinin de şişme potansiyelinin düşürülmesinde etkili olduğu gözlemlenmiştir. Benzer şekilde şişme basıncı çoğunlukla artan uçucu kül ilavesiyle her iki zeminde azalmıştır. Düşük plastisiteli kil zemine %15 oranına kadar uçucu kül ilave edildiğinde şişme basıncı düşmüş artan oranda uçucu külde ise şişme basıncı artmıştır. Ek olarak çalışma kapsamında katyon değişim kapasitesi üzerine deneyler yapılmış ve sonuç olarak artan uçucu kül oranı ile katyon değişim kapasitesinde her iki zeminde düşüş gözlemlenmiştir (Nalbantoğlu, 2004).

Zha ve arkadaşlarının 2008 yılında yaptıkları çalışmada yüksek plastisiteli kil bir zemin üzerinde, kireç ve uçucu kül ile iyileştirme yapılmış ve sonuçlar gözlemlenmiştir. Karışımlar hazırlanırken zemine %3, %6, %9, %12, %15 oranında uçucu kül ilave

edilmiş, sonrasında ikinci katkı malzemesi olarak %1, %2, %3 oranında uçucu kül-kireç-zemin ilaveli zeminler hazırlanmış ve kıyaslanmıştır. Zemine yalnızca uçucu kül ilave edilmesinin zeminin plastisite indisini düşürdüğü, en düşük plastisite indisi değerine ise %2 kireç ve %15 uçucu kül ilaveli karışımda ulaşılmıştır. Benzer davranış şişme potansiyeli, serbest şişme, büzülme limiti değerlerinde de gözlemlenmiş, yalnızca uçucu kül ilave edilmesiyle elde edilen iyileşmeye kıyasla, kireç-uçucu kül ilaveli karışımlar daha iyi performans göstermiştir. Bu deneylerde de en iyi sonuçlar %3 kireç ve %15 uçucu kül ilaveli karışımlarda ortaya çıkmıştır. Kür süresinin şişme potansiyeli ve basıncı üzerindeki etkisi ise olumlu şekilde gerçekleşmiş, kür ile karışımlarda belirgin düşüşler gözlemlenmiştir. Zemine artan oranlarda kireç ve uçucu kül eklendiğinde karışımın maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevası düşmüştür. Serbest basınç deneyleri sonuçlarına göre zemine uçucu kül eklenmesinin zeminin dayanımı önemli ölçüde arttırdığı, ancak uçucu kül ile kireç içerikli karışımların daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir. Kireç oranın sabit olduğu durumlarda artan uçucu kül yüzdesinin dayanımı belli bir noktaya kadar çıkardığı, sonrasında düşürdüğü gözlemlenmiştir. En iyi serbest basınç dayanımı %9 uçucu kül-%3 kireç karışımı zeminlerde gözlemlenmiştir (Zha vd., 2008).

Indiramma ve arkadaşlarının 2020 yılında yaptıkları çalışma kapsamında yüksek plastisiteli kil bir zemin üzerinde kireç ve uçucu kül ile iyileştirme yapılmış, yalnızca kireç katkısının ve kireç-uçucu kül karışımının zemin üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla %4 ve %8 kireç-zemin, sonrasında %4 kireç-%10 uçucu kül-zemin, %8 kireç-%10 uçucu kül-zemin karışımları hazırlanmıştır. Kireç-uçucu kül içerikli karışımlar, sadece kireç içerenlerden likit limit, plastisite indisi ve serbest şişme indeksinde daha iyi performans sergilemişlerdir. Ancak serbest basınç deneyinde yalnızca %8 kireç içeren numuneler, kireç-uçucu kül dahil edilen karışımlara göre daha büyük dayanıma sahiptir. Kireç-uçucu kül içerikli karışımlar zeminin dayanımını iyileştirme yapılmayan zemine göre iyileştirmiş, ancak kireç katkılı içeriğe göre düşürmüştür (Indiramma vd, 2020).

Mohammed ve Vipulanandan'ın 2015 yılında yaptıkları çalışmada düşük plastisiteli kil bir zemin üzerinde, kalsiyum sülfat, kireç ve uçucu kül ve bu malzemelerin çeşitli kombinasyonlarıyla numuneler hazırlanmıştır. Zemine %1, %2 ve %4 oranında kalsiyum sülfat, %6 kireç ve %10 uçucu kül ilave edilmiştir. Zemin-kalsiyum sülfat, zemin-kireç-kalsiyum sülfat ve zemin-uçucu kül- kalsiyum sülfat içerikli karışımlarda artan kalsiyum

sülfat oranıyla serbest şişme oranı ve optimum su muhtevası artmıştır. Aynı koşullarda maksimum kuru birim hacim ağırlığında azalan bir eğilim görülmüştür. Serbest basınç deneyinde ise artan kalsiyum sülfat oranı karışımların serbest basınç dayanımında düşüşe neden olmuştur (Mohammed ve Vipulanandan, 2015).

Karami ve arkadaşlarının 2021 yılında yaptıkları çalışmada düşük plastisiteli kil bir zemin üzerinde, sönmüş kireç, uçucu kül, Eko soil bazlı stabilizer, CSA çimento ve polimer kullanılarak zemin iyileştirmesi yapılmış ve karışımların ulaşım projelerinde yol altyapısı olarak kullanılabilirliği incelenmiştir. Karışımlar zemin-uçucu kül, zemin-uçucu kül-polimer, zemin-uçucu kül- stabilizer, zemin-uçucu kül- stabilizer-polimer, zemin-uçucu kül- stabilizer-CSA çimento, zemin-uçucu kül- CSA çimento, zemin-uçucu kül- stabilizer-kireç içerecek şekilde hazırlanmıştır. Karışımlarda uçucu kül sabit tutulmuş ve %7.5, %15 uçucu kül karışımlara eklenmiştir. Zemine uçucu kül ilave edildiğinde, optimum su muhtevası düşmüş, maksimum kuru birim hacim ağırlığı artmış, CBR değerinde ciddi düşüş gözlemlenmiştir. Zemine uçucu kül ve stabilizer eklendiğinde, optimum su muhtevası, maksimum kuru birim hacim ağırlık ve CBR değerinde artış yaşanmıştır. Çalışmanın devamında zemine uçucu kül, kireç ve stabilizer ilave edilmiş hem stabilizer içeren hem de içermeyen karışımlarda, optimum su muhtevası artmış, kuru birim hacim ağırlık değeri düşmüş ve CBR değerinde büyük bir artış yaşanmıştır. Zemin-uçucu kül-çimento-stabilizer katkılı karışımlarda CBR değerinde artış gözlemlenmiştir. Zemin-uçucu kül- polimer-stabilizer katkılı karışımlarında CBR değeri yükselmiştir. CBR değerlerinde zemin-uçucu kül- kireç-stabilizer katkılı zemin en iyi CBR değerini vermiş, stabilizer olmayan karışımında daha düşük ama benzer bir dayanım göstermiştir. Bu karışımlar alt temel olarak kullanıldığında serilecek malzeme kalınlığı minimum seviyededir. Sonuç olarak kireç-uçucu kül içerikli karışımlar ile düşük maliyetli, sürdürülebilir ve çevre dostu bir zemin iyileştirme yapılabileceği, bu karışımın yol alt temel olarak kullanılabiliceği bildirilmiştir (Karami vd, 2021).

Kumar ve arkadaşlarının 2007 yılında yaptıkları çalışmada Hindistan'da black cotton soil olarak adlandırılan bir zemin üzerinde kireç, uçucu kül ve polyester fiber kullanılarak zemin iyileştirmesi yapılmıştır. Karışımlar %2, %4, %6, %8, %10 oranında kireç, %5, %10, %15, %20 oranında uçucu kül, %0.5, %1, %1.5, %2 oranında polyester fiber içerikli olarak hazırlanmıştır. Karışım içeriğindeki kireç ve uçucu kül miktarı arttığında zeminin optimum su içeriğinde artış gözlemlenmiş, çoğunlukla uçucu kül oranının sabit tutulduğu

kireç oranının arttığı numunelerde %10 kireç ilavesine kadar numunelerin serbest basınç dayanımı artmıştır. 7, 14 ve 28 gün kür süresiyle bu karışımlardaki dayanım artmış, en iyi dayanımı %20 uçucu kül-%10 kireç karışımı göstermiştir. Zemine yalnızca artan oranlarda uçucu kül ilavesi, serbest basınç ve çekme gerilmesi dayanımını giderek düşürmüştür. Diğer taraftan zemine yalnızca kireç ilave edilmesi, kireç içeriğinin %8 olduğu duruma kadar dayanımı arttırmış, sonrasında düşürmüştür. Sonrasında polyester fiberin etkisinin değerlendirilmesi için, optimum kireç-uçucu kül karışımı (%8-%15) üzerinde farklı boyutlarda ve oranlarda polyester fiber eklenmiştir. Karışıma artan oranlarda polyester fiberin eklenmesi serbest basınç ve çekme dayanımını büyük oranda arttırmıştır. Polyesterin uzunluğu ve şekli değiştiğinde dayanımı üzerinde farklı etkileri olmuştur. Uzunluk arttıkça serbest basınç ve çekme dayanımı artmış, kıvrımlı fiberler ise aynı uzunluktaki düz fiberlere göre daha iyi dayanım göstermiştir. Sonuç olarak yalnızca kireç, uçucu kül ya da polyester fiber kullanmak yerine, bu katkı maddelerinin bir karışımı şeklinde hazırlanan kompozit malzemeler daha avantajlıdır (Kumar vd., 2007).

Zhou ve arkadaşlarının 2019 yılında yaptıkları çalışmada şişen bir zemin üzerinde kireç ve uçucu kül kullanılarak iyileştirilme yapılmıştır. Karışım içeriğindeki uçucu kül miktarı arttığında, plastisite indisi yavaş bir şekilde düşmüştür. Uçucu kül-zemin karışımına, kireç eklenmesiyle serbest şişme oranı ve plastisite indisi ciddi şekilde düşmüştür. Karışıma %5 oranında kireç eklenmesinin, zeminin şişme potansiyelini büyük ölçüde düşürdüğü görülmüştür. Zemine yalnızca uçucu kül ilave edilmesiyle önce serbest basınç ve çekme dayanımında artış sonrasında düşüş yaşanmıştır. Optimum karışım oranı ise %5 kireç-%10 uçucu kül içerikli olarak serbest basınç ve çekme dayanımında görülmüştür. En yüksek serbest basınç dayanımına sahip olan bu karışım aynı zamanda en düşük şekil değiştirme oranına sahiptir. Malzeme daha gevrek hale gelmiş, dayanımı artmış ancak sünekliğinde düşüş gözlenmiştir. Yapılan XRD ve SEM analizleri sonucu şişen zeminin mikroyapısının kırılğan bir yapıya sahip olduğu çeşitli boşluk ve kırıklar içerdiği belirlenmiştir. Zemine uçucu kül ilave edilmesiyle, zemin içeriğindeki bu kırık ve çatlaklar, uçucu kül parçaları ve hidrasyon ürünleri ile kapatılmıştır. Benzer şekilde zemine kireç ilave edilmesinin kırılğan zemin yapısını, iyon değişimi ve puzolanik reaksiyonlar ile kristal ya da bloklı bir yapıya dönüştürdüğü belirlenmiştir. Zemine kireç ve uçucu kül ilave edildiğinde, zemin içeriğindeki silisyum oksit miktarı azalmış, zemin içeriğindeki silisyum oksit, kalsiyum hidroksit ile birleşerek C-S-H jellerini

oluşturmuştur. Dayanımdaki artışın bu puzolanik reaksiyonlar sonucu oluşan C-S-H jelleri ile bağlantılı olduğu ortaya koyulmuştur (Zhou vd., 2019).

Bekhiti ve arkadaşlarının 2019 yılında yaptıkları çalışmada çimento ile iyileştirilen yüksek plastisiteli kil bir zemin üzerinde, fiber lastik parçaları kullanılarak zemin iyileştirmesi yapılmıştır. %5, %7.5, %10 çimento katkılı zemine, %0.5, %1, %2 lastik eklenmiş ve bu şekilde numuneler hazırlanmıştır. Artan lastik ilavesiyle zeminin likit limit değeri ve plastisite indisi giderek azalmış, kompaksiyon testinde lastik ilavesi zeminin kuru birim hacim ağırlığını düşürmüştür, optimum su muhtevasında ciddi bir değişikli gözlemlenmemiştir. Numuneler üzerinde yapılan şişme potansiyeli deneyinde, lastik oranı arttırıldığında şişme potansiyeli azalmıştır. Zeminin serbest basınç dayanımı çimento ve lastik ilavesiyle artmış, daha sünek bir malzeme elde edilmiştir. Çalışma sonucunda en yüksek serbest basınç dayanımına sahip ve en sünek karışım, %7.5 çimento-%2 lastik katkılı numune olmuştur (Bekhiti vd., 2019).

Singh ve arkadaşlarının 2017 yılında yaptıkları çalışmada düşük plastisiteli kil bir zemin üzerinde, iki farklı boyuttaki lastik katkısıyla değişen oranlarda karışımlar hazırlanmıştır. Çalışma kapsamında 0.425 mikron ve 0.150 mikron büyüklüğündeki atık lastikler %4.5, %9, %13.5 ve %18 oranlarında zemine ilave edilmiştir. Zemine lastik eklenmesiyle, zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevası giderek azalmıştır. Serbest basınç deneyi sonuçlarına göre ise artan atık lastik katkısıyla mukavemet değerinde artış gözlemlenmiştir. Büyük ölçülere sahip atık lastik ilavesi, küçük ölçülere göre daha olumlu sonuç vermiştir (Singh vd., 2017).

Ravichandran ve arkadaşlarının 2016 yılında yaptıkları çalışma kapsamında, iki farklı yüksek plastisiteli kil zemin üzerinde, atık lastik katkısının etkilerini değerlendirmişlerdir. Atık lastik boyutları 425 mikron ile 600 mikron arasında kalacak şekilde belirlenmiştir. Karışımlar %5, %10, %15 ve %20 lastik katkılı şekilde hazırlanmıştır. Artan atık lastik katkısıyla, karışımın maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevası düşmüştür. Zeminin dayanımının belirlenmesi amacıyla yapılan CBR testlerinde, atık lastik ilavesiyle her iki zeminde dayanım artarak %10 lastik ilaveli karışımda en yüksek değere ulaşmış, sonrasında düşmüştür. Ayrıca her iki zeminde de lastik ilavesi permeabilite katsayısını giderek arttırmıştır. Sonuç olarak atık lastik katkısının zemin iyileştirmesinde kullanılabileceği kanıtlanmıştır (Ravichandran vd., 2016).

Akbulut ve arkadaşlarının 2007 yılında yaptıkları bu kapsamlı çalışmada, araştırmacılar üç farklı yüksek plastisiteli kil zemin üzerinde atık lastik, polietilen ve polipropilen fiber lifler kullanılarak zemin iyileştirmesi gerçekleştirmiştir. Numuneler hazırlanırken değişen lif uzunluklarının etkileri de araştırılmıştır. Atık lastik katkılı numuneler %1, %2, %3, %4 ve %5 lastik içerikli, polietilen ve polipropilen içerikli numuneler ise %0.1, %0.2, %0.3, %0.4 ve %0.5 içerikli olarak hazırlanmıştır. Her üç zemin için serbest basınç deneyinde lastik ilaveli karışımlarda, en iyi sonucu %2 lastik oranlı olan ve 10 mm fiber içerikli karışımlar vermiştir. Polietilen ve polipropilen fiber lifler kullanılarak hazırlanan numunelerde en iyi serbest basınç deneyi sonucunu sırasıyla, %0.2 oranlı ve 15 mm fiber içerikli, %0.2 oranlı ve 10 mm fiber içerikli karışımlar göstermiştir. Genel olarak lastik ve sentetik fiberler kohezyon değerini arttırmış, maksimum kohezyon değeri 10 mm uzunluğundaki fiber içerikli karışımlarda gözlemlenmiştir. Benzer şekilde içsel sürtünme açısı da iyileştirilmiş zeminlerde lineer olmayan bir şekilde artmıştır. Lastik, polietilen ve polipropilen fiber lifler malzemenin sönümleme oranını, kesme modülünü iyileştirmiştir. Maksimum değerlere 10 mm uzunluğunda- %2 lastik içerikli karışımda ve 15 mm uzunluğunda %0.2 polietilen-polipropilen içerikli karışımlarda ulaşılmıştır. Sonuç olarak bu katkı malzemelerinin zemin iyileştirmesinde kullanılması ve maliyetleri düşürmesi mümkün görülmüştür (Akbulut vd., 2007).

Jafari ve Esna-ashari'nin 2012 yılında yaptıkları çalışmada düşük plastisiteli kil bir zemin üzerinde, kireç ve lastik kullanılarak zemin iyileştirmesi yapılmıştır. Kompaksiyon deneyi sonucunda zemine kireç ve lastik ilave edilmesiyle optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri düşmüştür. Çalışma kapsamında %4 kireç, %8 kireç içerikli ve %0.5, %1, %1.5 lastik içerikli karışımlar hazırlanmış, karışımlar üzerinde serbest basınç deneyi ve donma-çözünme çevrimi deneyleri yapılmıştır. Zemine yalnızca atık lastik ve kireç ayrı ayrı ilave edildiğinde karışımların serbest basınç dayanımlarında artış gözlemlenmiştir. Ayrıca artan kür süresiyle dayanımda ciddi bir artış yaşanmıştır. %4 ve %8 kireç içeriğinin üzerine atık lastik ilave edilerek hazırlanan numunelerde, artan atık lastik ilavesiyle dayanımında iyileşme gerçekleşmiştir. %4 kireç içerikli karışımlar %8 içeriklilere göre serbest basınç deneyinde daha başarılı olmuştur. Karışımlar üzerinde yapılan donma-çözünme testlerinde katkısız zemin, ikinci donma çözünme çevriminde tüm dayanımını kaybetmiştir. Donma çözünme çevriminde en iyi performansı %4 kireç %1.5 lastik içerikli karışım göstermiştir. Donma çözünme çevriminde lastik ilavesinin bir katkısı görülmemiştir. Çalışma sonucunda kireç-lastik

ilavesinin zemin iyileştirmesinde etkin olarak kullanılabilceği ispatlanmıştır (Jafari ve Esna-ashari, 2012).

Hambirao ve Rakaraddi'nin 2014 yılında yaptıkları çalışma kapsamında siltli ve killi iki farklı zemin üzerine %2, %4 çimento ve %5, %10, %15 lastik ilave edilerek numuneler hazırlanmış, karışımlar üzerinde serbest basınç deneyi kaliforniya taşıma oranı deneyleri yapılmıştır. Yalnızca %2 çimento ilave edilen karışımlar, %4 çimento içerenlere kıyasla daha düşük dayanım göstermiştir. Her iki zeminde de çimento ile %5 lastik ilavesiyle zeminin UCS ve CBR değerlerinde artış yaşanmış, artan oranlarda lastik ilave edildiğinde dayanımı düşürmüştür. Sonuç olarak optimum içerik %4 çimento-%5 atık lastik ilaveli karışım olarak belirlenmiştir. Her iki zeminde de ıslatılmış CBR testinde ciddi oranda bir dayanım artışı olmuş, yol kaplama kalınlığında yaklaşık %60 bir düşüş yaşanmıştır. Çalışma sayesinde artan CBR değeri ile karayolu kaplama kalınlığında azalma sağlanabileceği ve maliyetlerde düşüş gerçekleşmektedir (Hambirao ve Rakaraddi, 2014).

Cabalar ve arkadaşlarının 2014 yılında yaptıkları çalışma kapsamında killi bir zemin üzerinde %2, %4 ve %6 kireç katkısı ayrıca %5, %10 ve %15 lastik kullanarak zemin iyileştirmesi yapmışlardır. Zemine yalnızca atık lastik ilave edilmesiyle lastik içeriği arttıkça, maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası değeri azalmıştır. Zemine artan oranlarda kireç ilave edildiğinde ise optimum su muhtevası artmış, ancak maksimum kuru birim hacim ağırlığında düşüş gözlemlenmiştir. Karışımlar üzerinde yapılan CBR ve UCS deneyleri sonucunda, zemine yalnızca lastik ilavesiyle her iki deneyde de dayanım düşmüş, sadece artan oranlarda kireç ilave edildiğinde ise dayanımda artış yaşanmıştır. Buna karşın kireç içerikli karışıma atık lastik eklendiğinde CBR ve UCS değerlerinde azalan değerler belirlenmiştir (Cabalar vd., 2014).

Habibi ve arkadaşlarının 2021 yılında yaptıkları çalışmada iki farklı düşük plastisiteli kil zemin üzerinde kireç ve atık lastik tekstil fiberleriyle zemin iyileştirmesi incelenmiştir. Bu amaçla zemin üzerinde UCS, CBR ve çekme gerilmesi deneyleri yapılmış ayrıca karışımların kohezyon ve içsel sürtünme açıları tespit edilmiştir. Bu amaçla zemine %2, %4 ve %6 kireç ayrıca %0.5, %1, %1.5, %2 ve %3 lastik fiber eklenmiştir. Zeminlere yalnızca lastik fiber eklendiğinde zeminin optimum su muhtevası değeri giderek artmış, maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri ise azalmıştır. Kohezyon değeri ise %1.5 lastik ilavesiyle en yüksek değere ulaşmış, sonrasında düşmüştür. İçsel sürtünme açısı

eklenen lastik ilavesiyle doğru orantılı olarak artmıştır. Zemine yalnızca kireç ilave edilmesiyle optimum su muhtevası artmış, maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri ise düşmüştür. Artan kireç içeriği karışımın kohezyon ve içsel sürtünme açısında iyileşme sağlamıştır. Kireç ve lastik katkıların beraber kullanıldığı durumda ise, optimum su muhtevası artmış maksimum kuru birim hacim ağırlığı ise giderek azalmıştır. Kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri ise yalnızca lastik kullanılarak hazırlanan numunelere benzer olarak %1.5 lastik içerikli olan karışımlarda maksimum değere ulaşmıştır. UCS, CBR ve STS deneylerinde de en iyi dayanım değerlerini %1.5 lastik içerikli olan karışımlar vermiştir. Araştırma sonucunda yalnızca kireç ya da lastik fiber kullanılmasına kıyasla, bu katkı malzemelerinin birlikte kullanılmasının zemin iyileştirmesinde daha faydalı olduğu ispatlanmıştır (Habibi vd., 2021).

Kim ve Kang'ın 2013 yılında yaptıkları çalışmada düşük plastisiteli kil bir zemin, atık lastik, çimento ve taban külü kullanılarak oluşturulan kompozit malzemenin geoteknik özellikleri incelenmiştir. Karışımlar kil içeriğiyle orantılı olarak oluşturulmuş ve çimento içeriği %20 oranında sabit tutulmuş, taban külü %50, %100 olarak belirlenmiş, lastik içeriği ise %25, %50, %75 ve %100 oranında değişiklik göstermiştir. Taban külü eklenmesi kuru birim hacim ağırlığını arttırmış, ancak atık lastik ilavesiyle karışımın kuru birim hacim ağırlığı düşmüştür. Benzer şekilde zemine taban külü eklenmesiyle UCS değeri ve zeminin sertliği artmış, artan lastik ilavesiyle ise UCS dayanımı, CBR değeri ve kesme modülü giderek düşmüştür. Sonuç olarak kompozit malzemeye taban külü eklenmesiyle, karışımın alternatif dolgu malzemesi olarak kullanılabilceği ispatlanmıştır (Kim ve Kang, 2013).

Kalkan'ın 2013 yılında yaptığı çalışmada yüksek plastisiteli kil bir zemin üzerinde silika dumanı ve lastik kullanılarak zemin iyileştirmesinin sonuçları incelenmiştir. Bu kapsamda zemine %10 ve %20 oranında silika dumanı ayrıca %1, %2, %3 ve %4 oranında atık lastik ilave edilerek karışımlar hazırlanmıştır. Zemine yalnızca silika dumanı ya da lastik ilave edilmesiyle zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlığı azalmış, en düşük değere %20 silika dumanı-%4 lastik içeren karışımda rastlanmıştır. Söz konusu optimum su muhtevası olduğunda ise, zemine silika dumanı ilavesi optimum su muhtevasını arttırmış, lastik ilavesi ise azaltmıştır. Zemine artan oranlarda silika dumanı ilave edildiğinde, serbest basınç dayanımı, kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri yükselmiş, hidrolik geçirgenlik ve şişme basıncı değerleri azalmıştır. Silika dumanı ile

iyileştirilen zemine ikinci katkı maddesi olarak lastik eklendiğinde %2 lastik ilavesine kadar tüm mühendislik özelliklerinde iyileşme gözlenmiş, artan oranlarda ise düşüşler gözlemlenmiştir. En yüksek serbest basınç deneyi sonucuna, %20 silika dumanı-%2 lastik fiber karışımında ulaşılmıştır. Benzer şekilde en düşük hidrolik geçirgenlik ve şişme basıncı değeri %20 silika dumanı-%2 lastik fiber içerikli karışımında gerçekleşmiştir. Sonuç olarak araştırmacı kil zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesinde silika dumanı ve lastik katkılarının etkin şekilde kullanılabileceğini ve inşa maliyetlerini önemli ölçüde düşürebileceğini belirtmiştir (Kalkan, 2013).

Yadav ve Tiwari'nin 2017 yılında yaptıkları çalışma kapsamında atık lastik katkısının çimento ile iyileştirilmiş kil zemin üzerinde etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda 2-3 mm kalınlığında ve en fazla 15 mm uzunluğundaki atık lastik fiberleri kullanılmıştır. Karışımlar %3 ve %6 çimento içerikli ve %2.5, %5, %7.5 ve %10 atık lastik içerikli olarak hazırlanmıştır. Çalışmada kompaksiyon testi, UCS, STS, CBR, şişme basıncı testi, donma çözünme dayanım testi ve SEM analizleri yapılmıştır. Zemine yalnızca atık lastik ilave edildiğinde, karışımın maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevası değerleri azalmıştır. Buna ek olarak en düşük maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası değerlerine %6 çimento-%10 lastik ilaveli karışımlarda rastlanmıştır. Zemine yalnızca çimento ilave edildiğinde çimento oranıyla orantılı olarak karışımın; UCS, STS, CBR ve donma-çözünme dayanımında artış gözlemlenmiştir. Çimento-atık lastik içerikli karışımlarda, atık lastik oranı arttıkça UCS ve STS dayanımları düşmüş, CBR dayanımında ise ıslatılmış ve ıslatılmamış durumlarda farklı sonuçlar gerçekleşmiştir. Islatılmamış numunelerde %2.5 lastik ilaveli karışımlar daha iyi bir CBR sonucu verirken, artan oranlarda atık lastik ilavesiyle CBR değeri giderek azalmıştır. Islatılmış numunelerde ise artan lastik içeriğiyle beraber CBR değeri azalan bir görüntü vermiştir. Zemin-lastik karışımlarında %2.5 lastik ilavesi karışımın UCS ve STS değerlerini arttırmış, ayrıca katkısız zeminde görülen pik sonrası hızlı kayıp ve yumuşama eğilimini değiştirerek gerilme sertleşme davranışına çevirmiştir. Çimento içerikli karışımlara eklenen lastik katkısı UCS ve STS değerlerini düşürse bile, çimentolu karışımların kırılma özelliğini değiştirerek daha sünek bir malzeme haline getirmiş, pik sonrası hızlı dayanım kaybını azaltmıştır. Şişme basıncı deneyinde ise çimento-lastik içerikli karışımlar iyi performans sergilemiş, çimento ve lastik içeriği arttıkça şişme basıncı azalmıştır. Donma çözünme deneyinde ise lastik ilavesi malzemedeki ağırlık kaybını arttırmış ve olumsuz etki göstermiştir. Ancak bu olumsuz etkiye rağmen 180 gün

kür uygulanmış %6 çimento-%7.5 lastik içeren karışım dayanıklılık standartlarını karşılamıştır. Araştırmacılar çimento ile stabilize edilmiş zeminlere %5 ve %7.5 oranında lastik ilave edilmesinin faydalı olabileceğini açıklamış ve bu malzemenin düşük trafikli yollarda alt temel, istinat duvarlarında hafif ağırlıklı dolgu malzemesi olarak kullanılabilceğini bildirmişlerdir (Yadav ve Tiwari, 2017a).

Al-Subari ve arkadaşlarının 2021 yılında yaptıkları çalışmada düşük plastisiteli kil bir zemin üzerinde, çimento ve atık lastik tozu kullanılarak zemin iyileştirmesi yapılmış ve etkileri incelenmiştir. Numuneler hazırlanırken %7, %10 ve %13 çimento, %2.5, %5, %10 ve %20 atık lastik tozu içeren karışımlar farklı iki kuru birim hacim ağırlık değerinde hazırlanmış, 7, 28 ve 60 gün kürde bekletilmiştir. Karışımlar üzerinde UCS, Kayma modülü testi (ultrasonik test cihazı kullanılarak) ve mikroyapı analizleri (SEM, XRF, XRD) yapılmıştır. Zemine artan oranlarda çimento eklendiğinde karışımın UCS, kayma modülü ve elastisite modülü değerleri artmıştır. Daha yüksek kuru birim hacim ağırlık değerinde hazırlanan numunelerde de UCS, kayma ve elastisite modülü değerleri en yüksek değerlere ulaşmıştır. Araştırmacılar düşük yoğunluklu karışıma %10 oranına kadar atık lastik tozu ilavesinin UCS ve kayma-elastisite modülleri çok büyük bir etkisi olmadığı bildirmişler, ancak %20 oranında eklenen lastik tozunun karışımın mekanik özelliklerini ciddi şekilde düşürdüğünü gözlemlemişlerdir. Buna ek olarak yüksek yoğunlukta hazırlanan numunelerde artan lastik içeriğiyle, UCS ve kayma-elastisite modülleri giderek azalmış, sadece kayma modülündeki bir istisna değerinde artış yaşanmıştır. %2.5 lastik içerikli karışımın kayma modülünde artış gerçekleşmiştir. Artan kür süresinin karışımlar üzerindeki etkileri değişiklik göstermiştir, 7-28 günlük periyotta tüm karışımların UCS değerleri giderek artmış, ancak 60 günlük kür süresinde çimento-atık lastik tozu içeren karışımların UCS değerleri artan lastik oranına bağlı olarak azalmıştır. En düşük UCS değerlerine en düşük kür, yoğunluk ve çimento içeriğine sahip olan buna karşın en fazla atık lastik tozu içeren karışımlarda rastlanmıştır. Araştırmacılar bu düşük UCS değerli karışımların farklı uygulamalarda (sıkıştırılmış toprak ve yollarda alt temel, temel) kullanılabilceğini bildirmişlerdir. Ayrıca bu kompozit malzemenin daha sünek özellikte olmasının, çimento ile stabilize edilen yollarda gözlemlenen kırıkları azaltabileceğini ve maliyetleri düşürebileceğini açıklamışlardır. Çalışmada kullanılan model ile tasarım aşamasında spesifik kil-lastik tozu karışımları için zemine zarar vermeden UCS değeri ve kayma-elastisite modüllerinin bulunabileceği bildirilmiştir. Çalışmadaki bir diğer soru işareti olan uzun süreli kür sonrası düşen dayanımı

araştırmacılar, zayıflayan kil-çimento- lastik yüzeylerine ve stabil olmayan magnezyum alümina sülfat hidrat oluşumuna bağlamışlardır. Sonuç olarak lastik kullanımının maliyetleri düşürebileceği ve çevreye olan olumsuz etkileri azaltabileceği, ayrıca ileri teknoloji gerektirmeden zeminin özelliklerini iyileştirebileceği kanıtlanmıştır (Al-Subari vd., 2021).

Yadav ve Tiwari'nin 2017 yılında yaptıkları bu çalışma kapsamında düşük plastisiteli kil bir zemin üzerinde çimento ve atık lastik kırıntısı kullanarak zemin iyileştirmesi gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada kullanılan lastik parçalarının büyüklükleri 0.8-2 mm arasında değişmektedir. Karışımlar %3 ve %6 çimento, %2.5, %5, %7.5 ve %10 lastik kırıntısı içerikli olarak hazırlanmıştır. Zemine lastik ve çimento eklendiğinde maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası değerleri azalmıştır. Yalnızca atık lastik ilave edilen durumda %2.5 ve %5 lastik içerikli karışımların UCS ve STS değerleri artmış, artan oranlarda lastikle azalmıştır. Ancak çimento içerikli karışımlara lastik eklenmesiyle UCS, CBR ve STS dayanımı, yalnızca çimento içeren karışımlara göre daha düşük değere sahip olmuştur. Islatılmış ve ıslatılmamış numuneler üzerinde yapılan UCS, CBR ve STS deneylerinde ıslak durumda çimento-lastik içerikli karışımların dayanımının daha düşük çıktığı görülmüştür. Yine bu karışımlarda artan lastik içeriğiyle doğru orantılı olarak dayanım azalmıştır. Araştırmacılar ayrıca artan lastik ve çimento oranıyla, karışımın şişme basıncında düşüş gözlemlendiğini bildirmişlerdir. Sonuç olarak zemine %5 oranına kadar lastik ilave edilmesinin, zeminin geoteknik özelliklerinde iyileşme sağlayacağını ve bu atık malzemenin yeniden kullanıma kazandırılabileceğini belirtmişlerdir (Yadav ve Tiwari, 2017b).

Literatür incelendiğinde daha önce yapılan benzer çalışmalarda, araştırmacıların zemine atık lastik eklenmesi üzerine yoğunlaştığı görülmektedir. Ayrıca çeşitli katkı maddeleriyle birlikte atık lastiğin kullanılmasına yönelik sınırlı sayıda çalışmanın bulunduğu söylenebilir. Bu çalışmayı önceki çalışmalardan farklı kılan temel özellik ise kireç ve uçucu kül kullanılarak yapılan iyileştirmeye, atık lastik ilavesinin etkileri üzerine odaklanmasıdır. Buna ek olarak çalışma kapsamında zemine eklenen karışımların optimum oranları bulunmuş, katkı malzemesi oranlarının alt ve üst sınırları belirlenmiştir. Zeminin mühendislik özelliklerinde yaşanan iyileşmeler gözlemlenirken, temel olarak serbest basınç deney sonuçları dikkate alınmıştır. Artan oranlarda katkı malzemesi kullanımına bağlı olarak dayanımındaki değişimler incelenmiştir. Ayrıca hazırlanan

karışımların mikroyapısal özellikleri belirlenmiş, elde edilen çıktılar ile diğer testlerin sonuçları kıyaslanmış, sonuçlar arasındaki korelasyonlar ortaya konulmuştur. Çalışma kapsamında yapılan literatür incelemesinde kireç, uçucu kül ve atık lastik katkılarının birlikte kullanılmasına yönelik bir çalışma ile karşılaşılmamıştır.

2.2. Problemlerli Zeminler

Bu bölümde mühendislik projelerinde çeşitli problemlere neden olan, oluşturdukları bu sorunlar nedeniyle inşaat projelerinde zorunlu olmadıkça tercih edilmeyen, problemlerli zeminler incelenmiştir. Problemlerli materyaller doğal halde bulunan zeminler olabildiği gibi, bu zeminlerin çeşitli şekillerde işlenmesi sonucu ortaya çıkan malzemelerde olabilmektedir. Örnek olarak kırma taş agregalar, kayaların parçalanması sonucu oluşan malzemelerdir. Bu tür işlenmiş malzemeler genellikle dolgu olarak geoteknik projelerinde kullanılmaktadır. Söz konusu işlenmiş malzemeler, zeminin mühendislik özelliklerini iyileştirmek için kullanılsa da bazı durumlarda problemin ana kaynağı da olabilmektedirler. Çizelge 2.1.'de söz konusu problemlerli zeminler ve işlenmiş malzemeler gösterilmekte, oluşturabildikleri potansiyel sorunlar ortaya konulmaktadır.

Çizelge 2.1. Problemlerli geoteknik malzemeler ve potansiyel sorunları (Han, 2015).

Geoteknik Malzeme Tipi	İsmi	Potansiyel Problem
Doğal	Yumuşak kil	Düşük mukavemet, yüksek sıkıştırılabilirlik, yüksek oranda deformasyonu, düşük geçirgenlik
	Silt	Düşük mukavemet, yüksek sıkıştırılabilirlik, yüksek sıvılaşma potansiyeli, düşük geçirgenlik, yüksek aşınabilirlik
	Organik zemin	Yüksek sıkıştırılabilirlik ve deformasyon
	Gevşek kum	Düşük mukavemet, yüksek sıkıştırılabilirlik, yüksek sıvılaşma potansiyeli, düşük geçirgenlik, yüksek aşınabilirlik
	Şişen zemin	Büyük hacimsel değişim
	Lösler	Büyük hacimsel değişim ve yüksek göçme potansiyeli
Dolgu	Kontrolsüz dolgular	Düşük mukavemet, yüksek sıkıştırılabilirlik, düzensizlikler, yüksek çökme potansiyeli
	Taranmış materyal	Yüksek su içeriği, düşük mukavemet, yüksek sıkıştırılabilirlik
	Geri kazanılmış dolgu	Yüksek su içeriği, düşük mukavemet, yüksek sıkıştırılabilirlik
	Geri dönüştürülmüş malzeme	Düzensiz yapı, yüksek değişkenlik gösteren özellikler
	Katı atık	Düşük mukavemet, yüksek sıkıştırılabilirlik, homojen olmama ve yüksek bozunma potansiyeli
	Biyolojik bazı yan ürün	Düşük mukavemet, yüksek sıkıştırılabilirlik ve yüksek bozunma potansiyeli

Normal koşullarda bir sorun oluşturmadığı halde, suyun zemindeki değişken varlığı karşısında ciddi sıkıntılar oluşturan zeminlere, problemliler zeminler denir (Önalp, 2012). Kuru ve gevşek zeminlerde farklı sebeplerden dolayı su muhtevastındaki artış veya zeminin bütünüyle doygun hale gelmesi, zemine uygulanan yükte ciddi artışlar olmasa bile ciddi oturmalar veya göçmeye neden olabilir. Böyle bir durumun yaşanması sonucunda yapılar üzerinde önemli hasarlar oluşabilir. Bu nedenle problemliler zeminlerde inşa edilecek yapıların temel inşaatlarında özel tasarım ve uygulama metotlarına ihtiyaç olmaktadır.

Problemliler zeminler üç ana başlık altında toplanabilir,

- i. şişen zeminler
- ii. Göçen zeminler
- iii. Kontrolsüz dolgular

2.2.1. şişen Zeminler

şişen zeminler kurak ve yarı kurak iklimlerin bulunduğu bölgelerde oluşmuş, su içeriğinin artmasına bağlı olarak hacminde artış gösteren, su içeriğindeki azalmayla beraberde büzölme olayının meydana geldiği zeminler olarak tanımlanabilir. Zeminlerin su içeriğinin değişmesindeki en önemli etmen mevsim değişikleri olarak öne çıkmaktadır. Yağışın yoğun olduğu mevsimlerde yüzeyde biriken yağış suları zamanla zemine sızarak, zeminin su içeriğini arttırır. Sıcaklığın yüksek olduğu mevsimlerde ise yüzey sularının buharlaşması nedeniyle su içeriği azalmaktadır. Zeminin su içeriğindeki bu değişimler sonucunda şişe ve büzölme çevrimi oluşmaktadır.

şişen zeminlere dünyanın her yerinde rastlamak mümkündür. Bu tür zeminler yıllık yağışın buharlaşma miktarına göre daha az olduğu, tropik ve ılıman iklime sahip, yarı kurak veya kurak bölgelerde yoğun şekilde görölmektedir. Bu bölgeler sıklıkla ABD, Arjantin, Avustralya, Hindistan, Kanada, İsrail ve Suudi Arabistan'da görölmektedir. şişen zeminlerin tanımlanması ilk olarak ABD Su İşleri Teşkilatı tarafından 1938 yılında yapılmıştır. Yine ABD'de bu tür zeminlerden dolayı yıllık yaklaşık 2-3 milyar dolar zarar meydana geldiği, bu değerin fırtına, sel ve deprem gibi doğal afetlerin oluşturduğu zararın yaklaşık 2 katından daha fazla bir değere tekaböl ettiği belirlenmiştir. Ülkemizde de şişen zeminlere ve şişen zeminler sonucu oluşan problemlere rastlamak mümkündür. Özellikle Güneydoğu Anadolu Projesi kapsamındaki su yapılarının inşasında bu problemle sıkça

karşılaşılmış ve gerekli mühendislik önlemlerinin alınmasıyla beraber, bu konuda bir bilgi birikimi kazanılmıştır (Ghabaee, 2015).

Bir zeminde şişme olayının gerçekleşebilmesi için üç şartın bir arada bulunması gerekmektedir. Bu şartlardan ilki su içeriğinin artmasıyla beraber hacim artışı meydana getirecek taneleri bünyesinde bulunduran bir zemindir. İkinci olarak zeminin içine suyun sızmasına imkân sağlayacak şartların ve gerilmelerin ortamda bulunmasıdır. Bu iki şartın bir arada bulunduğu zemin şişme potansiyeline sahip bir zemindir. Son olarak şişme potansiyeli bulunan zeminin şişebilmesi için ortamda suyun bulunması gerekmektedir (Keskin vd., 2006).

Şişen zeminler genel olarak killi veya kil oranı yüksek olan zeminlerdir. Kil zemin, kil boyutu ve kil minerali terimleri farklı anlamlarda kullanılmaktadır. Kil zemin denildiğinde davranış biçimi esas alınarak, kil gibi kohezyona sahip olan ve plastik davranış gösteren zeminler kastedilmektedir. Bu durumda zeminde kil olmasa da kil özellikleri gösterebilir. Genelde 0,002 mm'den daha küçük boyutlu taneler kil olarak kabul edilmektedir. Ancak 0,002 mm'den daha büyük kil mineralleri de zeminlerde bulunduğu için bazı sınıflamalarda 0,005 mm'den daha küçük boyut, kil boyutu olarak kabul edilmektedir (Das, 2007).

Kil mineralleri; kompleks yapıda alüminyum, magnezyum ve demir silikatlar olup, kayaların bozuşmaları sonucu meydana gelirler. Kil minerallerinin oluşmasında iklim önemli bir rol oynamaktadır. Bitki örtüsünün de bu süreçte önemli etkileri bulunmaktadır. Suyun zemin içindeki hareketleri, ortamın pH'ı ve özellikle de yağmur suyunun, kil oluşumunda katkısı vardır. Bu farklı faktörlere göre bazı kil minerallerinin oluşumu Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Bazı kil minerallerinin iklim ve ana kaya koşullarına göre oluşumu (Genç, 2009)

Kil Minerali	Oluşumu
Kaolinit	Volkanik kayaların bozuşması sonucu genellikle tropik ve astropik alanlarda oluşur.
Klorit	Metamorfik ana kaya alanlarında, genellikle deniz tortularında ve çökelti kayalarda oluşur. Normal olarak yüksek oranlarda bulunmaz.
İllit	Sıcak ve kurak bölgelerde çökelti kayaların aşınması ile oluşur.
Montmorillonit	Zayıf drenaj şartlarında volkanik kül ve kayaların bozuşması sonucu, genellikle kurak alanlarda illit ile beraber bulunur.

Kil mineralleri; yüzeylerinde negatif elektrik yükleri bulunan, ortasında ise pozitif yüklerin bulunduğu taneciklerdir. Negatif yükler, elektriksel kuvvetler ve plakaların

yüzeyine bağlı olan zemin suyundaki katyonlar ile dengede bulunmaktadır. Sıvı miktarının veya kimyasal bileşimin değişmesi ile, zemin su kimyası değişmekte ve bu durum iç kuvvetleri etkilemektedir. İç elektro-kimyasal kuvvetler sistemi, zemin suyundaki kapiler gerilme (matris emme) ve dışarıdan uygulanan gerilmeler arasındaki denge bozulduğunda; denge yeniden sağlanıncaya kadar, zeminde hacim değişikliği (şişme – büzülme) meydana gelmektedir (Nelson ve Miller, 1992).

Şişen zeminlerin nasıl davrandığı ve şişme olayı esnasında hangi iç dinamiklerin gerçekleştiğinin belirlenmesi amacıyla önemli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda zeminin şişme davranışında etkili olan birçok faktörün olduğu belirlenmiştir.

Bu faktörler şu şekilde sıralanabilir; zeminin minerolojisi, zemindeki kil içeriği, katyon değiştirme kapasitesi (KDK), zeminin aktivitesi, zeminin su muhtevası, zeminin kuru birim hacim ağırlığı, kıvam limitleri, laboratuvar deneylerinde kullanılan zemin numunesinin örselenmemiş veya örselenmiş olması (Chen, 1975).

Katyon değişim kapasitesi killi zeminlerde danelerin yüzeyindeki negatif iyonların dengelenmesi için gerekli olan pozitif iyon miktarıdır. Katyon değişim kapasitesi kilin türüne ve minerolojisine bağlı olarak değişir. Killi zeminlerde genelde katyon değişim kapasitesi arttıkça kilin şişme potansiyeli de doğru orantılı olarak artar. En sık rastlanan üç kil mineralindeki KDK değerleri Çizelge 2.3.'de görülmektedir (Nelson ve Miller, 1992).

Çizelge 2.3. Sık rastlanan üç kil mineralindeki KDK değerleri (Nelson ve Miller, 1992).

Kil Minerali	KDK (meq/100g)
Kaolin	3-15
İllit	10-40
Montmorillonit	80-150

Killerde aktivite, plastisite indisinin kil yüzdesine oranı şeklinde ifade edilen bir değerdir. Aktivite kil zeminlerin şişme potansiyeliyle yakından ilişkilidir. Skempton (1953) killeri aktivitelerine göre üç gruba ayırmıştır:

- $A < 0.75$ ise aktif olmayan ya da düşük aktiviteli kil
- $0,75 < A < 1,25$ ise normal aktiviteli kil
- $A > 1,25$ ise yüksek aktiviteli kil

Yine Nelson ve Miller (1992), üç ana kil mineralinin aktivite değerlerini Çizelge 2.4'deki gibi vermişlerdir.

Çizelge 2.4. Üç ana kil mineralinin aktivite değerleri (Nelson ve Miller, 1992).

Kil Minerali	A
Kaolin	0,33-0,46
İllit	0,9
Montmorillonit (Ca)	1,5
Montmorillonit (Na)	7,2

Şişen zeminler farklı araştırmacılar tarafından değişik yöntemlerle sınıflandırılmıştır. Bu yöntemlerden biri olan kıvam limitleri ile sınıflandırma yöntemi oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemi Holtz ve Gibbs (1956)'da önermişlerdir. Önerilen bu yöntem Çizelge 2.5.'de görülmektedir.

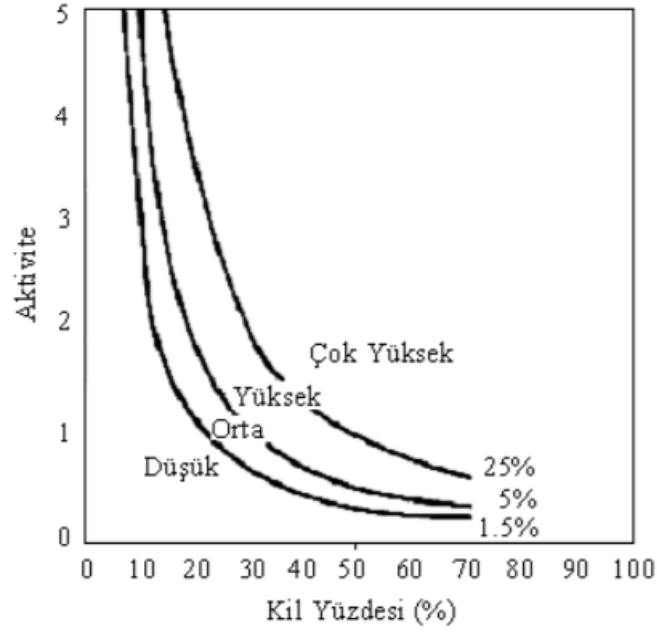
Çizelge 2.5. Şişen zeminlerin, kolloid miktarı, plastisite indisi, rötre limitine bağlı olarak sınıflandırılması (Holtz ve Gibbs, 1956)

Kolloid miktarı (<0.0001mm)	Plastisite indisi (%)	Rötre limiti (%)	Muhtemel şişme (%)	Şişme derecesi
>28	>35	<11	>30	Çok yüksek
20-31	25-41	7-12	20-30	Yüksek
13-23	15-28	10-16	10-20	Orta
<15	<18	>15	<10	Düşük

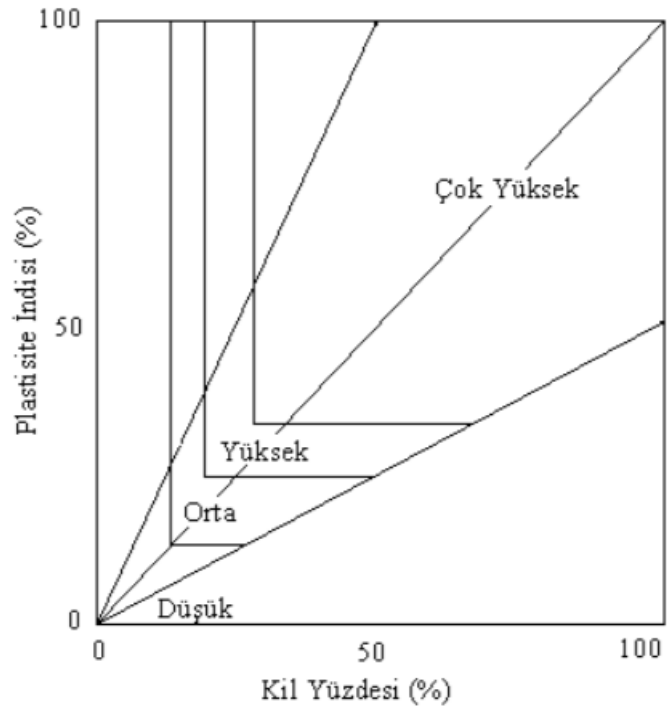
Seed vd. (1962) killeri üzerinde yaptıkları çalışmada, killerin şişme potansiyelini aktivite ve kil yüzdesine dayanan bir grafik ile ortaya koymuşlardır. Bu grafik Şekil 2.1'de görülmektedir. Van der Merwe (1964)'de kil yüzdesi ve aktiviteye bağlı olarak zeminlerin şişme potansiyelleri konusunda çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmaların neticesinde Şekil 2.2'da görülen kartı geliştirmiştir. Dakshanamurthy ve Raman (1973) ise zeminin şişme potansiyelinin tespit edilmesinde zeminin kıvam limitlerinden faydalanmışlardır. Chen (1988) yaptığı çalışmada yalnızca plastisite indisini kullanarak zeminlerin şişme potansiyelinin tahmin edilebilmesi için bir metot önermiştir. Bu metot da Çizelge 2.6.'da görülmektedir.

Çizelge 2.6. Plastisite indisine bağlı olarak zeminin şişme potansiyelinin tahmini

PI	Şişme Potansiyeli
$PI \geq 35$	Çok yüksek
$20 \leq PI \leq 55$	Yüksek
$10 \leq PI \leq 35$	Orta
$PI \leq 15$	Düşük



Şekil 2.1. Aktiviteye ve kil yüzdesine bağlı olarak zeminin şişme potansiyeli (Seed vd., 1962)



Şekil 2.2. Plastisite indisi ve kil yüzdesine bağlı olarak zeminin şişme potansiyeli (Van der Merwe, 1964)

Zeminlerin şişme problemi geoteknik mühendisliği uygulamalarında ciddi sorunlara sebebiyet verebilmektedir. Bu tür zeminlerde çevre koşullarındaki değişimler neticesinde, su muhtevasında değişimler meydana geldiğinde hacimde ciddi artış veya azalmalar gösterebilir. Hacimdeki bu artış ve azalışlar yapılarda ciddi hasarlar meydana

getirebilir. Bu hasarlar yapının inşa edildiği zeminin üniform olmayan davranış göstermesine bağlı olarak meydana gelir. Yani yapı temeli boyunca zeminde farklı şişme veya büzülme olaylarının görülmesi yapının bazı noktalarında farklı gerilme artışlarına neden olabilmektedir. Şişme ve büzülmeye bağlı gerilme artışları, en çok aşağıda verilen yapılarda, hasar meydana getirmektedir.

- Az katlı yapılarda
- Karayollarında ve havaalanı kaplamalarında
- Su, doğalgaz ve kanalizasyon hatlarında
- Sulama kanallarında
- İstinat yapılarında (Keskin vd., 2006)



Şekil 2.3. Şişen zeminin karayolunda oluşturduğu çatlaklar

Zeminde şişme potansiyeli yüksek seviyelerde ise, bu probleme karşı önlem alınması gerekmektedir. Bu önlemlere örnek olarak şişme potansiyeli olan zeminin tümüyle kaldırılması, kimyasal yapısının değiştirilmesi ile şişme potansiyelinin azaltılması, yapının kullanım sürecinde temel altındaki zeminin su içeriğinin kontrol altında tutulması vb. uygulanabilir. Bu önlemlerin dışında zeminin sıkılığını kompaksiyon ile arttırmakta

alternatiflerden biridir. Yine zeminin su muhtevasını ön ıslatma yöntemiyle arttırarak, zeminin inşa öncesinde şişmesi sağlanabilir. Günümüzde en çok tercih edilen yöntemlerden birisi de zeminin çeşitli kimyasal katkı maddeleri ile iyileştirilmesidir. Örneğin kireç veya çimento zeminle karıştırıldığında zeminin şişme potansiyelinin azaltılması ve dayanımının arttırılması sağlanabilir. Yine zeminin birçok özelliğinde olumlu yönde iyileşmeler sağlanabilir.

Zeminlerde şişme problemine karşı alınabilecek bazı yöntemler aşağıda belirtilmiştir:

- Katkı maddeleri ile iyileştirme yöntemi
- Ön ıslatma yöntemi
- Su içeriğinin kontrol edilmesi
- Ön yükleme yöntemi
- Kompaksiyon yöntemi

2.1.1.1. Zeminlerin şişme özellikleri

Doğal halde bulunan bir zemin numunesinin suya doyurulması ve belirli bir yük altında tutulması sürecinde oluşan şişme miktarının, zemin numunesinin başlangıç koşullarındaki hacmine oranına şişme potansiyeli denir. Buradan da anlaşılacağı gibi zemin şişme potansiyeli, zemin numunesinde meydana gelen hacimsel artışın bir ifadesidir. Literatürde zemin şişme yüzdesi yerine, şişme potansiyeli ifadesi de kullanılmaktadır. Şişme yüzdesi formül 2.1 ile hesaplanabilmektedir.

$$S_w = \frac{\Delta H}{H_0} \times 100 \quad (2.1)$$

Burada ifadeler:

S_w : Şişme yüzdesi (potansiyeli)

H_0 : Numenin başlangıçtaki yüksekliği

Şişme yüzdesi (potansiyeli) iki şekilde tanımlanabilmektedir,

- i. Numuneye sabit ve küçük bir sürşarj yükü yüklenir, numunenin suya doymun hale gelmesi sağlanır, bir kalıp içerisinde numunenin yanal deformasyonları engellenir, böylece sadece düşey boy değişimi gözlemlenerek tespit edilir.

- ii. Numunenin dikey eksenini boyunca deformasyonları engellenir, zeminin yanall deformasyonları ölçülür, sonrasında ölçülen değerler başlangıç çapına oranlanır buradan şişme potansiyeli tespit edilir.

Şişme potansiyeli aşağıda verilen faktörlere göre değişebilmektedir;

- Kilin mineralojisi ve zemindeki kil miktarı
- Zeminin maruz kaldığı gerilmeler
- Zeminin kuru birim hacim ağırlığı
- Zeminin su muhtevası (içeriğı)
- Emme basıncı
- İklim ve çevre koşulları
- Zeminin permeabilitesi (geçirgenliğı)
- Şişme potansiyeli bulunan zeminin boyutları

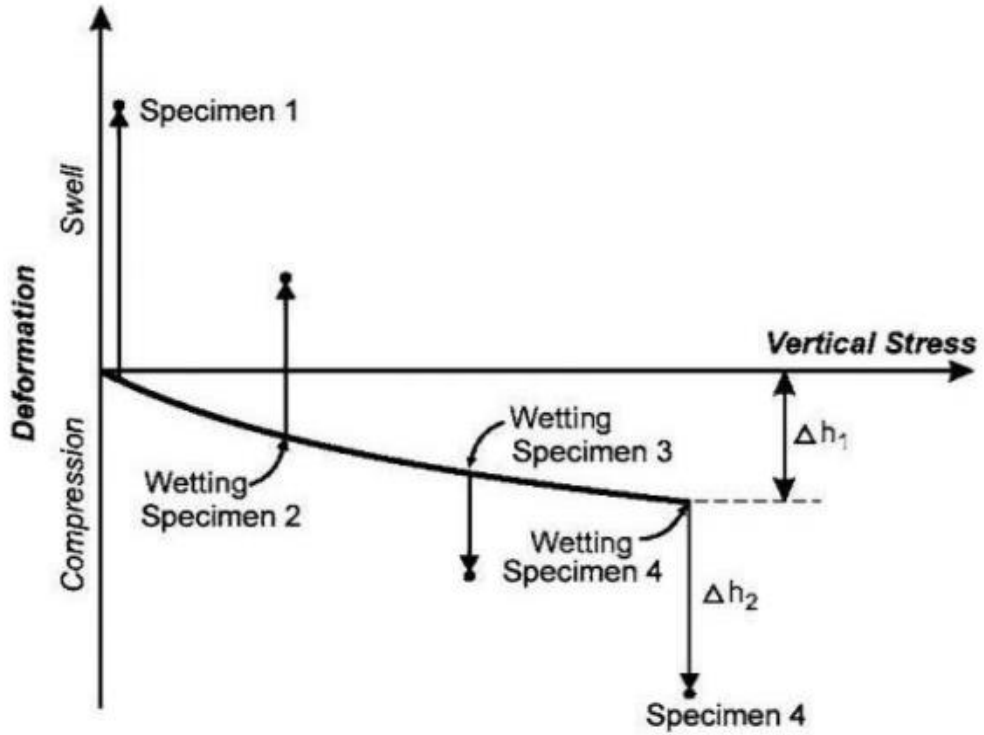
Yukarıdaki faktörleri iki ayrı başlık altında değerlendirebiliriz. Bunlardan ilki zemin numunesinin özgün şişme potansiyelini belirleyen, zemin mineralojisi ve kil miktarı olarak tanımlanabilir. İkincisi ise arazi şartlarındaki su emme olmaktadır.

2.1.1.2. Şişme basıncı

Şişme potansiyelin bulunduğu bir zeminde, zeminin su içeriğinin artmasıyla meydana gelecek hacim değişikliklerine engel olabilecek basınç şişme basıncı olarak tanımlanır. Şişme basıncına zeminin başlangıçtaki hacminde değişiklik olmasını engelleyecek basınç değeri de denebilir. Bu değeri her zemin için farklı ve sabit bir değerdir ve zeminin kuru birim hacim ağırlığına bağlı olarak değişir. Ayrıca dolgularda, zeminin kompaksiyon derecesi ile de bu değeri değişebilmektedir (Köylü, 2003). Şişme basıncı ASTM D4546'de zemin numunesinin suya doygun hale getirildikten sonra, numuneye uygulanan basıncın şişmenin oluşmadığı duruma kadar artırılması ile tespit edilir. Şişmenin oluşmadığı andaki basınç değeri şişme basıncı olarak tarif edilmiştir. Farklı bir ifade ile numunenin şişmesine müsaade edildikten sonra başlangıçtaki yüksekliğine ve boşluk oranına dönebilmesi için gerekli olan basınçtır. Şişme basıncının tespit edilmesi için birden çok deney kullanılmaktadır. Bu deney yöntemlerinden en yaygın olarak kullanılanı konsolidasyon deneyidir. ASTM D4546 standardında zeminlerin şişme karakteristiklerini

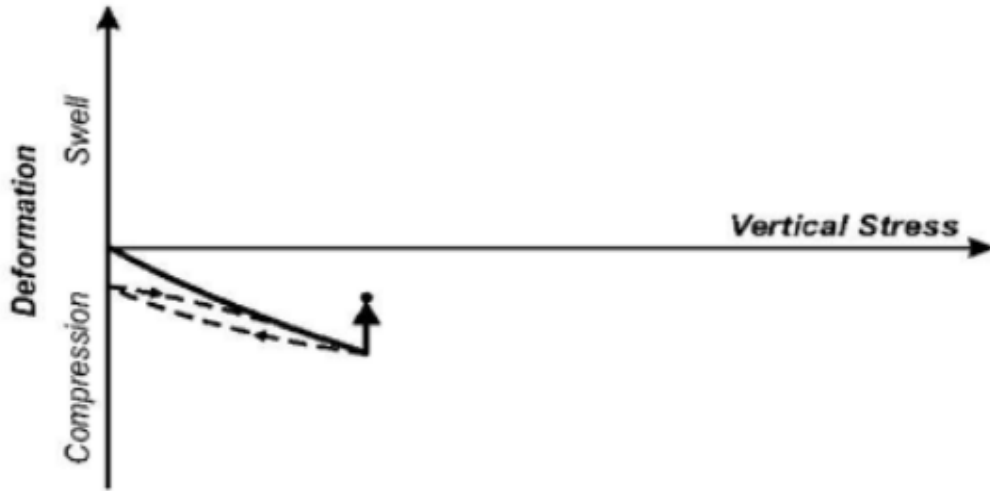
belirlemek için 3 farklı deney yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemler aşağıda açıklanmıştır.

- Serbest şişme deneyi (A yöntemi): Bu deney yönteminde zemin numunesinin üzerine 1kPa yük uygulanır, bu yük altında zemin numunesi suya doymun hale getirilir, sonrasında belli zaman aralıklarında şişme miktarı ölçülür. Şişmenin tamamen bitmesi beklenir. Bu adımdan sonra zemin numunesine, doğal boşluk oranına erişilinceye kadar kademeli olarak yük yüklenir. Şekil 2.4.'de bu işlem grafik üzerinde gösterilmiştir.



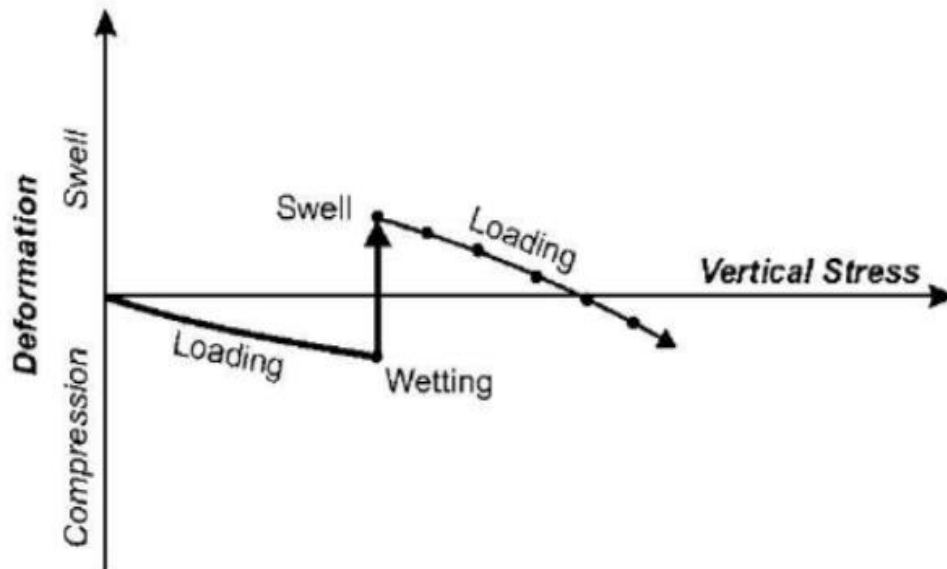
Şekil 2.4. Serbest şişme deneyi A yöntemi (ASTM-D4546).

- Yük altında şişme deneyi (B yöntemi): Bu deney yönteminde zemin numunesi temel yüküne eş değer bir gerilme altında doğal su muhtevasında bekletilir. Sonrasında zemin numunesi suya doymun hale getirilir üzerindeki temel yüküyle beraber şişmenin sona ermesi beklenir. Daha sonra klasik ödometre deneyindeki yükleme – boşaltma işlemleri gerçekleştirilerek şişme basıncı tespit edilir. Bu yöntem Şekil 2.5.'de yük – deformasyon eğrisi üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Yük altında şişme deneyi- B yöntemi (ASTM-D4546).

- C yöntemi: Bu deney yönteminde öncelikle numune su içerisindeyken şişmenin engellenmesi için gerekli olan basınç ayarlanır. Daha sonra ASTM-D2435'e göre konsolidasyon deneyi yapılır. Bu deneyde boşaltma verileri değerlendirilerek şişme potansiyeli tespit edilir. Numunelerin hazırlanması sürecinde optimum su muhtevasında sıkıştırma işlemi uygulanır. Sonra numunenin su içeriği artırılır, şişmenin dengelenmesi için numuneye gerilmeler uygulanır. Numunenin hacminde değişikliğin olmadığı basınç ölçülür. Bu deney yöntemi Şekil 2.6.'de grafik üzerinde görülmektedir.

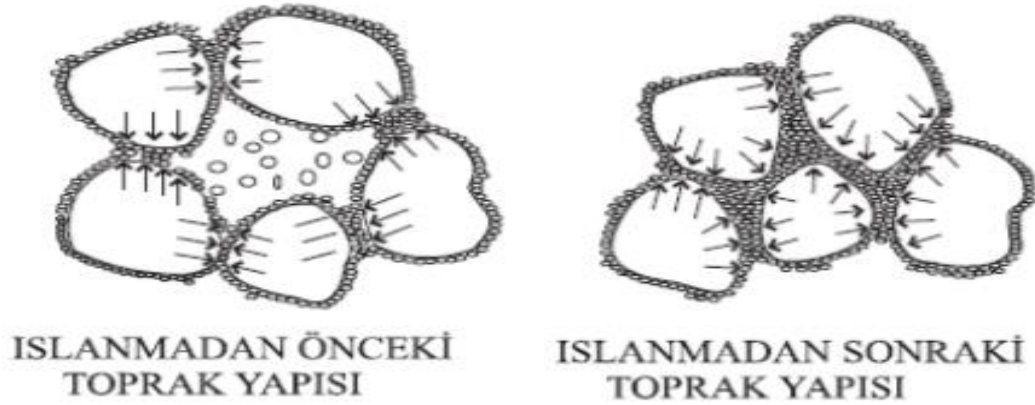


Şekil 2.6. C yöntemi ile şişme basıncının tespit edilmesi (ASTM-D4546)

2.2.2. Göçebilen (Çökebilin) Zeminler

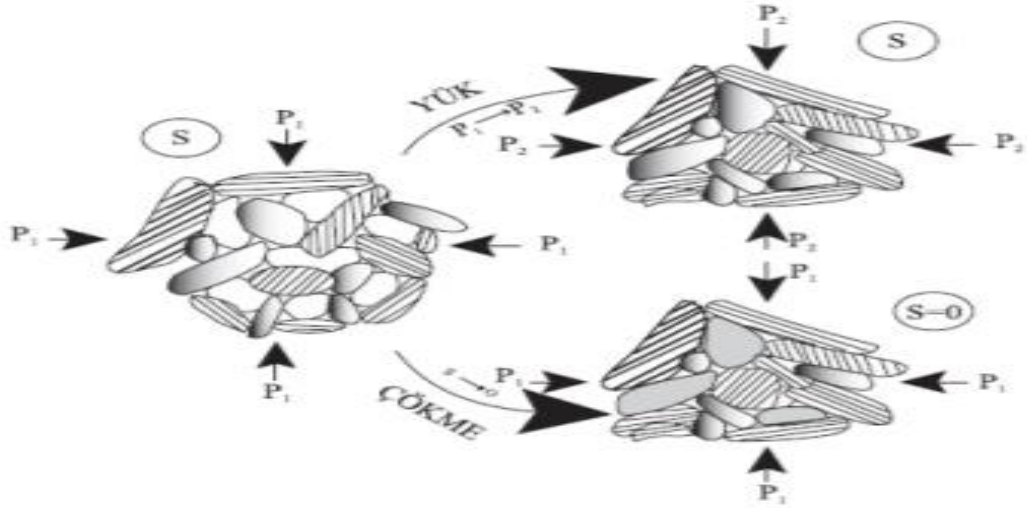
Çöken zeminler düşük su içeriğinde zayıf ve yüksek boşluklu bir yapıda oldukları için suya doymun hale geldiklerinde veya yük uygulandığında büyük miktarda hacim değışikliği gösteren zeminler olarak tanımlanırlar. Başka bir ifade ile açıklanacak olursa, suya doymun olmayan zeminde su içeriğinin artmasıyla beraber oturmalar meydana geliyor, bu tür bir zemin göçebilen (çökebilin) zemin olarak adlandırılır. Dünya üzerinde bu sınıftaki zeminler oldukça yaygın şekilde görülmektedir. Bu tür zeminler genellikle, rüzgârın depoladığı ince kum-silt boyutlu lös zeminler ve volkanik toz birikintilerinden meydana gelirler. Göçebilen zeminler düşük yoğunluğa ve yüksek boşluk oranına sahip zeminlerdir.

Göçebilen zeminler düşük su içeriğindeyken yüksek dayanım gösterebilirler. Bu dayanımı göstermesinde kil kaplaması veya kimyasal maddelerden oluşan bir bağ etkili olmaktadır. Ancak zemin suya doymun hale geldiğinde, zemin daneleri arasındaki bu bağ yok olur ve zeminin dayanımı ciddi oranda düşer. Sonuç olarak zemin hacminde azalmalar meydana gelir ve zeminde oturmalar gözlemlenir. Bu durum Şekil 2.7.'de açıklanmıştır.



Şekil 2.7. Göçebilen zeminlerde su teması ile oluşan hacim değışimi (Rogers, 1995)

Göçebilen zeminlerdeki oturmalar sadece su muhtevastındaki artışın sonucunda meydana gelmez. Zeminin üzerindeki yük artışı da zeminin çökmesine neden olabilir. Zemindeki yüksek boşluk oranı yüzünden gerilme artışları ciddi miktarda oturmaya sebep olabilmektedir. Bu durum şekil 2.8.'de açıklanmıştır.

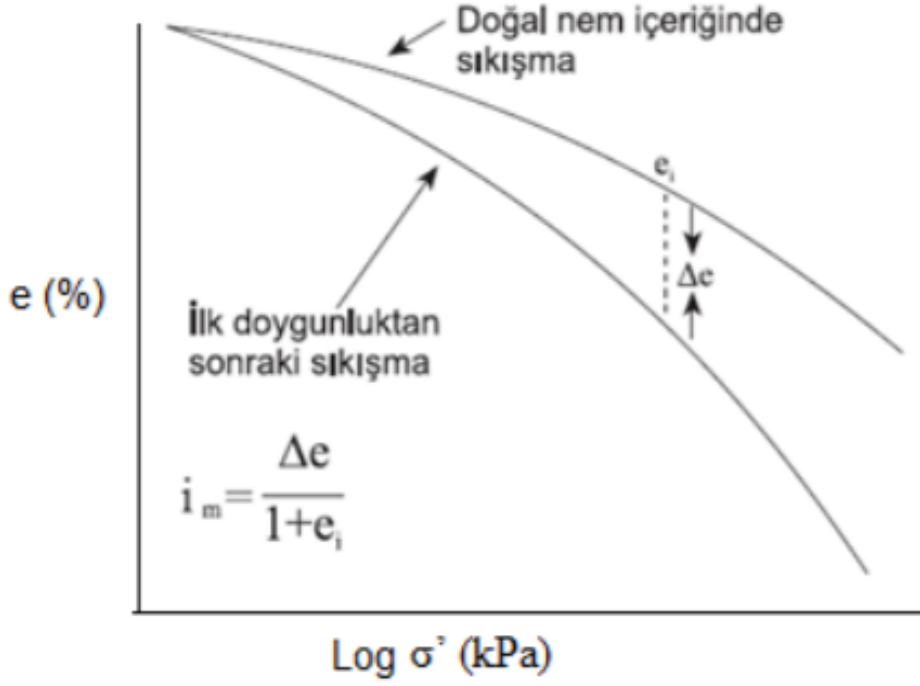


Şekil 2.8. Zemindeki yük artışı ile oluşan çökme mekanizması (Houston vd., 1998).

Göçebilen zeminlerde, zeminlerde su muhtevasının artmasıyla meydana gelen oturmalar, oturmanın yaşandığı zeminin üzerine inşa edilen yapılarda büyük hasarların meydana gelmesine neden olur. Su muhtevastındaki artışın nedenleri, yer altı su seviyesinin artması, yer altındaki su depoları ve kanalizasyon hatlarında oluşan sızıntılar olabilir. Bu tür zeminlerde çökme potansiyeli arazideki plaka yükleme deneyi ile ya da laboratuvarında odometre deneyi ile tespit edilir. Göçme potansiyelinin belirlenmesinde laboratuvarında iki tip odometre deneyinden faydalanılır.

i. Çift odometre deneyi

Bu deneyde örselenmemiş iki numune kullanılmaktadır. Bu numunelerden ilki suya doymun hale getirilir, diğer numune ise doğal su muhtevastında bırakılır. Sonrasında numunelere artan gerilmeler uygulanır. Numuneler arasındaki deformasyon farkı incelenir. Bu deneydeki amaç, tabii durumdaki zeminin doymun hale getirildiğinde sabit gerilme altında hacimsel olarak değişiminin belirlenmesidir. Deneyin grafik üzerindeki gösterimi Şekil 2.9.'da gösterilmektedir. Bu deneyin dezavantajı aynı koşullara sahip tıpatıp aynı iki numunenin oluşturulmasının pek mümkün olmamasıdır. Bu nedenle tek numune üzerinde yapılan odometre deneyi daha fazla tercih edilmektedir.



Şekil 2.9. Çift odometre deneyi sonucunda elde edilen grafik (Zorlu, 2003).

ii. Tekli odometre deneyi

Bu deneyde çökme potansiyeli belirlenirken, örselenmemiş doğal su muhtevsındaki zemin numunesi üzerinde konsolidasyon deneyi yapılır. Deneyde numune üzerindeki yük kademeli olarak arttırılır, bu işlem 200 kPa gerilme değerine ulaşıncaya kadar devam ettirilir. Sonrasında numune 24 saat boyunca suyla doyurulur. Numunenin bu yük altında boşluk oranındaki değişim gözlemlenir ve çökme potansiyeli C_p değeri formül 2.2 ile hesaplanır (ASTM-D5333).

$$C_p = \frac{e_1 - e_2}{1 + e_0} \quad (2.2)$$

Burada,

e_0 : Zeminin doğal haldeki boşluk oranı

e_1 : Numunenin 200 kPa gerilme altında boşluk oranı

e_2 : Numunenin suya doygun haldeki boşluk oranı

Bu formülden elde edilen çökme potansiyeli C_p değerine göre zeminler çizelge 2.7.'de sınıflandırılmıştır.

Çizelge 2.7. Zeminlerin çökme potansiyeline göre sınıflandırılması.

C_p (%)	Sınıflandırma
0-1	Problem oluşturmuyor
1-5	Orta derece problemlili
5-10	Problemlili
10-20	Çok problemlili
20	Aşırı problemlili

Çökme potansiyeli olan bir zeminde suyun varlığından da söz ediliyorsa, yapıları oturmalarına bağlı hasarlardan korumak için aşağıdaki önlemler alınabilmektedir.

- i. Zeminin inşa öncesinde ıslatılması ve oturmaların gerçekleşmesi sağlanabilir.
- ii. Zemine ön yükleme yapılarak oturmaların gerçekleşmesi sağlanabilir.
- iii. Zemine çeşitli kimyasalların enjekte edilmesi ile stabilizasyon sağlanabilir. Bu yöntemin başarılı olabilmesi için kimyasallar yeterince zemine işlemesi gerekmektedir.

Bu üç yöntem suyun ulaşabileceği tabaka kalınlığı 2.00 m veya daha az ise uygulanabilir. Eğer suyun temas ettiği tabaka kalınlığı 10.00 m derinliğe kadar ulaşıyor ise derin zemin iyileştirme yöntemleri kullanılır.



Şekil 2.10. Karayolundaki göçen zemin hasarı

2.2.3. Kontrolsüz Moloz Dolgular

Bu tür dolgular taş, tuğla, plastik, kül, kâğıt, ahşap vb. inşaat yığıntıları gibi atık malzemelerin gelişigüzel bir şekilde yığılmasıyla oluşturan zeminlerdir. Bu tür dolgularda dolguyu oluşturan malzemenin çeşidi ve özelliği değişkenlik gösterebilir. Kontrolsüz dolgular gevşek bir yapıya sahip oldukları için kendi ağırlıkları altında bile büyük oturmalar yapabilirler. Oturmaların büyük kısmı ise dolguların zemine yığılmasından itibaren bir iki yıl içerisinde gerçekleşebilir. Bu tür zeminlerde oturma büyüklüğü dolgunun başlangıç durumundaki sıklığıyla ilişkilidir. Başlangıçta dolgu gevşek bir yapıya sahipse büyük oturmalar meydana gelecektir. Kontrolsüz dolguların problemlili zemin olarak kabul edilmesinde, büyük oturma potansiyeline sahip olmalarının yanı sıra içerisindeki organik malzemelerin ayrışması sonucunda yanıcı ve zehirli gazları oluşturmaları da etkilidir. Eğimli arazilerde yapılan kontrolsüz dolguların kalınlığı ve arazideki dağılımları önemli olmaktadır. Bu tür dolgular yerleşim sahalarında yapılacak inşaat işlemleri için risk oluşturmaktadır. Kontrolsüz dolguların üzerine inşa edilecek yapı temellerinin, zemine aktaracakları yükler küçük boyutlu olmalıdır. Eğer inşa edilecek yapıdan dolayı zeminde yüksek gerilmeler oluşacak ise kontrolsüz dolgunun geçilmesi ve daha derindeki sağlam tabakaya ulaşılması gerekmektedir. Bu durumda derin temel yöntemlerinin kullanılması uygun olacaktır. Ancak bu tür dolgular daha önce de bahsedildiği gibi zehirli gazlar ve kimyasallar içerebildiğinden, imal edilecek kazıkların ayrışmaya ve korozyona karşı korunması gerekmektedir (Ghabaee, 2015).

Bu tür dolgularda oturma oranının hesaplanması dolgunun inşası sona erdikten sonra formül 2.3 ile hesaplanabilmektedir (Das, 2007).

$$m = \frac{\Delta H_f}{\Delta t} \quad (2.3)$$

Buradaki ifadeler,

H_f : Dolgunun maksimum yüksekliği

m : Oturma oranı



Şekil 2.11. Moloz dolguda bulunması muhtemel malzemeler

2.2. Problemlı Zeminlerde Zemin İyileştirme Yöntemleri

Dünyanın her yerinde ve ülkemizde geoteknik uygulamalarında problemlı zeminlere rastlamak mümkündür. Artan nüfus ve sürekli gelişen yaşam şartlarının sonucunda yapılaşma ihtiyacı da giderek artmaktadır. Ancak yapılar için uygun inşa alanları da bu büyümeye bağılı olarak giderek azalmaktadır. Bu nedenle problemlı zeminlerin çeşitli yöntemlerle iyileştirilmesi ve yapılaşma için kullanılması zorunlu hale gelmiştir.

Zeminlerde iyileştirme nedenlerini sıralayacak olursak bunların başında taşıma gücünün düşük olması gelmektedir. Yine yüksek şişme ve büzülme oranları, yüksek geçirimlilik, konsolidasyon oturmalarının yapı inşa edildikten sonra devam etmesi, zeminde stabilitenin yetersiz olması gibi zemin özellikleri yapılar için risk oluşturmaktadır. Ayrıca sıvılaşma, zemin yenilmesi, zemin büyütmesi olayları deprem gibi dinamik etkilere maruz kaldığında dayanımını kaybeden zeminlerde ortaya çıkabilmektedir. Tüm bu

olumsuz faktörlere karşı yapıları korumak ve yapı güvenliğini sağlamak için zemin iyileştirmesinin yapılması gerekmektedir.

Yapılar inşa edilmeden önce yani projelendirme aşamasında zemin parametreleri ve özellikleri zemin etütleriyle ayrıntılı olarak belirlenmelidir. Ayrıntılı etütler neticesinde zemin özelliklerinin proje şartlarına uygun olmaması durumunda, zeminlerin aşağıdaki yöntemlerle iyileştirilmesi mümkün olmaktadır:

- Problemlı zemin alanlarından vazgeçilmesi ve uygun zeminlerin bulunması
- Problemlı zemin tabakalarının aşılması ve derin temel metotlarının kullanılması
- Problemlı zemin tabakalarının kaldırılması ve bu zemin yerine ihtiyaçları karşılayabilecek zeminlerin yerleştirilmesi
- Problemlı zemin üzerinde inşa edilecek yapı temellerinin zemin parametrelerine uygun şekilde tasarlanması
- Problemlı zeminlerin çeşitli zemin iyileştirme yöntemleri ile iyileştirilmesi yöntemine başvurulabilir.

Bu yöntemler kullanılarak problemlı zeminlerdeki boşlukların azaltılması ile zeminin sıkılaştırılması, zemin boşluklarının katkı maddeleri ile doldurulması, yeraltı su seviyesinin düşürülmesi, zeminin su muhtevasının azaltılması amaçlanmaktadır. Problemlı zeminlerin oturmasının azaltılması, konsolidasyon sürecinin hızlandırılması, taşıma gücünün artırılması, şevlerin ve dolguların stabilizasyonunun sağlanması ve zeminin sıvılaşma potansiyelinin azaltılması amaçlarıyla uygulanan yöntemler ile zeminin;

- Kayma mukavemeti artar
- Permeabilitesi azalır
- Sıkışabilirliği azalır
- Sıvılaşma potansiyeli azalır
- Şişme ve büzülme potansiyeli azalır
- Borulanma olayına karşı mukavemeti artar
- Granüler zeminlerde sıklığın artması ve kohezyonlu zeminlerde kıvam değerleri iyileştirilir.

Zayıf ve problemlı zeminin iyileştirilmesine karar verilme aşamasında, sorunlu zeminin inşa edilecek yapının özellikleriyle birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Sorunlu zemin üzerinde yapılan etütlerden elde edilen veriler ışığında zeminin statik ve dinamik yükler altında davranışı analiz edilir. Gerekli değerlendirmeler yapıldıktan sonra zemin iyileştirme yöntemi belirlenir.

Problemlı zeminlerde yapılacak zemin iyileştirme yönteminin belirlenmesinde etkili olan faktörler aşağıda belirtilmiştir:

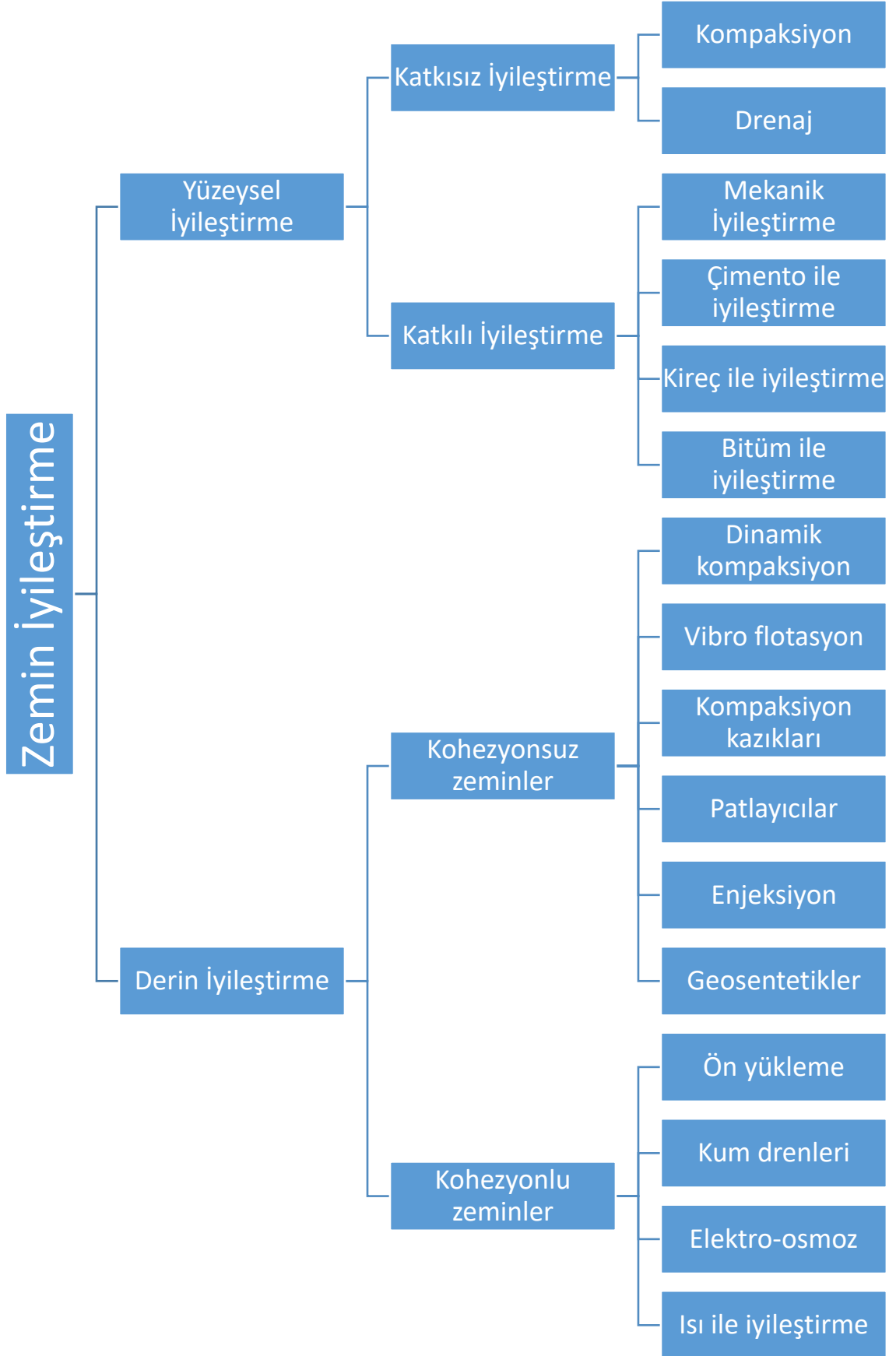
- Zeminin yatay ve düşey yönde yayılımındaki farklılıklar ve özellikleri, kıvam, konsolidasyonun durumu, zemindeki ince dane yüzdesi, süreksizlikler vb.
- Yeraltı suyu seviyesi ve akış özellikleri
- Zemin iyileştirmesinin verimliliği ve etkinliği
- Zemin iyileştirme yöntemlerinin uygulanacak zemindeki yararı ve büyüklüğünün karşılaştırılması
- Zeminin iyileştirmeye ihtiyaç duyan derinliği ve alanı
- İyileştirmenin uygulama aşamasında etkili olan faktörler (Ulaşılabilirlik, ekipman, inşaat için gerekli malzemeler, iş takvimi)
- Çevresel etkiler
- İyileştirmenin maliyet analizleri
- İyileştirmenin çevreye olan etkileri, çevredeki yapılara olan etkileri
- İyileştirmenin sonuçlarının kontrol edilebilme imkanının olması
- İnşa sonrasında bakım, onarım ve işletme ihtiyaçları

Zemin iyileştirme yöntemleri uygulanabilecekleri zeminler açısından farklı özelliklere sahiptirler. Bazı iyileştirme yöntemleri bir zemine özgü olabilirken, bazıları da birçok zeminde uygulama alanı bulabilmektedir. Şekil 2.12.'de zemin iyileştirme yöntemleri sıralanmıştır. Bu şekilde gösterilen zemin iyileştirme yöntemleri haricinde de zemin

iyileştirme yöntemleri bulunmaktadır. Ancak bu yöntemler en sık kullanılan yöntemler olarak kabul edilmektedirler.

Zemin iyileştirme yöntemleri uygulama derinliğine göre de sınıflandırabilmektedirler. Problemlili zeminin iyileştirilmesi aşamasında, zemin içinde fazla derine inmeden yüzeysel olarak yapılan iyileştirmelere yüzeysel stabilizasyon denilmektedir. Yüzeysel stabilizasyon işlemleri de kendi içinde ikiye ayrılmaktadır. Bunlardan ilki mekanik stabilizasyon olarak adlandırılırken, diğeri kimyasal stabilizasyon olarak adlandırılmaktadır.

- Mekanik stabilizasyon işlemlerinde zeminin kimyasal özellikleri değiştirilmeden, zeminin istenen dane dağılımına ulaşması amaçlanmaktadır. Bu amaçla zemin farklı türdeki ekipmanlarla sıkıştırılır. Zemin içindeki boşlukların azaltılır ve zeminin taşıma gücü artırılır.
- Kimyasal stabilizasyon yöntemlerinde ise zemine katkı maddeleri karıştırılır ve zeminin kimyasal yapısı değiştirilir, bu sayede zeminin istenen ihtiyaçları karşılayabilecek duruma gelmesi sağlanır.



Şekil 2.12. Zemin iyileştirme yöntemleri (Uzuner, 2013).

2.3. Katkı Maddeleri ile Zemin İyileştirme Yöntemleri

Dünya çapında artan nüfusa ve büyüyen yapılaşmaya bağlı olarak yapılar için uygun zeminler giderek azalmaktadır. Bu nedenle yapılaşma için uygun olmayan problemlili zeminlerinde, çeşitli zemin iyileştirme yöntemleriyle iyileştirilip kullanılmasını zorunlu hale gelmiştir. Problemlili zeminlerle, uzun güzergahlara sahip olmaları ve değişik zeminler üzerine inşa edilme zorunlulukları sebebiyle ulaşım yapılarında sıkça karşılaşılmaktadır. Problemlili zeminlerle karşılaşma sıklığının artmasının yanı sıra artan sanayi ve inşaat artıklarının oluşturduğu çevre problemlilerinde de ciddi artışlar meydana gelmektedir. Bu atıklar yalnızca ülkemizin bir sorunu olmayıp, küresel ölçekte aşılması gereken bir problemdir. Çevre için risk oluşturan bu atıklar çimento, kireç ve yapay polimerler vb. yapı malzemeleri olabildiği gibi, metal cürufu, uçucu kül ve atık lastik gibi sanayi atıkları da olabilmektedir. Bahsi geçen tüm bu atık malzemelerin geoteknik mühendisliği projelerinde kullanılmasının, ekonomik ve çevre koşullarının iyileştirilmesinde önemli katkıları bulunmaktadır. Son dönemde atık maddelerin zemin iyileştirmesinde, katkı maddesi olarak kullanılması amacıyla birçok araştırma yapılmıştır. Bu araştırmalar sayesinde, inşaat projelerindeki maliyetler düşürülebilecek ve atıklar ekonomiye kazandırılarak çevreye olan zararları engellenebilecektir. Katkı maddeleriyle zemin iyileştirmesinde, zemine bir veya birden fazla katkı malzemesi karıştırılmasıyla zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu bölümde katkı maddeleri ile zemin iyileştirme yöntemlerinin bazıları açıklanacaktır.

2.3.1. Kireç ile Zemin İyileştirilmesi

Kireç yüzyıllar boyunca insanlık tarafından zemin iyileştirme işlemlerinde kullanılmış ve günümüzde de yaygın olarak kullanılmaya devam edilmektedir. Bu yaygın kullanımın arkasında kireç ile zemin iyileştirilmesinin ekonomik olması ve arazide kolay uygulanma imkanının bulunmasıdır.

Kirecin imal edilmesi işlemini açıklayacak olursak: İçeriğinde %90 ve üzerinde CaCO_3 bulunan kireç taşının özel fırınlarda 900-1000 °C üzerindeki sıcaklıklarda pişirilmesiyle kireç elde edilir. Kireç taşının pişirilmesi ile kalsiyum oksit elde edilmesi işlemine

kalsinasyon [$\text{Ca}(\text{CO})_3 \rightarrow \text{CaO} + (\text{CO})_2$] denilmektedir. Ticari olarak kalsiyum oksidin adı sönmemiş kireçtir.

Kireç özellikle ince daneli (Kohezyonlu) zeminlerin arazide stabilizasyonunun sağlanmasında kullanılır. Kireç ile stabilizasyonda genel olarak kireç hidratlar kullanılmaktadır. Bu kireç hidratlar, yüksek-kalsiyum kireç (Kalsiyum Hidroksit) [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], sönmemiş kireç (Kalsiyum Oksit) (CaO), monohidrat dolomitik kireç [$\text{Ca}(\text{OH})_2\text{MgO}$] ve dolomitik sönmemiş kireç olarak sıralanabilir. Kireç ile zemin stabilizasyonunda genellikle zemine %5 ile %10 arasında kireç ilave edilir. İnce taneli zemine kireç ilave edildiğinde kil mineralleri ile kireç arasında puzolanik reaksiyonlar (Kasyon değişimi ve flokülasyon-aglomerasyon) meydana gelir.

- Kasyon değişimi: Killerde bulunan tek yüklü kasyonlar (Mg^{2+} , NH_4^+ , K^+ , Na^+ , Li^+) ile iyonunun yer değiştirmesiyle meydana gelir.
- Flokülasyon: İçerisinde çok küçük taneciklere sahip olan kolloidlerdeki katı tanecikleri, uygun maddeler kullanarak bir araya getirip, büyütürük çöktürme olayıdır.
- Aglomerasyon: Çok ince toz taneciklerinin bir araya gelerek büyük parçalar oluşturması işlemidir.



Şekil 2.13 Kireç numunesi

Kireç ile zemin stabilizasyonunda zeminin plastisitesi düşürülür, şekil değiştirme modülü ve zemin mukavemeti artırılır, şişme potansiyeli azaltılır ve zeminin çevresel etkilerden daha az etkilenmesi sağlanır. Zemin parametrelerinin iyileştirilmesine ek olarak plastisitenin azaltılması yapı temellerinin inşasında, rahat çalışılmasına olanak sağlamaktadır (Özaydın, 2016).

Killi zeminlerde plastisiteyi etkileyen parametreler ile kireç katkısının etkisi Çizelge 2.8’de gösterilmektedir. Zemin ile kireç arasında meydana gelen puzolanik reaksiyonda, kireç ile zeminin içeriğindeki silisyum ve alüminyum tepkimeye girerek, yüksek bağlayıcı özelliğe sahip ürünleri oluşturmaktadır. Puzolanik reaksiyonlar ısı ve nem gibi çevresel etmenlere bağlı olarak zamanla geliştiği için, zeminin dayanımındaki iyileşmede zamanla artmaktadır. Kireç ile zemin stabilizasyonu işlenebilirliği ve plastisiteyi olumlu yönde etkilediği gibi zemine uygulanacak olan kompaksiyon işlemlerini de önemli ölçüde etkiler. Zeminin su muhtevasının yüksek olduğu ve işlenebilirliği etkilediği durumlarda kireç katkısı ile zeminin su muhtevası istenilen düzeye indirilebilmektedir.

Çizelge 2.8. Killi zeminlerde kireç katkısının plastisiteye etkisi (Orhan, 2020).

Zemin	AASHTO Sınıflandırma	Kireç Katkısız		% 5 Kireç Katkı	
		LL %	PI%	LL %	PI %
Kil-1	A-7-6	53	29	NP	NP
Kil-2	A-7-6	54	33	NP	NP
Kil-3	A-7-6	54	31	NP	NP
Kil-4	A-7-6	46	29	NP	NP

Kireç ile iyileştirme, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sisteminde CH, CL, MH, ML, GC, SC sınıfındaki plastisite indeksi %10’dan büyük veya Kaliforniya taşıma oranı %10’dan küçük olan zeminlerde, son olarak CBR şişme yüzdesi %3’ten büyük olan zeminlerde uygulanmakta ve olumlu sonuçlar alınmaktadır (Ülker, 2005).

Kireç ile iyileştirilmiş zeminler incelendiğinde kısa dönemde zeminin optimum su muhtevasının arttığı, yine plastik limitin arttığı, likit limitin düştüğü, Proctor eğrisinin düzleştiği, CBR değerlerinde artış yaşandığı görülmüştür. İlerleyen dönemlerde CBR değerlerindeki artışlar devam etmekte, serbest basınç mukavemeti, kayma mukavemeti ve çekme dayanımları artmakta, şişme-büzülme ve don olaylarına karşı direnci artmaktadır.

2.3.1.1. Arazide kireç stabilizasyonu

Arazide kireç stabilizasyonu 3 farklı şekilde yapılabilmektedir:

- i. İlk olarak inşa yapılacak olan zemine, stabilizasyon için uygun olan ve daha önceden hesaplanan oranda kireç karıştırılır. Daha sonra ihtiyaç halinde zemine su ilavesi yapılır ve zemin çeşitli yöntemler ile sıkıştırılır.
- ii. İkinci bir yöntem olarak zemin ile uygun miktarda kireç ve su, saha dışında bir karışım ünitesinde karıştırılır. Sonrasında karışım sahaya taşınır ve uygun kalınlıkta serilerek sıkıştırma yapılır.
- iii. Son olarak kireç ile su karışımı uygun enjeksiyon ekipmanları yardımıyla zemine yüksek basınçla enjekte edilir. Bu sayede 4-5 m'lik bir zemin katmanında iyileştirme yapmak mümkün olabilmektedir.

Kireç su karışımı (sulandırılmış kireç) enjeksiyonunu yapabilen ekipmanlar, genellikle mobil bir araca monte edilmiş şekilde bulunurlar. Zemine enjeksiyonu yapacak olan ünite çapraz kirişli hidrolik asansör ve enjeksiyon tijleri vb. cihazlardan oluşur. Enjeksiyon çubukları hidrolikler yardımıyla zemindeki istenilen derinliğe ittirilir. Kireç ile su karışımı tanklarda karıştırıldıktan sonra enjeksiyon çubuklarına yüksek basınçla pompalanır. Kireç ile su karışımının hazırlanmasında kullanılan oran genellikle bir galon suya 1.13 kg kuru kireç şeklindedir. Bir başka deyişle karışımdaki su miktarının %30'u kadar ağırlıkta kireç kullanılarak karışım hazırlanır.

Yumuşak killi zeminlerde toz kireç (hidrate kireç) ilavesi ile, kısa sürede zemin plastik limit sınırından yarı katı ve katı hale geçiş yapar. Böylece inşaat işlerinde problem oluşturan yumuşak ve zahmetli zeminlere kireç ilave edilerek, inşa için uygun alanlar oluşturulur. Kireç ile zemin iyileştirme işlemi eğimli arazilerde ve şev stabilizasyonunda da kullanılabilir. Bu tür arazilerde zemine 10-15 cm'lik kuyular açılır, sonrasında kuyulara sönmemiş toz kireç doldurulur, böylece çok kısa sürede stabilitenin artışı sağlanabilmektedir.

İnce daneli zeminlerin optimum su muhtevsındaki serbest basınç mukavemetleri (q_u), zeminin yapısına bağlı olarak 170 kN/m² ile 2100 kN/m² arasında değişebilmektedir. Zemine %3 ile %5 oranında kireç ilavesi ve 28 günlük kür uygulamasından sonra,

zeminin serbest basınç dayanımında 700 kN/m^2 veya daha fazla bir artış sağlanabilmektedir (Orhan, 2020).



Şekil 2.14. Sahada kireç ile zemin stabilizasyonu

Kireç stabilizasyonu uygulanmış ince daneli zeminlerin sadece serbest basınç mukavemeti değil, aynı zamanda dolaylı çekme mukavemeti (σ_T) de artmaktadır. Bu artışın hesaplanmasında ve serbest basınç mukavemeti ile dolaylı çekme mukavemeti arasındaki ilişki formül 2.4 ile bulunabilmektedir. (Tek Eksenli Basınç değeri, MPa alınıp, sonuç kPa olarak belirlenir.)

$$\sigma_T(\text{kN/m}^2) = 47.54 + 50.6q_u(\text{MN/m}^2) \quad (2.4)$$

Benzer şekilde Elastisite Modülü (E_s) değeri de formül 2.5 ile yaklaşık olarak hesaplanabilmektedir.

$$E_s(\text{MN/m}^2) = 68.86 + 0.124 q_u(\text{kN/m}^2) \quad (2.5)$$

Önceki kısımlarda kil zeminlerdeki kireç katkısının plastisiteye olan etkisi belirtilmişti, Çizelge 2.9'de ise farklı araştırmacılar tarafından çeşitli zemin tiplerinde yapılan kireç iyileştirilmesinin sonuçları verilmiştir (www.fhwa.dot.gov).

Çizelge 2.9. Farklı zemin türlerinde kireç ile zemin stabilizasyonu

Zemin (Sınıfı- Yeri)	Kireç Yüzdesi (%)	Kıvam Limitleri			Mukavemet	
		Likit Limit (%)	Plastik Limit (%)	Plastisite İndisi (%)	qu (Kür süresi 28 gün, kPa)	CBR (%)
CH-Dallas Fort Worth havaalanı (McAllister and Petry, 1990)	0	63	33	30	524	
	2	62	48	14	848	
	3	60	47	13	1393	
	4	56	46	10	2227	
CH-Dallas Fort Worth havaalanı (McAllister and Petry, 1990)	0	60	27	33	483	
	2	48	32	16	1179	
	3	45	32	13	1220	
	5	48	34	14	1269	
CH-Irving, Teksas (McAllister and Petry, 1990)	0	76	31	45	441	
	2	61	45	16	799	
	3	56	45	11	1330	
	5	57	45	12	2082	
CH-Illinois (Thompson, 1966)	0	53	24	29	558	
	3	48	27	21	1386	
	5	NP	NP	NP	1462	
CH-Güney Karolina	0	71	33	38	634	
	3				1014	
	6				1179	
	8				1420	
CL-Missisipi (McElroy, 1989)	0	29	18	11		
	1	32	19	13		
	2	31	22	9		
	3	30	21	9		
CL-Illinois (Thompson, 1966)	0	26	15	11	317	
	3	27	21	6	869	
	5	NP	NP	NP	869	
SC-Honduras	0	54	23	31		8
	5	61	38	23		20
MH-Surinam (Harty, 1971, 7-günlük kür)	0	60	32	28	496	
	3				896	
	5				938	

2.3.2. Çimento ile Zemin Stabilizasyonu

Çimento, içeriğindeki kalker ve kil ile mineral parçalarını (çakıl, kum, briket, tuğla vb.) yapıştırmada kullanılan bağlayıcı bir malzemedir. Çimentonun bağlayıcı özelliğini gösterebilmesi için suyla reaksiyona girmesi gerekmektedir. Çimento su ile reaksiyona girdikten sonra sertleşerek mukavemet kazanır. Çimentonun üretilmesi aşamasında öncelikle kırılmış kalker taşı, kil ve gerekiyorsa kum veya demir cevheri öğütülerek toz haline getirilir. Toz haline getirilen bu malzeme 1400-1500°C’de döner fırınlarda pişirilerek klinker haline getirilir. Daha sonra %4-5 oranında alçı klinker ile karıştırılır ve ikinci bir öğütme işlemine tabii tutularak çok ince bir toz haline getirilir. Ortaya çıkan bu son ürün, piyasada çok yaygın bir şekilde kullanılan Portland çimentosudur (www.thbb.org).



Şekil 2.15. Portland çimentosu

Çimento bünyesinde bulundurduğu silika sayesinde zemin iyileştirme için gerekli olan puzolanik reaksiyonların oluşmasını sağlamaktadır. Böylece çimento içerdiği silika sayesinde, bünyesinde bağlayıcı bir malzeme bulunmayan zeminlerin stabilizasyonunda kullanılabilir. Betonun yapısında bulunan malzemelerin bir arada tutulmasında bağlayıcı olarak görev yapan çimento, betondaki gibi zemin daneleri arasında da

bağlayıcı işlevini görmektedir. Çimentonun beton üretimi ile zemin iyileştirilmesinde kullanımı arasındaki en önemli fark, zemin iyileştirmesinde beton üretimine oranla çok daha az miktarda çimento kullanılmasıdır. Betonun bileşenlerinin çimento, agrega ve su olduğu düşünülürse çimento ile iyileştirilmiş zeminde benzer bileşenlerden oluştuğu görülecektir. Bu nedenle çimento ile iyileştirilmiş zemini düşük dayanımlı bir betona benzetmek mümkün olabilmektedir. Beton üretimde kullanılan çimento ile suyun arasında meydana gelen reaksiyonların, betonun dayanımını zamanla arttırmasına benzer olarak zemin iyileştirmesinde de zeminin dayanımı zamanla artmaktadır (Özaydın, 2016).

Çimento ile zemin stabilizasyonun yaygın kullanım alanları karayolları, havaalanları ve toprak baraj vb. projeler olmaktadır. Bu tür projelerde yüzeysel zemin stabilizasyonunda kullanılan çimento ayrıca derin kazı stabilizasyonunda, şev stabilizasyonunda ve konsolidasyon oturmalarının hızlandırılmasında da kullanılmaktadır. Çimento ile yüzeysel zemin iyileştirmesinde genellikle tercih edilen çimento, Portland çimentosu olmaktadır. Portland çimentosunun kolay bir şekilde temin edilebilmesi ve yüksek dayanım değerlerine sahip olması, ayrıca diğer kimyasal katkı maddelerinden daha ekonomik olması sebebiyle yüzeysel zemin iyileştirmede yaygın olarak tercih edilmesine neden olmuştur. Portland çimentosunun geç priz alması ise bir dezavantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. Çimento ile zemin iyileştirmesi yapılırken sonuca etki eden en önemli faktörler zeminin yapısı ve su-çimento oranı olarak söylenebilir. Zeminin doğal su muhtevası bu kısımda belirleyici olmaktadır. Eğer zemindeki su çok fazla veya çok az ise bu durum iyileştirme sonucunda zeminin mukavemetine ve plastisitesine olumsuz etki edebilmektedir.

Çimento ile zemin stabilizasyonunda meydana gelen reaksiyonlar kireç stabilizasyonu ile benzerlikler içermektedir. Çimento ile su karıştırıldığında hidrasyon reaksiyonu oluşmaya başlar. Çimentonun hidrasyonu sürecinde değişik kimyasal bileşikler ve jeller oluşmaktadır. Bu süreç uygulama yapılan zeminin kimyasal yapısını değişmesine neden olan karmaşık bir puzolanik reaksiyondur. Reaksiyonun başlangıcında daneler arasında bağlar oluşmakta sonrasında ise zemin-çimento karışımının sertleşmesini sağlayan puzolanik reaksiyonlar meydana gelmektedir. Buradan da anlaşılacağı gibi zemin iyileştirmesindeki önemli aşama oluşan puzolanik reaksiyon aşamasıdır. Oluşan bu puzolanik reaksiyon çevresel koşullarla beraber zeminin cinsine bağlı olarak devam

edebilmektedir. Puzolanik reaksiyonlar devam ettiği sürece zeminin dayanımı da artmaya devam etmektedir (Bergado ve Anderson, 1996).

Çimento ile zemin stabilizasyonu kumlu ve killi zeminlerde etkili sonuç vermekte, ancak zemin yüzeyinde kısmen bir homojenliğin olması gerekmektedir. Bir başka deyişle çimento ile iyileştirme yapılacak olan alanda, zeminin yüzeyindeki nem ve yoğunluk benzer özelliklere sahip olmalıdır. Kireç ile zemin stabilizasyonuna benzer olarak çimento ile stabilizasyonda zeminin likit limit değerini düşürür, plastik limiti ve işlenebilirliğini artırır. Çimento ile zemin stabilizasyonu uygulanacak killi zeminin özellikleri, likit limitin %45-50'den küçük olduğu ve plastisite indisinin yaklaşık %25'ten düşük olduğu durumlarda etkili olmaktadır. Çizelge 2.10.'de farklı zemin türlerinde çimento ile etkili bir stabilizasyonun yapılabilmesi için, gerekli olan çimento miktarı verilmiştir.

Çizelge 2.10. Farklı zemin türleri için hacimsel çimento yüzdeleri (Das, 2007).

Zemin Türü		Hacimsel Çimento Yüzdesi (%)
AASHTO	USCS	
A-2 ve A-3	GP, SP ve SW	6-10
A-4 ve A-5	CL, ML ve MH	8-12
A-6 ve A-7	CL, CH	10-14

Granüler zeminler ve düşük plastisite değerlerine sahip killi zeminler çimento stabilizasyonu için en uygun olanlardır. Kalsiyum mineralli killer, çimento katkısı ile daha kolay stabilize edilirken, sodyum ve hidrojen mineralli (bağlayıcı) killer kireç stabilizasyonu için daha uygundur. Bu nedenlerden dolayı stabilize edici katkı maddesinin seçiminde dikkat edilmelidir (Orhan, 2020).

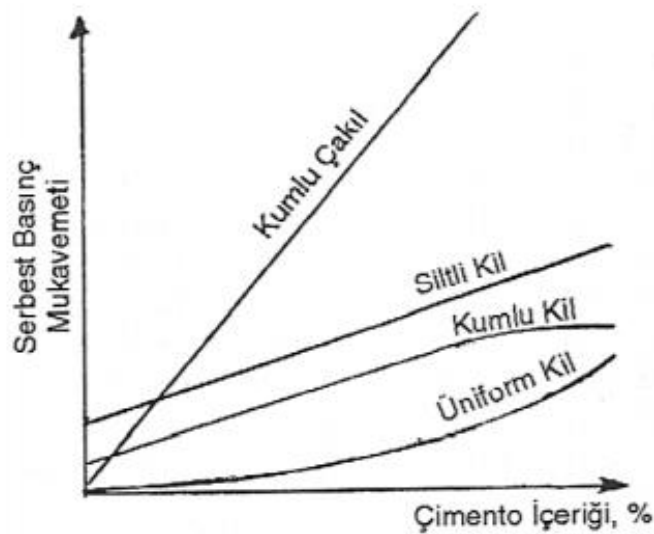
Çimento ile iyileştirme yapılmış zeminlerin, kür süresince dayanım kazanmaya devam ettiği daha önce de belirtilmişti. Çizelge 2.11.'de ise yaklaşık olarak %10 çimento ile iyileştirilmiş farklı türdeki zeminlerin, iyileştirme öncesi ve sonrasındaki tek eksenli basınç mukavemetleri verilmiştir.

Çizelge 2.11. Çimento katkılı ve katkısız zeminlerin serbest basınç mukavemetleri (Orhan,2020).

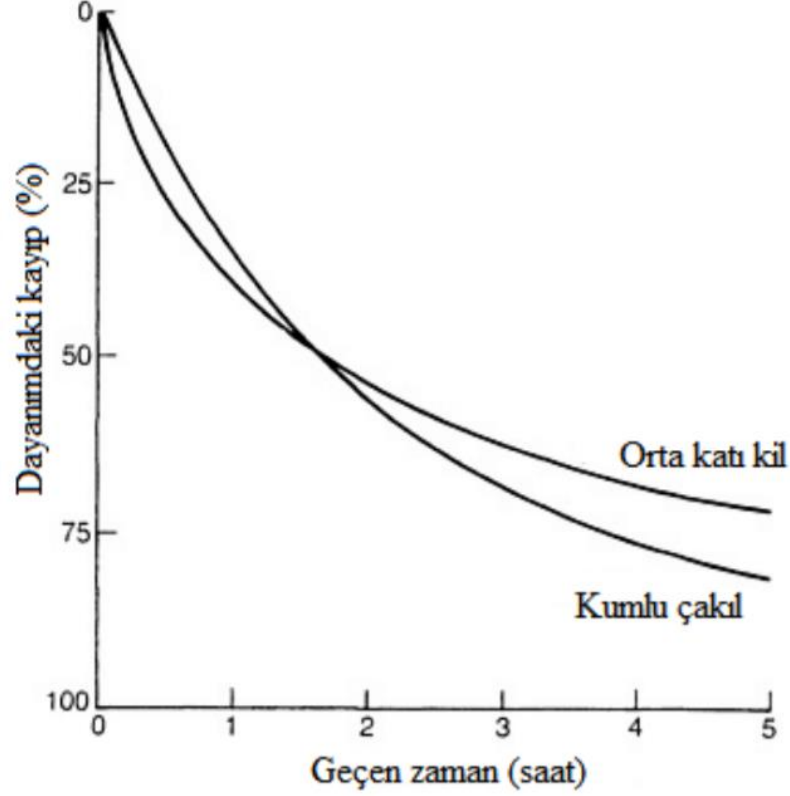
Zeminin Durumu	Zemin Tipi	Tek Eksenli Basınç Mukavemeti (kPa)
Doğal zemin	Kil, turba	< 350
	İyi sıkıştırılmış kumlu kil	70-280
	İyi sıkıştırılmış çakıl, kum-kil karışımları	280-700
Zemin ve % 10 çimento katkısı	Kil, organik zemin	< 350
	Silt, siltli kil, kötü derecelenmiş kum ve az organik zeminler	350-1050
	Siltli kil, kumlu kil, kötü derecelenmiş kum ve çakıl	700-1730
	Siltli kum, kumlu kil, kum, çakıl	1730-3460
	İyi derecelenmiş kum-kil veya çakıl -kum-kil karışımları	3460-10350

Çimento ile enjeksiyon işlemi, kireç ile enjeksiyon işlemindeki gibi çimento-su karışımı (su-çimento oranı: 1/10) olacak şekilde Portland çimentosuyla yapılmaktadır. Daha sonra bu karışım yüksek basınçlı ekipmanlarla, yapı temelinin altındaki problemlili zemin tabakalarına enjekte edilir. İşlem sonunda problemlili zemin tabakalarındaki hidrolik iletkenlik azalırken, taşıma gücü ve mukavemet artmaktadır (Das, 2007).

Çimento ile iyileştirmesinde en etkili sonuç granüler zeminlerde elde edilmektedir. Farklı zemin türlerinde, zeminin içeriğindeki çimento miktarı ile serbest basınç dayanımları arasındaki ilişkiler Şekil 2.16'de gösterilmektedir (Tunç, 2002).

**Şekil 2.16.** Farklı zemin türlerinde çimento içeriğine bağlı olarak serbest basınç mukavemetlerindeki değişimler (Tunç, 2002)

Zemin ile çimento bulamacı karıştırıldıktan sonra zaman kaybedilmeden sıkıştırılmalıdır. Aksi takdirde zemin iyileştirmesiyle elde edilmek istenen sonuçlara ulaşılamamaktadır. Şekil 2.17.'de kohezyonlu ve kohezyonsuz iki zemin üzerinde, karıştırılma sonrası sıkıştırma işlemine kadar geçen süreye bağlı olarak, zeminin dayanımındaki değişim gösterilmiştir. Zeminler %10 katkı oranıyla iyileştirilmiş ve standart kompaksiyon enerjisiyle sıkıştırılmışlardır.



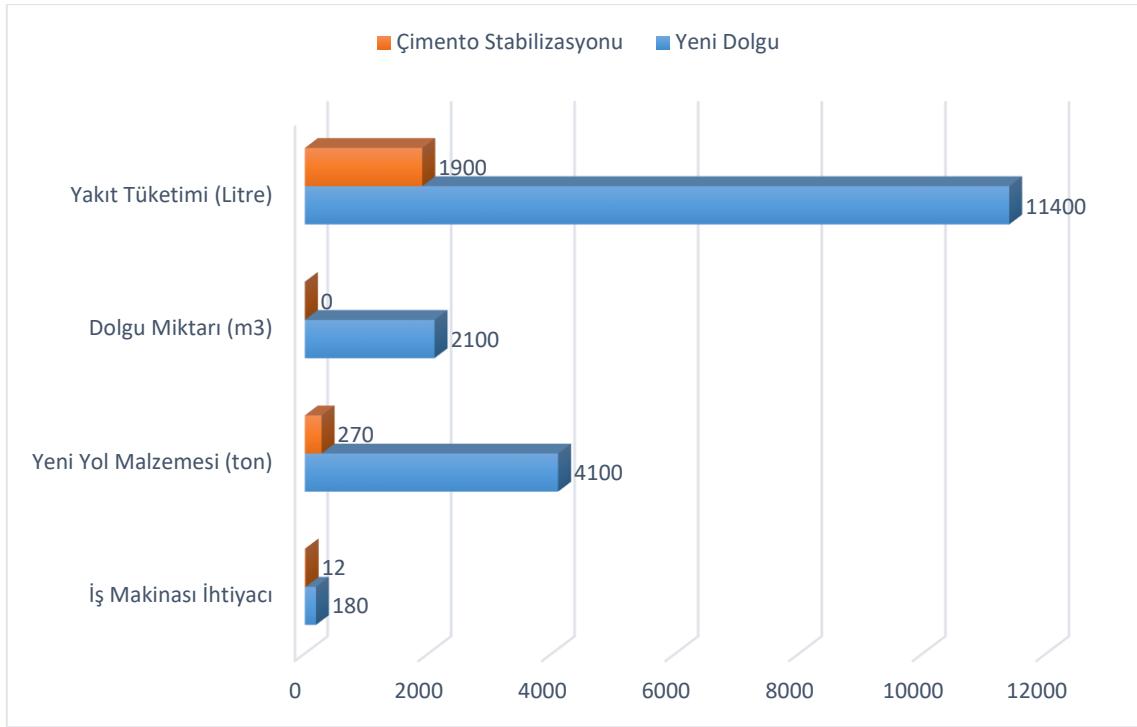
Şekil 2.17. Çimento-zemin karışımında, sıkıştırma zamanının dayanıma etkisi (Ingles ve Metcalf, 1972).

Çimento ile zemin stabilizasyonunda, zemin-çimento karışımları farklı şekillerde oluşturulabilmektedir. Uygulama alanlarına ve proje istemlerine göre genellikle üç tip zemin-çimento karışımı bulunmaktadır. Bahsi geçen bu çimento-zemin karışımları kıvamları ve imal yöntemleri nedeniyle farklılık göstermektedirler.

- i. Çimento-zemin karışımlarının ilki kıvam olarak sıva harcına benzeyen su, çimento ve zeminin belli oranlarda karıştırılmasıyla imal edilir. Bu kıvamdaki çimento-zemin karışımları şev stabilizasyonunda ya da erozyonun yüksek seviyelerde olduğu zeminlerde sıklıkla kullanılmaktadır.

- ii. Çimento katkılı zemin karışımları daha yüksek kıvama sahip olan yarı katılaşmış ya da katılaşmamış zemin-çimento karışımlarıdır. Diğer zemin-çimento karışımlarıyla kıyaslandığında daha az miktarda portland çimentosu zeminle karıştırılır. Bu işlem sonucunda zeminin hem fiziksel hem kimyasal yapısı değiştirilir. Fiziksel ve kimyasal yapısı değişen zeminin su tutma kapasitesi ve plastisitesi düşer, ayrıca zeminin taşıma gücü ve mukavemetinde artış görülür. Zeminde meydana gelen iyileşme, kullanılan çimento miktarına ve zeminin türüne göre değişiklik göstermektedir. Bu karışım genel olarak temel altı dolgusu, yol dolgusu ve iksa arkası dolgusu olarak kullanılmaktadır.
- iii. Sıkıştırılmış ve öğütülmüş zemin-çimento karışımları ise zeminin öğütülmesi ve belli oranda çimento ve suyun karıştırılması, serilmesi ve sıkıştırılması sonucu oluşur. Bu öğütme ve karıştırma işlemi sonucu karışım daha homojen bir yapıya sahip olur. Böylece diğer karışımlara göre daha rijit ve ortalama mukavemete sahip yeni tabaka ıslanma-kuruma, donma-çözülme etkilerine karşı daha dayanıklı olmaktadır (Çetin, 2011).

Problemlili zeminin çimento ile yüzeysel stabilizasyonu sonucu, zeminin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesine ek olarak maliyetlerde ciddi oranda azalmaktadır. İyileştirilen zeminin mukavemeti ve taşıma gücü arttığı için gerekli olan dolgu kalınlığı azalır. Problemlili zemini kaldırarak, yerine uygun özelliklere sahip bir zemin yerleştirmenin aksine, mevcut zeminin kullanılması ortaya çıkacak kazı ve dolgu maliyetlerini ortadan kaldırır. Bunlara ek olarak işletme bakım masrafları da %25 - %50 arasında azalır. Uluslararası Portland Çimentosu Birliğinin yaptığı bir araştırmada 1.6 km uzunluğunda 7.3 m genişliğinde ve 15 cm kalınlığında ki bir temel altı kazılarak yerine dolgu yapılması işiyle zeminin çimento ile yüzeysel stabilizasyonu Şekil 3.5.'de karşılaştırılmıştır. Grafik incelendiğinde çimento ile stabilizasyon tercih edildiğinde yakıt harcamalarından %83, yeni yol malzemesi ihtiyacından %93, yine iş makinası ihtiyacından %93 oranında tasarruf sağlanacağı; ayrıca dolgu malzemesi ihtiyacının tamamen ortadan kalkacağı görülmektedir.



Şekil 2.18. Zeminde yeni dolgu ve çimento stabilizasyonun karşılaştırılması (Harrison, 2000).

2.3.3. Uçucu Kül ile Zemin Stabilizasyonu

Günümüzde adını sıklıkla duyduğumuz rüzgâr, güneş ve dalga enerjilerinden elektrik üreten santrallerin kullanımı her geçen gün artmaktadır. Ancak yenilebilir enerjideki bu gelişmelere rağmen kömür halen dünyanın ana enerji kaynağı olarak yerini korumaktadır. Ülkemizde de 2020 yılı kasım ayı verilerine göre elektrik üretiminin yüzde %36,3'ü kömür kullanan termik santraller tarafından üretilmektedir. Kömürün elektrik üretiminde oynadığı büyük rolün yanında, atık yakma tesisleri ve hurda demir-çelik tesisleri gibi yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duyan işletmelerde de kullanımı söz konusudur. Söz konusu işletmelerde öğütülerek toz haline getirilen kömürün, yanması sonucunda uçucu kül olarak tabir edilen atık ortaya çıkmaktadır. Termik santral tipine göre değişmekle birlikte kömürün yanma esnasında %10-%20'lik kısmı kazan altına düşer ve su ile uzaklaştırılır. Su yardımıyla uzaklaştırılan bu atığa kazan altı külü denmektedir. Geriye kalan atık ise sıcak baca gazlarıyla taşınan, elektro veya siklon filtrelerde toplanan çok ince silis ve alüminosilisli bir yan kalıntıdır. Yüksek sıcaklıkta yanan kömürün (1100-1600 °C) oluşturduğu bu malzeme soğumaya başlar, baca boyunca oluşan gaz akışı ile küre şeklini alan malzeme küçük kül taneciklerine dönüşmektedir. Meydana gelen toz tanecikleri çok

küçük boyutlara (0.5-150 mikron) sahip oldukları için, yanma sonucu ortaya çıkan sıcak gazlarla beraber sürüklenirler. İşte bu nedenle uçucu kül olarak adlandırılmaktadırlar.

Ülkemizde tüketilen kömür miktarı incelendiğinde 2018 yılı rakamlarına göre, 1.1 milyon ton yerli taş kömürü, 39.14 milyon ton ithal kömür, 82.48 milyon ton linyit ve asfaltit olmak üzere toplamda 122.82 milyon ton olmuştur. Taş kömürü ve linyit kullanımlarında en büyük payı termik santraller almıştır. Taş kömürü tüketiminde %60,7 ve linyit tüketiminde %73,5 enerji ve ısı üretimi için kullanılmıştır (TMMOB, 2020). 2018 yılındaki veriler incelendiğinde yaklaşık olarak 90 milyon ton kömürün enerji üretimi için kullanıldığı görülmektedir. Buna bağlı olarak yaklaşık 25 milyon ton uçucu kül meydana gelmektedir. Sadece ortaya çıkan sera gazı sebebiyle değil, aynı zamanda meydana gelen yüksek miktarda kül ve cürufta çevre kirliliği açısından önemli problemler oluşturmaktadır. Büyük miktardaki atığın örtülmesi yoluyla bertaraf edilmesi, nispeten kolay bir yöntem olarak öne çıksa da kül miktarının fazla olması nedeniyle, gerekli olan depolama alanı da artmaktadır. Bu nedenle bu atıkların farklı endüstrilerde tekrar değerlendirilmesi önem kazanmaktadır. Uçucu küllerin mevcut depolama yöntemleri hem yeraltı suyunu kirletmesi hem de havaya karışması nedeniyle insan sağlığını olumsuz bir şekilde etkilemektedir.

Uçucu küllerin baca filtreleri yardımıyla tutulmasıyla, havaya karışması engellense de tutulan uçucu küllerin depolanması aşamasında çevreye olan zararı devam etmektedir. Uçucu küllerin çevreye ve insan sağlığına olan etkileri arasında tarımsal üretime zarar verme, tozlanma, yağmur ve rüzgâr erozyonu, zemine sızarak toksin maddelerle toprağı ve yeraltı suyunu kirletme doğrudan verdiği zararlar olarak ifade edilebilir. Meydana getirdiği bu çevresel sorunlarla beraber, etkilediği çevrede su ve hava kalitesini düşürme, doğal hayatı yok etme, bölgenin ekonomisine ve sosyal hayatına zarar verme vb. etkiler de ortaya çıkabilmektedir. Solunan toz canlıların yaşam süresini kısaltmakta ve erken ölüme sebep olmaktadır. Rüzgarla taşınan toz, verimli toprakların üzerine çökerek toprağı sertleştirir ve cansızlaştırır. İnsanlarda ise kansere, gelişim bozukluklarına ve üreme sorunlarına sebep olur.

Uçucu küllerin bertaraf edilmesi için dört temel yöntem bulunmaktadır.

- Külün sulu olarak depolanması
- Kuru depolama

- Maden alanlarında ortaya çıkan boşlukları doldurma
- Okyanusta bertaraf etme

Uçucu küllerin depolanması işlemi genel olarak, suyla beraber külün işletmeden uzaklaştırılarak depolama alanlarında çamur olarak depolanması şeklinde yapılmaktadır. Bu sayede uçucu külün rüzgâr ile taşınması önlenmektedir. Ancak sulu depolama yapılırken de ciddi riskler ortaya çıkmaktadır. Eğer depolama alanının sızdırmazlığı tam manasıyla sağlanamaz ise, sızan kirli su içme suyuna karışarak çevresel tehdit oluşturmaktadır. Bu tehdidi arttıran bir diğer önemli faktör ise, uçucu küllerin içindeki eser miktardaki yüksek çözünürlüklü elementin suya rahatlıkla karışmasıdır. Uçucu küllerin depolanmasında ve bertaraf edilmesinde ortaya çıkabilecek bu büyük risklerden korunmanın yolu ise farklı şekilde değerlendirilmesiyle mümkün olabilmektedir. Örnek olarak Amerika Birleşik Devletleri'nde 2013 verilerine göre 53 milyon ton kömür külü oluşmuş ve bunun 23 milyon tonu alternatif hammadde olarak kullanılmıştır. En fazla beton üretiminde hammadde olarak kullanılmış, yine maden sahalarının doldurulması, yapısal dolgular ve çimento üretiminde de kullanılmıştır. Ayrıca uçucu küller seramik, kimya, cam, döküm ve metal sanayi, tarımda zemin ıslahı, çevre, sondaj çalışmalarında, buzlanmanın önlenmesi gibi farklı sektör ve uygulamalarda kullanılmaktadır.

Dünya genelinde 2019 yılı verilerine göre kömürlü termik santrallerde ortaya çıkan toplam uçucu kül miktarı, yaklaşık 500 milyon tondur. Hollanda, İtalya ve Danimarka ülkelerindeki mevzuata göre, atık depolamaya izin olmadığı için ortaya çıkan uçucu külün tamamını geri dönüştürmektedir. Ancak ABD, İngiltere, Çin gibi yüksek sanayi üretimi olan ülkelerde %30-%50 arasında bir miktar yeniden kullanılmaktadır. Ülkemizde ise ortaya çıkan uçucu külün hangi oranda yeniden değerlendirildiği hakkında bilgi bulunmamaktadır. Ancak bazı kaynaklarda üretilen uçucu külün yaklaşık %5'lik kısmının beton ve çimento üretiminde katkı maddesi olarak kullanıldığı belirtilmiştir.

Son dönemde geoteknik mühendisliği çalışmalarında uçucu külün olumlu sonuçlar verdiği görülmüş, bu nedenle uygulama alanları genişlemiştir. Yumuşak zeminlerin yüzeysel stabilizasyonunda kullanılan uçucu külün, konvansiyonel yöntemlere alternatif olabileceği ortaya çıkmıştır. Uçucu külün yüzeysel zemin iyileştirmede kullanımı, zemin ile uçucu külün karıştırılıp sonrasında sıkıştırılması işlemi ile yapılmaktadır. Bu işlem öncesinde iyileştirme yapılacak zemin numunesi ile uçucu kül karışımlarının mukavemet

özellikleri belirlenmeli ve karışımdaki optimum uçucu kül miktarı laboratuvar deneyleriyle tespit edilmelidir.

Atık ürün olarak ortaya çıkan uçucu külün geoteknik mühendisliğinde değerlendirilmesi istendiğinde, karşımıza puzolan olarak kullanılmaları çıkmaktadır. Daha önceki bölümlerle bahsi geçen puzolanik reaksiyonları oluşturan puzolanlar, kendi başlarına bağlayıcılıkları olmayan ya da çok az olan malzemelerdir. Ancak öğütülüp toz haline getirildiğinde, sulu ortamda kireç ya da çimento gibi bağlayıcı malzemelerle karıştırıldığında, bu malzemelerin içeriğinde bulunan kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek bağlayıcı özelliğe sahip bileşikler oluşturan; silisli (SiO_2), aktif silisli veya alüminalı (Al_2O_3) malzemelerdir.

Puzolanlar, doğal ve yapay puzolanlar olmak üzere iki ana başlık altında incelemektedir. Doğal puzolanlar kendi içinde volkanik kökenli puzolanlar ve ısıtılma maruz bırakılmış killer olarak ikiye ayrılmaktadır. Yapay puzolanlar kendi içinde;

- Uçucu kül,
- Silis dumanı,
- Yüksek fırın cürufu,
- Pirinç kabuğu külü,

olarak yapay yöntemler sonucu ortaya çıkan malzemelerdir.

Uçucu külün yüzeysel zemin stabilizasyonunda katkı maddesi olarak kullanılması için uygun kimyasal yapıya sahip olması gerekmektedir. Uçucu külün bağlayıcılık özelliği tek başına kullanıldığında çok az bulunmakta ya da hiç bulunmamaktadır. Buna rağmen diğer bütün puzolanlar gibi uçucu külde normal sıcaklıkta, öğütülmüş halde ve sulu ortamda kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek bağlayıcı özelliği bulunan bileşikler meydana getirir. Uçucu küller kimyasal yapılarındaki farklılıklara göre çeşitli şekillerde sınıflandırılmaktadır. Bunlardan ilki uçucu külün içeriğindeki CaO miktarına göre yapılmaktadır:

- F tipi uçucu kül, içeriğindeki CaO miktarı %10'dan az olan düşük kireçli uçucu kül türüdür.
- C tipi uçucu kül, içeriğindeki CaO miktarı %10'dan fazla olan yüksek kireçli uçucu kül türüdür.

Başka bir sınıflandırma uçucu külün içeriğindeki kireç ve SO_3 miktarına göre yapılmaktadır. Bu sınıflandırmada üç ayrı grup altında uçucu küller toplanmaktadır:

- Ana yapısını silikaalüminatların oluşturduğu, ($SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$) kısaca S+A+F toplamı ağırlıkça %70'in üzerinde olan ve genel olarak termik santrallerde taş kömürünün yakılmasıyla ortaya çıkan silikaalüminatlı uçucu küllerdir. İçeriğindeki SiO_2 miktarı Al_2O_3 miktarından daha yüksektir, CaO yüzdesi ise %15'ten daha azdır.
- Çoğunlukla linyit kömürünün yakılması sonucu ortaya çıkan, S+A+F toplamı %50 ile %70 arasında olan, silikokalsik uçucu küllerdir.
- Son olarak yine linyit kömürünün yakılmasıyla oluşan, ancak silikokalsik uçucu küllerden farklı olarak S+A+F toplamı %50'ten fazla olan ve içeriğinde diğer uçucu küllerden daha fazla SO_3 ve CaO bulunan sülfokastik uçucu küllerdir.

ASTM-C 618'de ise uçucu küller iki grup altında sıralanmaktadır. Bunlar şu şekildedir:

- Bitümlü kömürlerin yüksek sıcaklıklarda yakılmasıyla ortaya çıkan ve S+A+F toplamı %70'ten fazla olan F sınıfı uçucu küllerdir. Bu tür uçucu küllerde CaO miktarı %10'un altında olduğundan düşük kireçli uçucu kül olarak da adlandırılırlar.
- Yarı bitümlü veya linyit kömürün yanması sonucu oluşan ve S+A+F toplamı %50'den fazla C sınıfı uçucu küllerdir. Bu tür uçucu küllerde CaO miktarı %10'dan yüksek olduğu için yüksek kireçli uçucu kül olarak da adlandırılırlar. C sınıfı uçucu küller içeriğinde bulunan yüksek CaO sayesinde hem puzolanik hem de bağlayıcı özelliğe sahiptirler. Bu uçucu küller ilave aktivatöre ihtiyaç duyulmayan uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Özellikle stabilize edilecek olan geniş zeminlerde ekonomik bir çözüm olarak görülmektedir.

İçeriğindeki kireç ve SO_3 miktarına göre yapılan sınıflamada silikoalüminatlı olan uçucu küller ASTM-C 618'e göre F sınıfındadır. Silikokalsik uçucu küller ise ASTM-C 618'e göre uçucu külün yapısıyla değişmekle birlikte F veya C sınıfında bulunabilmektedir. Sülfokastik uçucu küller ise çoğunlukla C sınıfı altında yer almaktadır. ENV 197-1'e göre uçucu küller yine iki grup altında sıralanmaktadır. Bu sınıflandırmada çimento imalatında kullanılacak olan uçucu küller, silisli ve kalkerli uçucu küller olarak kategorize edilmiştir (Şenol vd., 2003).

Uçucu küllerin fiziksel özellikleri elde edildiği malzemeye, yakma işleminin gerçekleştiği fırınların özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Uçucu küllerin krem, kahverengi ve siyah renkleri olabilmektedir.



Şekil 2.19. Farklı kimyasal yapı ve renkte bulunan uçucu kül numuneler (Kosmatha vd., 2002).

Uçucu küller yakılmadan önceki öğütülme işlemine ve kömürün cinsine bağlı olarak 1-150 mikron aralığında dane boyutuna sahip olabilmektedir. Taş kömüründen elde edilen uçucu küllerin boyutu, linyit küllerinden daha küçük olmaktadır. Uçucu küllerin birim hacim ağırlığı içeriğindeki alüminat, demir, silikat ve yanmamış karbon miktarına bağlı olarak çoğunlukla 21-27 kN/m³ aralığında değişmektedir.

Uçucu küllerin kimyasal yapısı incelendiğinde SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, SO₃, MgO, Na₂O, K₂O ve TiO₂ gibi oksitlerin neredeyse tamamına rastlamak mümkündür. Ancak külün kaynağı ve üzerinde uygulanan işlemlere bağlı olarak içeriğindeki oksit yüzdeleri değişmektedir. Türk Standartları Enstitüsü tarafından uçucu küller ile ilgili olarak çıkarılan ve yürürlükte olan standartlar aşağıda listelenmiştir;

- TS EN 450-1: Betonda üretiminde kullanılan uçucu küllerin tarif, özellik ve uygunluk kriterleri
- TS EN 450-2: Beton üretiminde kullanılan uçucu küllerin uygunluk değerlendirilmesi

- TS EN 197-1: Genel çimentolar-bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri
- TS EN 451-1: Uçucu kül deney yöntemleri başlığı altında serbest kalsiyum oksit muhtevasının tayini
- TS EN 451-2: Uçucu kül deney yöntemleri başlığı altında, ıslak eleme ile incelik tayini
- TSE CEN / TR 16443: EN 450-1:2005 + A1 revizyonu için tarihçe: 2007, beton için uçucu kül
- TSE CEN / TR 15840: Betonda kullanılan uçucu külün uygunluk değerlendirmesi
- TS EN 14227-3: Hidrolik bağlayıcı karışımlar başlığı altında, uçucu kül bağlayıcılı karışımlar
- TS EN 14227-4: Hidrolik bağlayıcı karışımlar başlığı altında, hidrolik bağlayıcılı karışımlar için uçucu kül

TS-EN 197-1'de ASTM'ye benzer şekilde uçucu küller için iki sınıflandırma mevcut olup, çimento üretiminde kullanılacak uçucu küllerin sınıfları ve özellikleri ise şu şekilde açıklanmıştır;

- Silissi uçucu kül (V): Büyük kısmı puzolanik özelliklere sahip ve küresel partiküllerden meydana gelen ince toz görünümlü malzemedir. Malzemenin kimyasal içeriğinde esas olarak silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) bulunur. Malzemenin geri kalan kısmını ise demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer bileşikler oluşturmaktadır. Bir uçucu kül numunesinin bu kategoriye dahil olabilmesi için reaktif CaO oranının %10'dan az olması, buna ek olarak reaktif SiO_2 içeriğinin kütlece %25'ten fazla olması ve son olarak serbest CaO miktarının ise %1'den fazla olmaması beklenmektedir.
- Kalkersi uçucu kül (W): İçeriğinde yüksek miktarda reaktif kalsiyum oksit (CaO), reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) bulunan hidrolik ve puzolanik özellikleri olan ince toz görünümlü malzemedir. Bu bileşikler dışında malzemenin kimyasal yapısında demir oksit (Fe_2O_3) ve çeşitli bileşikler bulunmaktadır. Malzemenin bu sınıfa ait olabilmesi için içeriğinde %10'dan fazla reaktif kalsiyum oksit (CaO) ve %25'ten fazla reaktif silisyum dioksit bulunması gerekmektedir.

ASTM ve TSE standartlarına göre uçucu küllerin özellikleri ve kimyasal yapısına ait yüzdeler Çizelge 2.12.'te gösterilmiştir.

Çizelge 2.12. TSE ve ASTM'ye göre uçucu kimyasal uygunluk koşulları

Kimyasal Bileşik	TS EN 450	TS EN 197-1		TS 639	ASTM	
		V	W		F Sınıfı	C Sınıfı
	Ağırlıkça %	Ağırlıkça %	Ağırlıkça %	Ağırlıkça %	Ağırlıkça %	
(SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃)	-	-	-	>70	>70	>50
MgO	-	-	-	< 5	-	-
SO ₃	< 3	-	-	< 5	< 5	< 5
Nem	-	-	-	< 3	< 3	< 3
Kızdırma Kaybı	< 5	< 5	< 5	< 10	< 6	< 6
Cl	< 0.1	-	-	-	-	-
Serbest CaO	< 1	-	-	-	-	-
Reaktif SiO ₂	>25	>25	>25	-	-	-
Reaktif CaO	-	< 10	>10	-	-	-

Uçucu külün katkı maddesi olarak kullanılabilmesi için aşağıda belirtilen koşulları sağlaması gerekmektedir:

- TSE'ye göre çimento ve beton üretiminde kullanılacak olan uçucu külün SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ miktarı ağırlıkça yüzdesinin en az %70'ine karşılık gelmelidir.
- Uçucu kül amorf bir yapıya sahip olmalıdır.
- Doğal halinde çok küçük dane çapına sahip olmalı veya öğütülerek en az çimento kadar ince taneli hale getirilmiş olmalıdır.
- Kızdırma kaybı oranı standartlara göre değişmekle birlikte %10'dan fazla olmamalıdır. Esas olarak kızdırma kaybı kömür içinde bulunan yanmamış karbonu ifade etmektedir. Ayrıca bu ifadenin içeriğinde kömürdeki hidratlar ve karbonatların çeşitli reaksiyon sonucu oluşturduğu, serbest haldeki su veya karbon dioksit bileşikleri bulunmaktadır. Yüksek ısıyla bu bileşikler uçucu külün içeriğinden ayrılmakta ve malzemede kütlece azalmaya sebebiyet vermektedir.

Çizelge 2.13. ASTM'ye göre F ve C sınıfı uçucu küllerin ağırlıkça içerdikleri bileşenler

Bileşikler	F Sınıfı		C Sınıfı	
	Düşük F Yapılı	Yüksek F Yapılı	Düşük C Yapılı	Yüksek C Yapılı
SiO_2	46-57	42-54	46-59	25-42
Al_2O_3	18-29	16.5-29	14-22	15-21
Fe_2O_3	6-16	16-24	5-13	5-10
CaO	1.8-5.5	1.3-3.8	8-16	17-32
MgO	0.7-2.1	0.3-1.2	3.2-4.9	4-12.5
K_2O	1.9-2.8	2.1-2.7	0.6-1.1	0.3-1.6
Na_2O	0.2-1.1	0.2-0.9	1.3-4.2	0.8-6
SO_3	0.4-2.9	0.5-1.8	0.4-2.5	0.4-5
Li_2O	0.6-4.8	1.2-5	0.1-2.3	0.1-1
TiO_2	1-2	1-1.5	<1	<1

Yüzeysel zemin stabilizasyon uygulamalarında, çoğunlukla C sınıfı uçucu küller kullanılmaktadır. C ve F sınıfı uçucu kül numunelerine ait görüntüler Şekil 2.20'de görülmektedir.

**Şekil 2.20.** C ve F sınıfı uçucu kül numuneleri (link.springer.com).

C sınıfı uçucu küller içeriğindeki yüksek CaO nedeniyle, puzolanik özelliklerinden yararlanmak amacıyla kullanılır. Bu yapıdaki uçucu küller diğer aktivatörlerin bulunmadığı ya da ihtiyaç duyulmadığı durumlarda kullanışlı olmaktadır. Özellikle geniş alanlarda yapılacak olan zemin stabilizasyonunda oldukça ekonomik sonuçlar vermektedir. Uçucu külün bir atık malzeme olması nedeniyle ekonomik olması ve geoteknik uygulamalarda olumlu sonuçlar vermesi, daha yaygın kullanım alanı bulmasına imkân sağlamıştır. Çeşitli araştırmacılar yaptıkları çalışmalar sonucunda C sınıfı uçucu külün başka bir aktivatöre ihtiyaç duymadan, zemin stabilizasyonunda kullanılabileceğini kanıtlamışlardır. Ayrıca uçucu kül kullanılarak yapılan zemin stabilizasyonunda zeminin mühendislik özelliklerinde iyileşme görüldüğünü belirtmişlerdir (Şenol vd., 2003).

Uçucu külün zemin stabilizasyonunda kullanılması kalitesi, kimyasal yapısı, zeminin özellikleri ve çevreye olan etkisiyle yakından ilişkilidir. Geoteknik uygulamalarda kullanılacak olan uçucu külün, uygunluğunu etkileyen kriterler aşağıda belirtilmiştir:

- Kimyasal yapısı
- İçeriğindeki organik madde miktarı
- Dane boyutu
- Üniformluğu

İçeriğindeki ağır metal seviyesi, kimyasal yapı başlığında değerlendirilecek olsa da tekrar belirtmekte fayda vardır. İçeriğinde ağır metal ve kirleticiler olan uçucu küller zemin stabilizasyonunda kullanılmamalıdır.

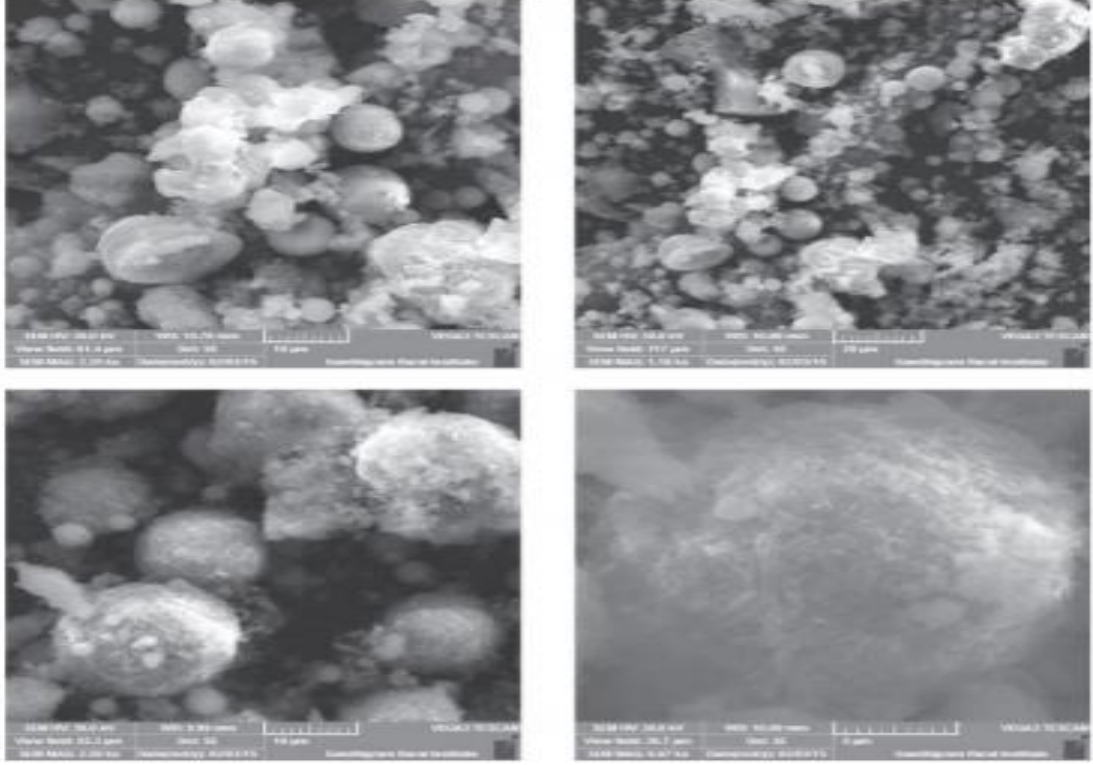
Yukarıdaki uygunluk koşullarına etki eden parametrelerden ilki, uçucu külün içeriğindeki yanmamış kömür parçası miktarıdır. Yanmamış kömür miktarı, kömürün yakıldığı tesise ve ateşleme sistemine bağlı olarak değişmektedir. Bu miktar yüksek olduğunda, içeriğindeki organik bileşik seviyesi artmakta, kimyasal yapı değişmekte ve üniformluk azalmaktadır. Yüzeysel zemin stabilizasyonunda yüksek organik madde miktarı kabul edilebilse de betonda katkı maddesi olarak kullanılması durumunda betonun dayanımına olumsuz etki edeceğinden tercih edilmemektedir.

Uçucu külün dane çapı ya da inceliği kömürün yanma işleminden önce ne kadar parçalanıp, öğütüldüğüne bağlı olarak değişmektedir. İncelik değerini, ASTM 325 nolu elek üzerinde kalan miktarın, numunenin tamamının ağırlığına oranı olarak tanımlamıştır. Bu durumda elek üzerinde kalan miktar, uçucu külün içerisindeki yanmamış kömür parçası miktarıyla doğru orantılı olmaktadır. Dolgu uygulamalarında uçucu külün inceliği çok fazla dikkate alınmasa da betonda katkı maddesi olarak kullanımında ve asfalt kaplama uygulamalarında, uçucu külün dane çapı dağılımı oldukça önemli olmaktadır.

Uçucu külün kimyasal yapısı, elde edildiği kömürün mineral kimyasına, yakma işleminin yapıldığı sisteme ve yanma enerjisini arttırmak için eklenen kimyasallara bağlıdır. Yanma işleminin gerçekleştiği tesisteki baca filtresi de uçucu külün yapısına etki etmektedir. Buna ek olarak bazı termik santrallerin uçucu külün kimyasal bileşenlerini arttırmak için çeşitli kimyasallar kullandığı bilinmektedir. Uçucu külün katkı maddesi olarak kullanılmasında belirleyici olan kriterlerden biri de üniformluktur. Üniformluk katkı

maddesi olarak kullanılacak olan uçucu külün her noktada aynı etkiyi göstermesi açısından önemlidir (Budinski, 2010).

C sınıfı bir uçucu külün elektron mikroskobu altında çekilen görüntülerinde küresel, köşeli ve topak şeklinde yapıya sahip olduğu Şekil 2.21.'de gösterilmektedir.



Şekil 2.21. C sınıfı uçucu külün elektron mikroskobunda görüntüsü (Suresh ve Karthikeyan, 2016).

Yüzeysel zemin stabilizasyonunda uçucu külün kullanımı, çimento ve kireç ile yapılan iyileştirmelere benzer olarak yumuşak zeminlerde gerçekleşmektedir. Uçucu kül, zeminin kimyasal ve mekanik iyileştirme yöntemlerinde kullanılabilen bir katkı maddesidir. Taşıma gücü düşük olan ve şişme riski taşıyan zeminlerde etkili olmaktadır.

Uçucu kül kullanılarak iyileştirme yapılan bir zeminde aşağıda belirtilen faydalar sağlanabilmektedir.

- Zeminin taşıma gücünü artırır.
- Yapılacak olan dolgu ve ek kazı maliyetlerini düşürür.
- Zeminde istenmeyen özellikleri iyileştirerek ve işlenebilirliği arttırarak inşa hızını yükseltir.

- Zemindeki şişme problemini azaltarak, yapı güvenliğini artırır.

Uçucu külün zemin stabilizasyonunda kullanım yöntemi çimento ve kireç ile benzerlik göstermektedir. Öncelikle laboratuvarda zemin ile uçucu külün karışım oranı ve optimum su muhtevası tespit edilmektedir. Sonrasında uygun ekipmanlarla, zemine serme işlemi yapılmaktadır. Bunu takiben zemin ile serilen uçucu kül, önceden belirlenen bir derinlikte karıştırılmakta ve sıkıştırılmaktadır. Zeminin türüne bağlı olarak gerekli durumlarda uçucu küle ek olarak zemine, kireç veya çimento karıştırılarak uygulanabilmektedir.

Uçucu külün zemin stabilizasyonunda kullanılmasına yönelik bir uygulama 2002 senesinde İngiltere’de Harrisburg ile Lancaster arasında PennDOT (Pennsylvania Department of Transportation) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu uygulama esnasında uçucu külün serilmesi Şekil 2.22.’de karıştırılması ise Şekil 2.23.’de gösterilmektedir. Uygulamada zemine yalnızca uçucu kül ilavesi yapılmamış, bir önceki gün kireç karıştırılmıştır. Sonrasında uçucu kül serilmiş ve yaklaşık 30cm derinlikte karıştırılmıştır. Laboratuvar deneylerinde %6 kireç ilaveli zemin, tek eksenli basınç deneyinde yaklaşık 0.96 MPa dayanım göstermiştir. Buna karşın %3 kireç ve %6 uçucu kül ilaveli zemin yaklaşık 2.27 MPa dayanım göstermiştir.



Şekil 2.22. Uçucu külün zemine serilmesi işlemi (Beeghly, 2003).



Şekil 2.23. Uçucu kül ile zeminin karıştırılması işlemi (Beeghly, 2003).

2.3.4. Kullanılmış Atık Lastikler ile Zemin Stabilizasyonu

Atık lastikler, çevresel faktörlere karşı yüksek dayanıma sahip olan doğal veya sentetik kauçuktan imal edilen ürünlerin kullanım ömürlerini tamamlamalarının ardından oluşan, doğada yok olması zor olan malzemelerdir. Doğada ayrışmaları uzun zaman aldığı için atık lastikler önemli bir çevre problemi olarak karşımıza çıkmaktadırlar. Atık lastiklerin bertaraf edilmesinde, yakıt olarak kullanılmaları önde gelmektedir. Ancak yakma işlemi de çevre açısından riskler barındırdığından, yüksek miktarda üretilen atık lastiklerin doğaya zarar vermeden bertaraf edilmesi güncelliğini koruyan bir problemdir.

Kauçuk uzun polimer zincirlerinden meydana gelen ve araç lastiklerinde ham madde olarak kullanılan bir malzemedir. Bu polimer zincirleri ise yüzbinlerce adet monomer olarak tabir edilen, ufak molekülü yapı taşlarının birleşmesiyle meydana gelmektedir. Kauçuğun yapısındaki polimer zincirleri birbirlerinden bağımsız yapıya sahiptir. Bu nedenle aralarındaki bağ kuvvetleri zayıftır. Bu zayıf bağ yapısı da kauçuğun dış etkilere karşı dayanıksız bir malzeme olmasına neden olmaktadır. Bu özelliklerinden dolayı ham kauçuk endüstriyel olarak kullanıma uygun bir malzeme olmamaktadır.

Kauçuğun kullanılabilirliğini arttırmak amacıyla 1832 yılında Alman kimyacı Büdersdorff, sonrasında Geuns ve Nathaniel, tarafından yapılan çalışmalarda, çözelti haline getirilen ve kükürt ile pişirilen ham kauçuğun, çözücünün buharlaşmasından sonra yapışkanlığını kaybettiğini gözlemlemişlerdir. Kauçuğun endüstriyel olarak kullanılması ise 1836 yılında hamur makinelerinin icadı ve 1939 yılında Goodyear tarafından geliştirilen vulkanizasyon işlemi sonucunda mümkün olmuştur. Kükürt katkısı sonrası, ham kauçuktaki polimer zincirleri arasında oluşan bağlara çapraz bağ denilmiştir. Çapraz bağların oluşturulması için uygulanan bu yöntem ise vulkanizasyon olarak adlandırılmıştır.

Vulkanizasyon işlemi, yumuşak haldeki ham kauçuğu sertleştirmek ve mukavemetini arttırmak için gerçekleştirilmektedir. Ham kauçuktaki polimer zincirleri arasında bulunan kimyasal bağları güçlendiren yüksek sıcaklık gerektiren bir işlemdir. Bu işlem sonrasında kauçuk ısıya karşı dayanıklılık kazanır, soğuduğunda parçalanmaz ve ısıtıldığında erimez hale gelir. Vulkanizasyon işlemi esnasında oluşan çapraz bağların yoğunluğu az olduğunda istenen mukavemet değerine ulaşamamakta, yüksek olduğunda ise gevrek bir malzeme meydana gelmektedir. Bu nedenle vulkanizasyon işlemi gerekli özellikleri sağlayacak şekilde yapılmalıdır. Vulkanizasyon işlemi sonucunda oluşan çapraz bağlar kauçuğun kimyasal yapısını değiştirdiği için içeriğindeki polimerler başlangıçtaki yapılarına geri döndürülemez. Yani geri dönüştürülerek tekrar kullanımları söz konusu olmamaktadır. Geri dönüşümü gerçekleştirilemeyen her malzeme er ya da geç çevresel sorunlara neden olduğu için, bertaraf edilmeli veya tekrar kullanmanın yolları aranmalıdır.

Ömrünü tamamlamış lastikler uygun olmayan şekilde depolandığında haşere ve sivri sinekler için bir üreme alanı oluşturmaktadırlar. Bu nedenle sivrisinek ve haşere kaynaklı hastalıklar yayılmaktadır. Ayrıca bu depolama alanlarında çıkacak bir yangının söndürülmesi güç olmakta, ciddi şekilde hava kirliliği oluşturmaktadır. Yine toprak ve su kirliliğine neden olabilmektedir. Tüm bu çevresel etkileri sonucunda, Avrupa Birliği 2003 yılından itibaren ömrünü tamamlamış lastiklerin çöp toplama alanlarında depolanmasını yasaklamıştır. Ülkemizde de 2006 yılı itibariyle Ömrünü Tamamlamış Lastikler Yönetmeliği uygulamaya konulmuştur. Yönetmelik lastik üreticilerini her yıl ürettikleri lastiğin bir kısmını toplayıp bertaraf etmeleri konusunda yükümlü kılmaktadır.

Dünyada her yıl yaklaşık 17 milyon ton kullanılmış atık lastik oluştuğu tahmin edilmektedir. Türkiye’de üretilen atık lastik miktarı ise yıllık 180.000-300.000 ton civarındadır (Eryılmaz ve Demirarslan, 2019). Ülkemizde 2017 yılında oluşan ve toplanması gereken ömrünü tamamlamış atık lastik miktarı 236660 ton, buna rağmen toplanabilen miktar ise 184313 ton olarak gerçekleşmiştir. (LASDER, 2021). Bu miktarın 163000 tonu LASDER tarafından toplanmış, 2018 yılında ise LASDER 178133 ton kullanılmış atık lastik toplamıştır. Toplanan lastiklerin 100000 tonu malzeme geri kazanımında, 16133 tonu pirolitik yağ kazanımında, 62000 tonu ise enerji amaçlı yakıt olarak ekonomiye kazandırılmıştır.

Dünya genelinde, ömrünü tamamlamış atık lastiklerin yeniden ekonomiye kazandırılması için farklı sektörlerde çeşitli çalışmalar yapılmıştır. İnşaat mühendisliği uygulamaları da bu çalışmalar kapsamındadır. Lastiğin sahip olduğu özellikler, inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanımının önünü açmıştır. Bu özellikler aşağıda listelenmiştir (Oikonomou ve Mavridou, 2009).

- Lastik yapısındaki karbon siyahı ve antioksidanlar gibi yüksek dayanıklılığa sahip bileşenler sayesinde aşınmaya, kimyasal ayrışmaya ve güneş ışığına dayanıklıdır.
- Nem emilimine karşı dayanıklı olurken, diğer kimyasal emilimlerine karşıda nispeten dayanıklıdırlar.
- Yüksek hidrolik iletkenliğe sahiptirler.
- Yüksek sıkıştırılabilirliğe sahiptirler. (Titreşimleri sönmüleyecek miktarda.)
- Yüksek akustik yalıtıma sahiptirler.
- Isı geçirgenliği düşüktür ve hafif bir malzemedir. Hafif olması nedeniyle düşük yanal gerilmelere sahiptirler.

Ömrünü tamamlamış lastiklerin bertarafı zor bir atık malzeme olması, yeniden kullanım uygulamalarında ekonomik olmasını sağlamaktadır. Sahip oldukları mühendislik özellikleri ve ekonomik olmaları nedeniyle; beton ve harç üretiminde, asfalt karışımlarında, taşıyıcı olmayan ses yalıtım duvarlarında, hafif dolgularda, istinat duvarı arkası dolgularında, asfalt donma bariyerlerinde, şev stabilizasyonunda, deniz dolgularında, deniz kenarındaki erozyonu önlemede, yapay resif kullanımında, tramvay ray yataklarında, ısı yalıtımında, sismik dalgaları emme amaçlı çalışmalarda ve sınır drenleri uygulamalarında kullanılabilirler.

Kullanılmış atık lastikler inşaat mühendisliği uygulamalarında değişik ebat ve şekillerde değerlendirilmektedir. Lastikler bütün halinde kullanıldığı gibi lastik balyaları şeklinde veya parçalanmış şekilde de kullanılabilir. Lastikler değişik kullanım amaçlarına göre Çizelge 2.14.'de gösterildiği gibi farklı boyutlarda parçalanmaktadır.

Çizelge 2.14. Kullanılmış atık lastiklerin kesim sonrası boyutları

Malzeme Şekli	Büyüklik
İri Parça (Cuts)	>300 mm
Büyük Dilim (Large Shreds)	50-300 mm
Yonga-Şerit Kesim (Chips)	10-50 mm
Talaş (Buffings)	0-40 mm
Granül Kesim	1-10 mm
Toz	<1 mm
İnce Toz	<500 μ m

Bütün halde, bir araya getirilmiş ya da farklı şekillerde ve boyutlarda parçalara ayrılmış, atık lastikler Şekil 2.24.'de gösterilmektedir.



a) Bütün halde kullanılan lastikler
(www.capovelo.com)



b) Balya halinde birleştirilen lastikler
(www.decoval.fr)



c) Lastik yongası-şerit kesim



d) Toz halde kullanılan atık lastikler

Şekil 2.24. Değişik şekil ve boyuttaki Atık Lastikler

Atık lastiklerin beton üretiminde kullanılabilirliğini incelemek amacıyla, çimento bazlı ürünler üzerinde uzun yıllardır araştırmalar yapılmaktadır. Bu araştırmalarda atık lastikler beton ve harçlarda agregaların belirli bir kısmı ile değiştirilmiştir. Sonuç olarak kullanılacak lastik miktarı ve lastiğin şekli gibi etmenlerin seçim sürecinde dikkate alınması koşuluyla, atık lastik parçaları belirli uygulamalarda beton üretiminde kullanılabilir. Atık lastik parçalarıyla üretilen betonun özgül ağırlığı, geleneksel betonla kıyaslandığında, içerdiği atık lastik miktarındaki artışa bağlı olarak düşük olmaktadır. Bu düşüşte atık lastiğin, geleneksel betonda kullanılan agregalardan daha düşük özgül ağırlığa sahip olması etkilidir.

Asfalt üretiminde atık lastiklerin kullanımı; agrega, asfalt ve lastik granüllerinin belli oranlarda kullanılmasıyla mümkün olmaktadır. Atık lastikler asfaltın içeriğindeki bitümün belli bir kısmının yerine kullanılabilirdiği gibi, doğal agregaların yerine de kullanılabilir. Bu işlemler sonucunda meydana gelen atık lastik-asfalt karışımı, kauçuk asfalt olarak tanımlanmıştır. Kauçuk asfalt üretimi iki farklı şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Bunlardan ilki olan ıslak üretim, atık lastik parçalarının sıcak agregayla karıştırılmadan önce yüksek sıcaklıktaki bitüm ile karıştırılmasıyla yapılan üretimdir. İkinci yöntem ise kuru üretim olarak adlandırılan, atık lastik parçalarının bütün ilave edilmeden önce, asfalt karışımındaki agregalarla karıştırılması şeklinde yapılan üretimdir.

Uygun şekilde imal edilen kauçuk asfalt, konvansiyonel asfalta göre daha yüksek kayma direncine, daha az yorulma çatlama, ondülasyonlara karşı yüksek dirence, daha iyi çekme mukavemetine, daha yüksek kaplama ömrüne ve geleneksel karışımlara kıyasla daha düşük bakım masraflarına sahip olabilmektedir (Airey, Collop ve Mujibur, 2004).

Geoteknik uygulamalarda atık lastik parçalarının kullanılması, bütün halde kullanılmalarına göre daha yaygın olarak gerçekleşmektedir. Özellikle ağır malzemelerden oluşan otoyol setlerinin, güzergâh boyunca yumuşak zemin tabakalarının üzerine inşa edilme zorunluluğu olabilmektedir. Bu nedenle zeminde kontrol edilemeyen oturmalar meydana gelebilir ve otoyolda düzensizlikler oluşabilir. Atık lastik katkılı dolgular sayesinde inşa edilecek olan otoyol setinin ağırlığı azaltılabilir. Ayrıca benzer bir yaklaşımla istinat duvarı arkasındaki dolgu malzemeleri de atık lastikle karıştırılarak, toprak basıncının azaltılması ve daha ince bir istinat duvarı inşası sağlanabilmektedir.

Atık lastik parçalarının dolgularda kullanılmasında düşük ağırlıkları, iyi bir şekilde drene olmaları, yüksek kayma mukavemetleri ve düşük ısı iletkenlikleri belirleyici olmaktadır.

2.3.5. Metal Cürufu ile Yüzeysel Zemin Stabilizasyonu

Problemlili zeminlerin yüzeysel stabilizasyonunda kullanılan bir diğeri alternatif malzeme de metal cürufudur. Metal cürufunun oluşumu, saf olmayan metallerin eritilmesi aşamasında yoğunluk farkından dolayı yüzeyde hafif metallerin birikmesi ve bu hafif metallerin uzaklaştırılmasıdır. Uzaklaştırılan bu hafifi metaller, metal cürufu olarak adlandırılmaktadır. Kimyasal yapısının büyük bir kısmını silikatlar, kireç ve alüminyum oksit oluşturur. Yine içeriğinde demir oksit (FeO), magnezyum oksit (MgO), sodyum oksit (Na_2O) vb. bazik oksitler bulunabilmektedir. Saflaştırılacak olan metalden cürufun kolay bir şekilde ayrıştırılması için, metalle cüruf arasında yoğunluk farkının bulunması ve cürufun düşük bir ergime sıcaklığıyla kolay uzaklaştırılabilmesi gibi özellikler aranmaktadır. Esas metalden ayrıştırılan hafif metalin havayla temas ederek oksitlenmesi sonucu oluşan metal cürufuna, metal küfü de denmektedir (Erol ve Şenol, 2008).

Cüruflar pirometalürjik süreçlerde çok büyük miktarlarda üretilirler. Bu nedenle cüruf uygun şekilde geri dönüştürülmediğinde ve yeniden kullanılmadığında büyük bir atık kaynağı olarak karşımıza çıkmaktadır. Artan sanayileşmeyle birlikte metalürjik cürufların düzenli depolanması için daha fazla alan ve harcama gerekmektedir. Metal cürufu ile dolan toplama alanları; hava, su ve toprak kirliliğine neden olmaktadır. Bu durum hem insan sağlığını olumsuz yönde etkilemekte hem de tarımsal üretimi düşürmektedir (Reuter, Xiao ve Boin, 2004). Bu nedenle metal cürufun zemin iyileştirme uygulamalarında kullanılması, hem atığın ekonomik bir şekilde bertaraf edilmesinde hem de çevreye olan zararlarının ortadan kaldırılmasında etkili bir yöntem olmaktadır.

Erol ve Şenol (2008), metal cürufunun yol altı temel malzemesi olarak kullanımı araştırmıştır. Yapılan çalışmada, yol altı temelinin bir kısmı metal cürufuyla, geriye kalan kısmı ise karayolları şartnamesine uygun olarak klasik yöntem ile inşa edilmiştir. Sonuç olarak metal cürufu kullanılan bölümde gerçekleşen oturmanın, standarda uygun şekilde yapılan bölümden daha az olduğu belirtilmiştir. Ayrıca metal cürufunun boşluklu yapısı nedeniyle, oturmalar daha kısa sürede gerçekleşmektedir. Son olarak metal cürufu kullanımıyla daha yüksek dayanımlı ve uzun ömürlü bir yol üst yapısı elde edilmektedir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Malzemeler

Tez kapsamında yüksek plastisiteli kil zemin, kireç, uçucu kül ve atık lastik içerikli kompozit malzemelerin mühendislik özellikleri incelenmiştir. Bu kapsamda ihtiyaç duyulan kil zemin, kireç, uçucu kül ve atık lastiklerin teknik özellikleri bu bölümde verilmiştir. Çalışmaya konu olan deneyler Konya Necmettin Erbakan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümüne ait olan Zemin Mekaniği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

3.1.1. Yüksek Plastisiteli Kil Zemin

Çalışma kapsamında kullanılan kil zemin, Konya ili Meram ilçesi sınırlarında bulunan Kozağaç mahallesindeki bir araziden temin edilmiştir. Zeminin yoğun yağışlı dönemlerde çeşitli problemlere sebep olduğu bildirilmiş, bu amaçla tercih edilmiştir. Deneylerde kullanılmak üzere zemin numuneleri sahada paketlenmiş ve laboratuvara nakledilmiştir. Sonrasında zemin numuneleri 105 °C sıcaklığındaki etüve yerleştirilmiş ve 24 saat boyunca kurumaya bırakılmıştır. Bu işlemin ardından deneylerde kullanılması mümkün olmayan kil zemin numuneleri, öğütme makinesi yardımıyla öğütülmüş ve hava almayacak şekilde paketlenmişlerdir. Şekil 3.1.'de numuneler üzerinde gerçekleştirilen bu işlemler gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Numunelerin kurutulması ve öğütülmesi işlemleri

3.1.2. Kireç

Numunelerin hazırlanmasında kullanılan sönmüş kireç, piyasadan temin edilmiştir. Temin edilen kireç su muhtevasının kontrol edilebilmesi amacıyla hava almayacak şekilde paketlenmiş ve muhafaza edilmiştir. Kirece ait olan kimyasal özellikler yapılan XRF analizi ve firmanın paylaştığı teknik bilgiler kullanılarak elde edilmiştir. Çizelge 3.1’ de kirece ait fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları paylaşılmaktadır.

Çizelge 3.1. Sönmüş Kirecin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Kirecin Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri	Ağırlıkça Yüzde (%)	TS EN 459-1
Kızdırma Kaybı	< 6	<7
Ca(OH) ₂	> 83	-
CaO+MgO	> 90	> 80
MgO	< 3	< 5
Çözünmeyen Madde	< 2.5	-
H ₂ O	< 2	< 2
SO ₃	< 2	< 2
200 μ (Elek Üstü Malzeme)	< 1	< 2
90 μ (Elek Üstü Malzeme)	< 5	< 7
Yoğunluk	2.251	

3.1.2.1. Optimum Kireç Oranı

Kireç katkısı ile yapılan zemin iyileştirme yaygın olarak bilinen ve özellikle karayolu projelerinde kullanılan bir yöntemdir. Ancak değişen zemin numunelerine bağlı olarak iyileştirmede kullanılacak kireç miktarı da değişmekte ve proje bazında değerlendirilmektedir. Projede kullanılacak kireç miktarı ise genellikle araziden alınan zemin numunelerinin, laboratuvar ortamında kireç ile karıştırılması ve uzun süreli kür işlemlerinden sonra dayanımlarının belirlenmesine dayanmaktadır. Genellikle kil zeminlerde %5 ile %10 arasında kireç ilavesi beklentileri karşılamakta ve istenilen dayanıma ulaşmada etkili olmaktadır. Ancak uzun süren laboratuvar testlerinin hem zaman hem de maliyet açısından zorlayıcı olması nedeniyle, optimum kireç oranının daha kolay bir yöntemle bulunması zorunlu hale gelmiştir. Bu amaçla araştırmacılar pH değeri, zeminin plastisite indisi ve optimum kireç oranı arasında bir korelasyon bulmak için çalışmalar yapmışlardır (Eades ve Grim, 1966). Çalışmalarında dört farklı kil zemin kullanmış, bunlardan ikisi düşük diğer iki zemin ise yüksek plastisiteli kil zemin olarak seçilmiştir. Deney numunelerinin hazırlanması için araştırmacılar 20 g kurutulmuş zemin

ve çeşitli oranlarda kireci bir kaba yerleştirmiş, sonrasında karışımın üzerine 100 ml distile su eklenmiş ve karışımları 30 saniye boyunca her 10 dk'da bir çalkalamışlardır. Bu işlemi bir saat boyunca tekrarladıktan sonra 30 ml kadar numuneyi pH ölçümü amacıyla ayırmışlardır. Devamında numuneler üzerinde 30 dk, 1, 2, 4, 6, 12, 24, 48 ve 96. saatte pH ölçümü yaparak not edilmiştir. Plastisite indisi yüksek olan zeminde bu işlem altı ay boyunca, devam eden her ayın sonunda ve son olarak 3 yıl boyunca her senenin sonunda kontrol edilmiştir. Araştırmacılar yaptıkları pH deneylerinde 1 saat gibi kısa bir sürede optimum kireç oranının bulunabileceğini ve alternatif bir yöntem olarak kullanılabileceğini bildirmişlerdir. Kilin artan plastisite indisiyle birlikte, iyileştirme için daha fazla oranda kirece ihtiyaç duyduğu, araştırmanın sonuçlarından birisidir. Bir diğer sonuç zemine artan oranlarda kireç eklenmesinin, karışımın pH değerini bir noktaya kadar arttırdığını, fazladan kireç eklenmesinin pH değerini arttırmada etkisinin olmadığını. Dört farklı kil zeminde de pH değeri en fazla 12.4 değerine ulaşmış, devamında ise kireç eklenmesiyle bu değer aşılamamıştır. Burada belirleyici olan faktörün zeminin içeriğinde bulunan ve kireç ile reaksiyona girebilen iyonlar olduğu bilinmektedir. Yüksek plastisiteli killerin katyon değişim kapasitesinin, düşük plastisitelilere kıyasla daha büyük olması, bu nedenle karışıma kütlece daha fazla oranda kireç eklenerek iyileştirme yapılması şaşırtıcı bir sonuç değildir. Araştırmanın sonucu olarak zeminin pH değerini 12.4 değerine ulaştıran ve karışımın pH değerini bir saatin sonunda 12.4 değerinde tutabilen, en düşük kireç oranının zemin iyileştirmesinde optimum kireç oranı olarak kullanılabileceği bildirilmiştir. Optimum kireç oranının altında kireç ilavesi, zeminin plastisite indisini düşürebilir, ancak zemini plastik olmayan bir malzeme haline getiremez. Plastisite indisindeki bu değişimde optimum kireç oranının bulunmasında araştırmacılar için faydalı olabilmektedir.

Bu metodun kullanıldığı başka bir çalışmada (Sharma ve Swain, 2012), zemine eklenecek optimum miktardaki uçucu kül miktarı, UCS ve CBR testleriyle bulunmuş, karışıma eklenecek olan optimum kireç miktarı ise pH deneyleri sonucunda tespit edilmiştir. Deneyler sonucunda kil zemine %20 oranında uçucu kül ve %8.5 oranında kireç ilave edilmiştir. Çalışmada C tipi uçucu kül ve düşük plastisiteli kil zemin kullanılmıştır. pH değerinin hesaplanması için hazırlanan %20 uçucu kül, zemin ve belirli oranlarda kireç içeren karışımlar deneye tabii tutulmuş, %6 oranında kireç ilavesiyle karışımın pH'ı 12.3 değerine ulaşmış %8 değerinde ise yaklaşık olarak 12.4 olarak ölçülmüştür.

Bu tez kapsamında kullanılan zeminin özellikleri dikkate alındığında ise, plastisite indisinin bahsi geçen çalışmadaki (Eades ve Grim, 1966), Porter Creek kili ile benzer olduğu, bu nedenle %6-%7 civarında kireç ilavesinin iyileştirme için yeterli olduğu kabul edilmiştir. Artan oranlarda kireç eklenmesiyle uzun dönem dayanımda bir miktar artış olabileceği, ancak marjinal fayda bakımından bu durumun göz ardı edilebileceğine karar verilmiştir. Tüm bu bilgiler ışığında, karışımların hazırlanması sürecinde kireç oranı %6 olarak sabit tutulmuştur.

3.1.3. Uçucu Kül

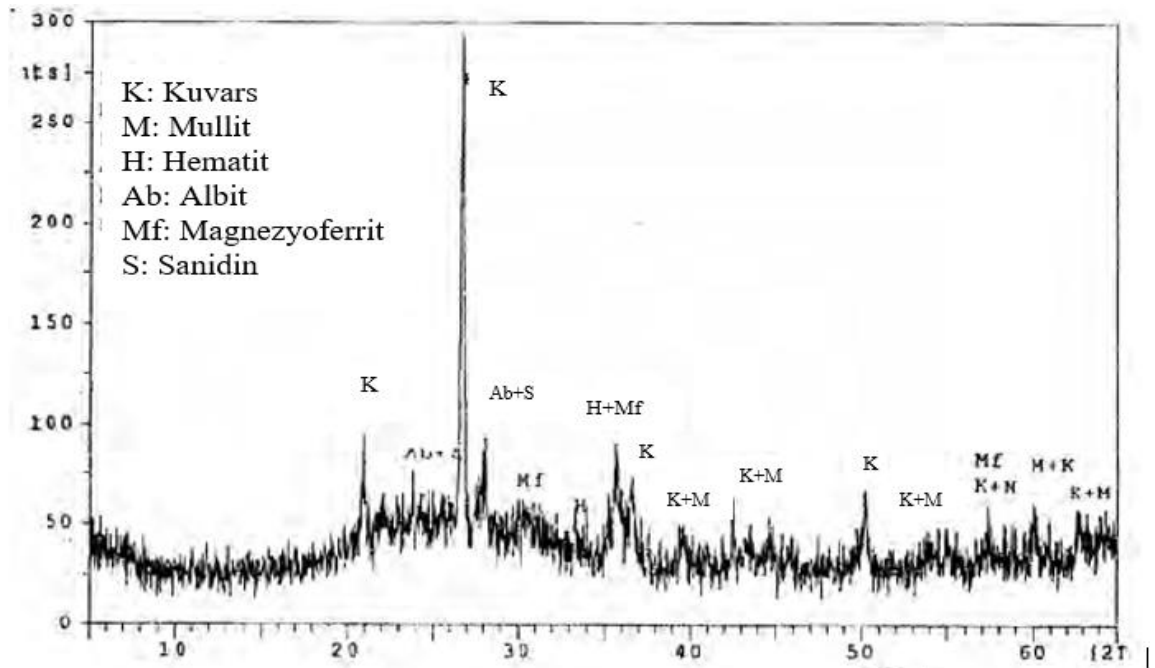
Çalışma kapsamında kullanılan uçucu kül, Seyitömer Termik Santrali'nden temin edilmiş, havayla temas etmeyecek şekilde paketlenmiş sonrasında laboratuvara taşınmıştır. Uçucu küle ait kimyasal ve morfolojik özellikler (TÇMB, 2009) tarafından incelenmiş ve standartlara göre sınıflandırılmıştır. Ayrıca bu tez çalışmasında da temin edilen uçucu külün kimyasal analizleri XRF tekniği kullanılarak yapılmış, sonuçlar Çizelge 3.2.'de karşılaştırmalı olarak paylaşılmıştır.

Çizelge 3.2. Seyitömer uçucu külünün kimyasal yapısı

Kimyasal İçerik	TÇMB (2009)	Tez XRF Analizi	TS EN 450	TS EN 197-1		TS 639	ASTM	
				V	W		F Sınıfı	C Sınıfı
				Ağırlıkça %	Ağırlıkça %		Ağırlıkça %	Ağırlıkça %
(SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃)	84.34	73.3	-	-	-	>70	>70	>50
CaO	4.26	5.18	-	-	-	< 5	< 10	>10
MgO	4.48	3.63	-	-	-	< 5	-	-
SO ₃	0.52	2.07	< 3	-	-	< 5	< 5	< 5
Nem	-	-	-	-	-	< 3	< 3	< 3
Kızdırma Kaybı	3.01	-	< 5	< 5	< 5	< 10	< 6	< 6
CI	0.006	-	< 0.1	-	-	-	-	-
Serbest CaO	0.26	-	< 1	-	-	-	-	-
Reaktif SiO ₂	39.01	-	>25	>25	>25	-	-	-
Reaktif CaO	2.49	-	-	< 10	>10	-	-	-

Seyitömer uçucu külünün standartlara olan uygunluğu incelendiğinde, içeriğinde %70'in üzerinde ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$), yine %5'in altında SO_3 ve %10'dan az CaO bulunmakta, sonuç olarak ASTM C 618'e göre F tipi uçucu külün tüm özelliklerini taşımaktadır. Uçucu kül TS EN 197-1 standardına göre incelendiğinde ise reaktif kireç miktarının %10'dan az olması ve %25'in üzerinde reaktif silis içermesi nedeniyle V tipi uçucu kül sınıfının tüm özelliklerini karşılamaktadır. Uçucu külün içeriğindeki %0.52 SO_3 miktarı, düşük kızdırma kaybı değeri, %0.006 CI ve %0.26 serbest CaO oranları ve son olarak reaktif silis miktarının %25'ten fazla nedeniyle TS EN 450 standardına uygun görünmektedir. Kimyasal analiz sonuçlarına göre Seyitömer uçucu külü tüm standartların gereksinimlerini karşılamaktadır.

Uçucu külün mineralojik analizi, x-ışınları difraktogramı kullanılarak belirlenmiş ve Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Külün mineralojik yapısında, öncelikle göze çarpan yapı camsı faz olmuş, kuvars, mullit, magnezyoferrit, hematit ve az miktarda alkali feldispatlarda içerikte yer almıştır. Grafik incelendiğinde camsı fazın 22-25° 2θ arasında en yüksek değere ulaştığı ve arka planın camsı fazca zengin olduğu söylenebilir. Ayrıca grafikteki pik değerinin, kuvars kristalinin maksimum değerine yakınlığı göz önünde bulundurulursa, camsı fazın silissi yapıda olduğu çıkarımı yapılabilmektedir (Türker vd., 2009)



Şekil 3.2. Seyitömer uçucu külü XRD analizi (Türker vd., 2009)

Morfolojik analizde uçucu külün, 1-30 µm arasında büyüklüğe sahip, büyük çoğunluğu küresel olan taneciklerden ve bazı düzensiz şekilli parçacıklardan oluştuğu tespit edilmiştir. Malzemenin içeriğinde bulunan 10 mikron altı parçacıkların içi dolu camsı küreler halinde olduğu belirtilmiştir. Yapılan mikro analiz sonucunda bazı taneciklerin yüzeyinde magnezyoferrit ve hematit biriktiği, ayrıca malzemenin içinde nadiren rastlanan masif kütle halinde alkali feldispat bileşiği bulunduğu açıklanmıştır (Türker vd., 2009).

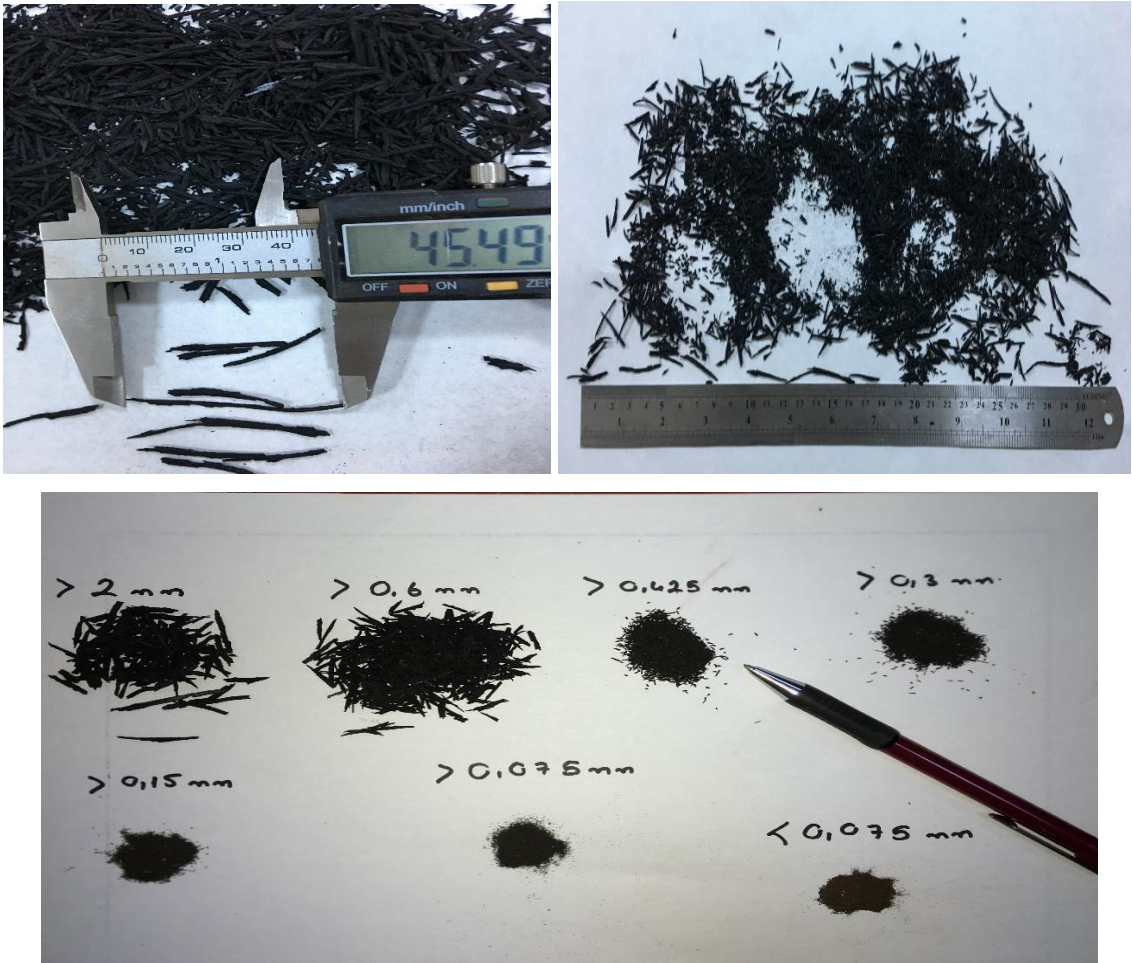
3.1.4. Atık Lastik

Proje kapsamında kullanılan atık lastikler, lastik kaplama atölyelerinden temin edilmiştir. Lastik kaplama işlemi, atık lastiklerin yeniden ekonomiye kazandırılması açısından önemli bir süreçtir. Bu süreçte yüzeyleri tıraşlanarak düzeltilen araç lastikleri üzerine, yüksek sıcaklık ve basınçla yeni bir lastik tabakası eklenmektedir. Eklenen yeni lastik tabakası üzerine görmeye alışkın olduğumuz lastik dişleri açılmakta, bu esnada farklı boyutlardaki lastik parçaları açığa çıkmaktadır. Ağırlıklı olarak lastik lifi şeklinde ortaya çıkan bu atık malzeme tez kapsamında değerlendirilmiştir.

Başlangıçta temin edilen lastik parçalarının bir kısmı, numunelerin hazırlama süreci için fazla büyük gerekçesiyle 2.36 mm elekten elenmiştir. Numune hazırlama süreci için kullanılacak en yüksek lastik boyutu, yapılan ön deneyler ile belirlenmiştir. Bu kapsamda lastik parçaları farklı genişlikteki eleklerden elenmiş, deney numuneleri hazırlanmış ve küre bırakılmıştır. Yapılan gözlemler sonucunda içeriğindeki lastiklerin genişliği 2.36 mm'den büyük olan numuneler kür süresince dağılmış ve yapısal bütünlüğünü koruyamamıştır. Şekil 3.3.'de elenmeden önceki lastik görünümü ve 2 günlük kür süresi sonrası dağılan numuneler gösterilmektedir. Lastik boyutlarının seçiminde, hazırlanan lastik içerikli zemin numunelerinin kalıp ölçüleri, önem arz etmektedir. Tez kapsamında hazırlanan numunelerin çapı 38 ve yüksekliği 76 mm olarak belirlenmiştir. Daha büyük boyutlarda zemin numuneleri hazırlanması durumunda, kullanılacak lastik ölçülerinin de artabileceği öngörülebilir. Bu çalışmada kullanılan atık lastiklerin boyutları ise maksimum 2.36 mm genişlik ve en fazla 45.5 mm uzunluk olacak şekilde tespit edilmiştir. Zemine eklenen farklı boyutlardaki lastikler ve ölçüleri Şekil 3.4.'de verilmiştir.



Şekil 3.3. a) Kür sonrası dağılan numuneler 4.75 ve 2.8 mm lastik içerikli, b) Elenmeden önce lastik içeriği



Şekil 3.4. Numunelerin hazırlanmasında kullanılan atık lastiklerin tane dağılımları ve ölçüleri; a) en yüksek lastik uzunluğu, b) lastik numune karışımı, c) elenen lastik numuneleri

3.2. Yöntem

3.2.1. Zeminin Sınıflandırılması

Tez kapsamında üzerinde çalışılan yüksek plastisiteli kil zeminin dane çapı dağılımının ve kıvam limitlerinin tespit edilebilmesi için zemin üzerinde ıslak elek analizi, hidrometre analizi ve Atterberg sınırlarının belirlenme testleri gerçekleştirilmiştir.

3.2.1.1. Elek Analizi

Proje kapsamında dane çapı dağılımı deneyi için ASTM D422 standardı kullanılmıştır. Standart kapsamında dane çapı dağılımının belirlenmesi için yıkamalı eleme metodu kullanılmaktadır. Bu deney ile zeminin içeriğindeki kum boyutundaki ve daha büyük danelerin dane çapı belirlenebilmektedir. Ayrıca zeminin yapısındaki toplam kil ve silt miktarı da hesaplanabilmektedir. Deney kapsamında kullanılan elekler; 4.75 mm, 2.36 mm, 2.00 mm, 0.6 mm, 0.425 mm, 0.3 mm, 0.15 mm ve son olarak 0.075 mm çapa sahip eleklerdir.

- Deney başlangıcında yarılanma veya çeyrekleme yöntemiyle zemini temsil edecek miktardaki deney numunesi alınmıştır.
- Alınan numune 105°C'lik etüvde 24 saat kurutulmuş ve toplam ağırlık 0.01 g hassasiyetle tartılmıştır.
- Sonrasında numune geniş bir kaba alınmış ve üzerine numuneyi örtecek biçimde su ilave edilmiştir. Kullanılan suyun her bir litresi için suya 2 g sodyum heksametafosfat ilave edilmiştir. Bu sayede birbirine yapışan ince taneli malzemeler birbirinden ayrılması amaçlanmıştır. Karışım 1 saat boyunca aralıklarla karıştırılmış ve deneye hazır hale getirilmiştir.
- Hazırlanan karışım 0.075 mm elek üzerine aktarılmış ve yıkama işlemine başlanmıştır. Elek üzerinde kalan iri danelerin üzerine yapışan ince danelerden temizlenmesi için tel veya sert bir fırça yardımıyla fırçalanmıştır. Bu işleme elekten geçen su tamamen berraklaşınca kadar devam edilmiştir.
- Deneyin devamında 0.075 mm elek üzerinde kalan numune 24 saat etüvde kurutulmuş, sonrasında hassas terazide tartılmış ve elek altına geçen toplam

miktar bu şekilde hesaplanmıştır. Elek üzerinde kalan numune, en büyük göz açıklığına sahip elek en üstte olacak şekilde sıralanmış olan, elek takımının üzerine aktarılmış ve elenmiştir. Son aşamada her elek üzerinde kalan malzeme miktarı tespit edilerek deney bitirilmiştir.

Şekil 3.5'te etüvde kurutulup tartılan zemin numunesinin, ıslak elek analizine tabii tutulma prosedürü gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Islak Elek Analizi: a) 0.075 mm elekten numunenin elenmesi, b) 0.075 mm elek üzerinde kalan malzeme, c) 0.075 mm elek üzerinde kalan numunenin elek takımından elenmesi, d) Elek ve numunelerin etüvde kurutulması

3.2.1.2. Likit Limit Deneyi

Tez kapsamında kohezyonlu zeminin kıvam limitlerinin ve zeminin sınıfının belirlenmesi amacıyla TS 1900-1 standardına uygun olarak likit limit deneyi yapılmıştır. Likit limit deneyi düşen koni yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

- Deney için 400 mikronluk elekten geçen kısımdan 200 g zemin numunesi alınmıştır. Numuneye su ilave edilerek, homojen bir hamur oluşturulana kadar karıştırılmıştır.
- Hazırlanan numune metal deney kabına sıkıca ve içinde hava boşluğu kalmayacak şekilde yerleştirilmiştir. Sonrasında yüzeyi spatula yardımıyla düzeltilerek, penetrometre aletine konulmuştur. Koni düzeltilen zemin yüzeyini hafif şekilde çizecek şekilde, kabın üzerine yerleştirilmiştir.
- Deneyin devamında koni serbest bırakılmış ve 5 sn süreyle koninin zemine batmasına müsaade edilmiştir. Süre sonunda batma miktarı mm cinsinden yazılarak kaydedilmiştir. Okuma sonrasında koni kaldırılarak zeminden 10 g kadar numune alınmış ve su içeriğinin belirlenmesi için etüve konulmuştur.
- Deneye koni temizlendikten ve kurutulduktan sonra devam edilmiştir. Bu aşamada zeminin su içeriği arttırılmış ve deney tekrarlanmıştır. Su içeriğinin ayarlanması sürecinde 15 mm ile 25 mm arasındaki batma değerleri dikkate alınmıştır.
- Deneyde elde edilen su içeriği ve buna karşılık gelen batma miktarları belirlendikten sonra grafik çizilmiştir. Deneyde en az dört farklı su muhtevası ve batma miktarı ölçülmüştür. Grafik üzerinde 20 mm batma değerine karşılık gelen su muhtevası, zeminin likit limitini vermektedir.

Bu deney iki farklı cihaz kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Deneyin doğruluğunun arttırılması amacıyla hem Casagrande hem de düşen koni yöntemi kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.6). Çünkü zeminin değişen su içeriklerine bağlı olarak, farklı davranışlar sergilemesi inşaat projelerinin tasarım parametrelerini etkilemekte, kıvam limitlerinin doğru tespiti ise zeminin göstereceği davranışı anlamada büyük önem arz etmektedir.

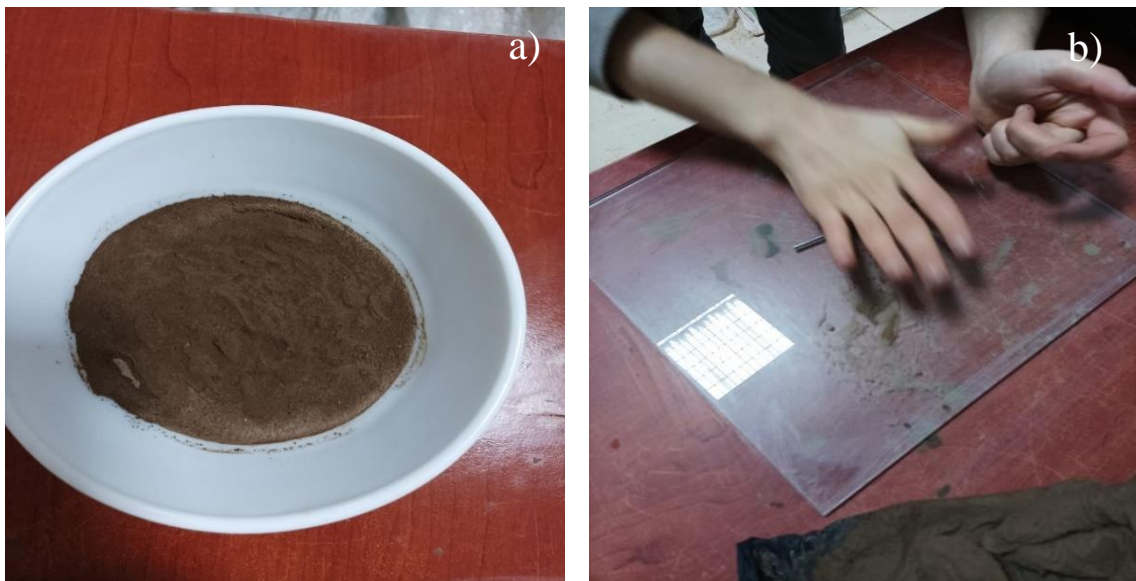


Şekil 3.6. Koni penetrasyon ve Casagrande deneyi: a) Zemin su ilave edilip yoğrulması, b) Zeminin koni penetrasyon kalıbına yerleştirilmesi, c) Koninin zemin üzerine yerleştirilmesi, d) Koni penetrasyon cihazının çalıştırılması, e-f) Casagrande deneyi

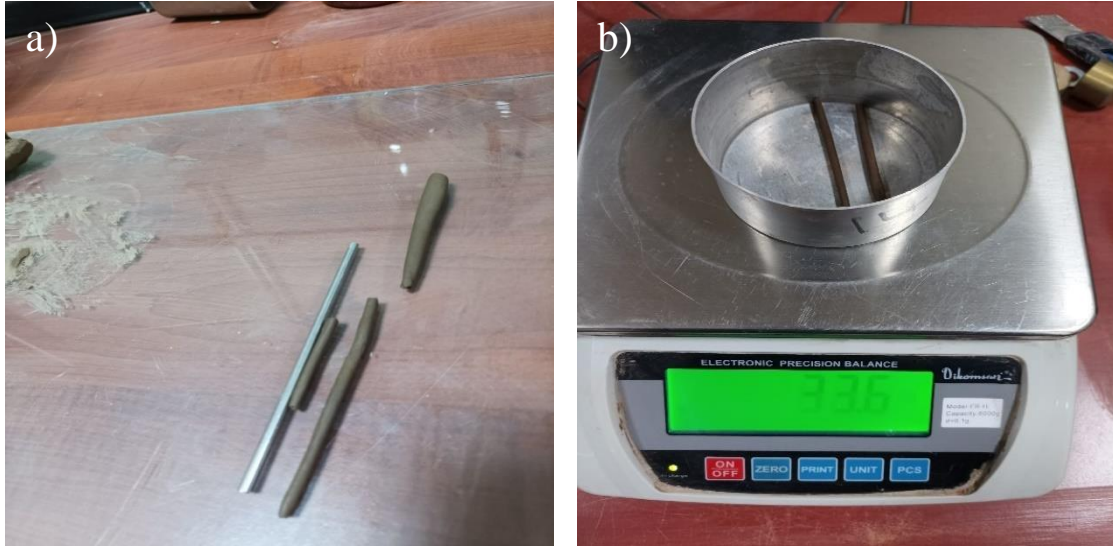
3.1.2.3. Plastik Limit Deneyi

Proje kapsamında zeminin plastisite indisinin ve plastik limit değerinin belirlenmesi amacıyla TS 1900-1 standardına uygun olarak plastik limit deneyi yapılmıştır. Bu deney zeminin plastik kıvamda bulunduğu, en dūřuk su iğeriğinin tespit edilmesiyle ilgilidir.

- Deney başlangıcında 400 mikronluk elek altına geğen malzemeden 20-30 gr civarında alınmıştır. Zemine kūęuk bir top haline alabilecek plastisiteye ulaşıncaya kadar su ilave edilmiştir.
- Sonrasında yuvarlanarak kūre haline getirilen zemin cam bir plaka üzerine yerleştirilmiştir. Zemin numunesi el ayasıyla cam üzerinde yuvarlanarak silindir haline getirilmiştir. Yuvarlanma işleminde oluşturulan silindirlerin çaplarının 3 mm seviyesinde olduğu esnada zeminde çatlak ve kırıklar oluştuğunda istenilen plastisiteye ulaşıldığı anlaşılmıştır. Eęer bu çap değerinde çatlak ve kırıklar oluşmamış ise zemin tekrar yoğurularak kūre haline getirilmiş, aynı işlemler tekrarlanmıştır. Deney esnasında çapın tespiti için 3 mm çapında metal bir çubuk kullanılmıştır.
- İstenilen ap ve plastisite elde edildiğinde silindir hale getirilen zemin numuneleri su muhtevasının tespiti için kaplara aktarılmış ve kurutulmuştur. Sonrasında su içeriği tespit edilmiş ve tespit edilen bu değer zeminin plastik limit değeri olarak belirlenmiştir (şekil 3.7, şekil 3.8).



şekil 3.7. Plastik limit deneyi: a)zemin numunesi, b) numunelerin silindir hale getirilmesi



Şekil 3.8. Plastik limit deneyi: a) Silindir hale getirilmiş numuneler, b) tartım işlemi

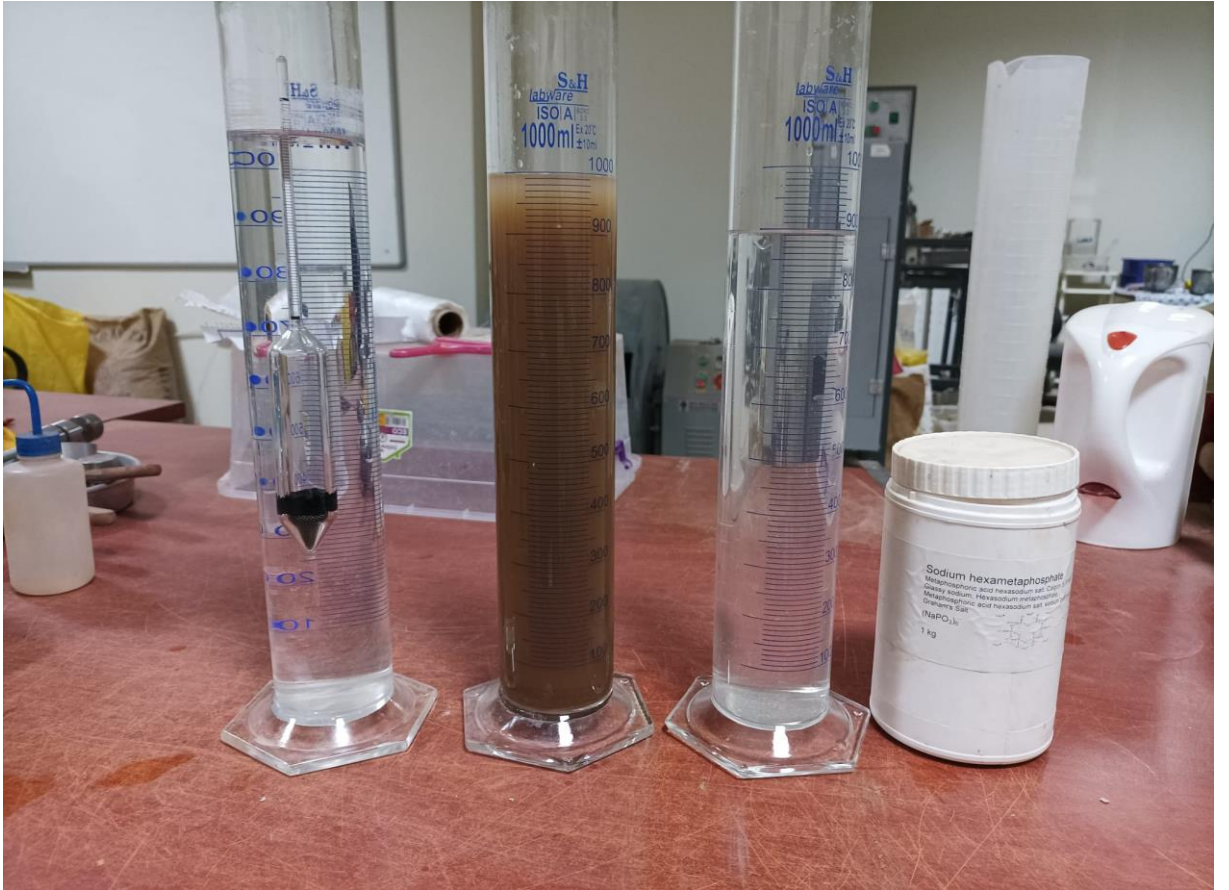
3.1.2.4. Hidrometre Deneyi

Proje kapsamında zemin içeriğinde bulunan kil ve silt boyutundaki malzemelerin dane çapı dağılımının tespitinde ASTM D422 standardına uygun olarak hidrometre deneyi yapılmıştır.

- Deney başlangıcında 0.075 mm çaplı elekten elenen yaklaşık 200 g numune etüve konularak 24 saat boyunca kurutulmuştur. Sonrasında bu numuneden 50 g tartılarak karıştırılmak üzere karıştırma kabına konulmuştur.
- Zemin içeriğindeki danelerin birbirlerine yapışmasını önlemek için 100 ml suya 4 g sodyum heksametafosfat eklenerek dispersiyon çözeltisi hazırlanmıştır. Hazırlanan bu çözeltiliye hazırlanan 50 g numune eklenmiş ve motor hızı 3000 devir/dakika üstünde olan bir karıştırıcı ile yaklaşık 15 dakika karıştırılmıştır.
- Karıştırma işlemi tamamlanan malzeme 1000 mL kapasiteli mezürün içerisine malzeme kaybı olmayacak şekilde aktarılmıştır. Karıştırıcı içerisinde kalan malzemeler pipet yardımıyla temizlenmiş ve mezüre konulmuştur. Mezür içerisindeki süspansiyon 1000 mL'ye tamamlanmış ve sonraki adıma geçilmiştir.
- Bu aşamada öncelikle mezürün ağzı sızdırmaz bir tıpa ile kapatılmış ve süspansiyon homojen bir hale gelinceye kadar karıştırılmıştır. Çalkalama işleminin tamamlanmasının ardından mezür düzgün bir yüzeye yerleştirilerek

kronometre çalıştırılmıştır. Hidrometre hassas bir şekilde süspansiyona daldırılmış ve serbest bir şekilde yüzmeye bırakılmıştır.

- Hidrometre okumalarında 0.5, 1, 2 ve 4. dakikalarda yapılan okumalar hidrometre süspansiyon içerisinden çıkarılmadan yapılmıştır. Sonraki dakikalarda yapılacak olan okumalarda ise hidrometre süspansiyondan çıkarılmış ve suyla yıkandıktan sonra aynı sıcaklıktaki başka bir mezür içinde bekletilmiştir.
- Deneye başlandıktan sonra 8. dakikaya 15 sn kaldığında hidrometre tekrar süspansiyona daldırılmış ve okumalar bu sistematik ile alınmaya devam edilmiştir. Deney süresinde süspansiyon sıcaklığı sürekli olarak okunmuş ve kaydedilmiştir. Gerekli olan düzeltmeler yapılmış ve formüller yardımıyla dane çaplarına karşılık gelen yüzdece geçen oranları hesaplanmıştır (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Hidrometre Deneyi

3.2.2. Özgül Ağırlık Deneyi

Proje kapsamında zemin danelerinin özgül ağırlığının (bağıl yoğunluk) belirlenmesi amacıyla ASTM D854-14 standardına uygun olarak bağıl yoğunluk deneyi yapılmıştır. Deneyin yapılışı aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

- Başlangıçta deneyde kullanılacak olan piknometre etüvde kurutulmuş ve 0.01 g hassasiyetle tartılmıştır. Tartım sonucu kaydedilmiştir. (W1)
- Zeminden 10-20 g miktarda numune alınmış ve etüvde 24 saat kurutulularak deneye hazırlanmıştır. Sonrasında numune piknometreye aktarılmış ve 0.01 g hassasiyetle tartılmıştır. Tartım sonucu kaydedilmiştir. (W2) Piknometre içindeki numuneyi geçecek şekilde su ilave edilmiştir.
- Zemin içerisindeki hava boşluklarından kurtulmak için piknometre vakum pompasına bağlanmış ve boşluk kalmayınca kadar çalkalanarak vakum işlemine tabii tutulmuştur. Bu işlemin ardından piknometrenin boyun kısmındaki işaretli kısma kadar su ilave edilmiştir. Sonrasında piknometre 20 °C sıcaklığındaki su banyosunun içine yerleştirilmiş ve 1 saat bekletilmiştir. Piknometrenin su seviyesinde bir artma veya azalma olmuşsa su seviyesi işaretli seviyeye gelecek şekilde su ekleme ya da çıkartma işlemi uygulanmıştır. Devamında piknometre su banyosuna tekrar yerleştirilmiş ve bu işlemler su seviyesinde bir değişiklik olmayınca kadar devam ettirilmiştir. Son olarak piknometre su banyosundan çıkarılmasının ardından kurulanmış ve 0.01 g hassasiyetle tartılmıştır. Tartım sonucu kaydedilmiştir. (W3)
- Piknometrenin sadece su ile dolu olan okumasının yapılması için temiz piknometreye işaretli seviyesine kadar su doldurulmuştur. Zemin ve su dolu piknometrede yapılan işlemler tekrarlanarak, su seviyesinde bir değişiklik görülmeinceye kadar su banyosu ve su ekleme çıkarma işlemlerine devam edilmiştir. Sabit su seviyesine ulaşıldığında piknometre su banyosundan çıkarılıp kurulanmış ve 0.01 g hassasiyetle tartılmıştır. Tartım sonuçları kaydedilmiştir. (W4)
- Bu deney kapsamında zeminin özgül ağırlığı tespit edilirken, su yerine izopropil alkol kullanılmıştır. Buradaki amaç su ile reaksiyona girerek şişen zeminin özgül ağırlığını, zemin daneleriyle reaksiyon vermeyen alkolü kullanarak

düzgün şekilde hesaplayabilmektedir. Deneyin tüm aşamaları tamamlandıktan sonra özgül ağırlık değeri (G_s) 3.1 formülü yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$G_s = \frac{\gamma_L(W_2 - W_1)}{\gamma_w[(W_4 - W_1) - (W_3 - W_2)]} \quad (3.1)$$

Burada;

γ_L : Deneyde kullanılan deney sıvısının ölçülen deney sıcaklığındaki yoğunluğu (g/cm^3),

γ_w : Belirlenen sıcaklıkta suyun yoğunluğu (g/cm^3),

W_1 : Piknometrenin ağırlığı (g),

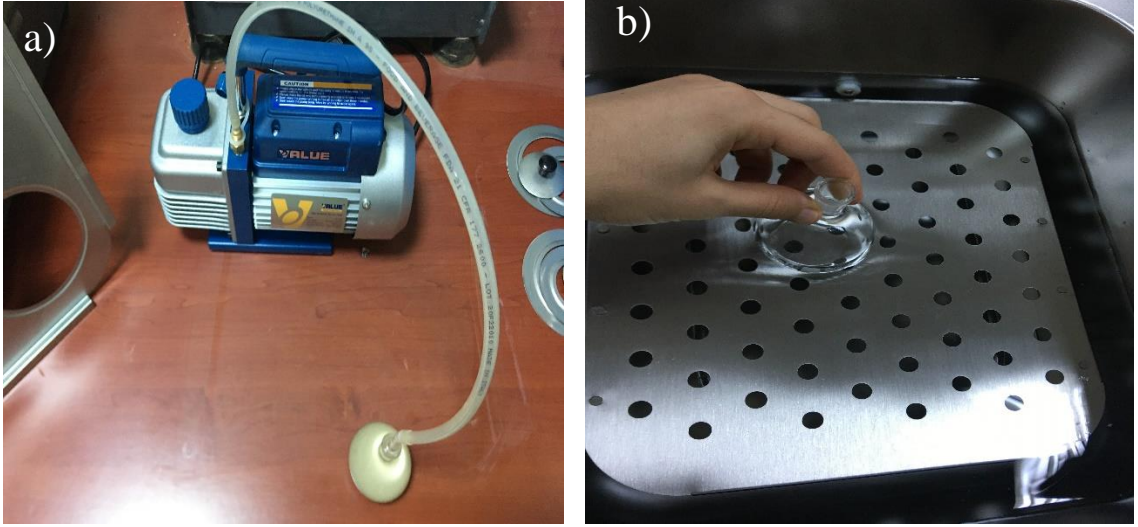
W_2 : Piknometre + zemin numunesinin ağırlığı (g),

W_3 : Piknometre + zemin numunesi+ su ağırlığı (g),

W_4 : Piknometre + su ağırlığıdır (g).



Şekil 3.10. Özgül ağırlık deneyi: a) Deney ekipmanları, b) Tartım işlemi, c) Piknometreye su eklenmesi



Şekil 3.11. Özgül ağırlık deneyi: a) vakumlama işlemi, b) su banyosu

3.2.3. Kompaksiyon (Proctor) Deneyi

Proje kapsamında oluşturulacak olan kompozit zeminlerin en yüksek kuru birim hacim ağırlığına ulaşacak biçimde hazırlanması amacıyla, ASTM D698 standardına uygun olarak kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Zeminlerin taşıma gücünü arttırmak, sabit, hareketli ve dinamik yükler altında zeminde meydana gelecek oturmaları azaltmak ve zeminin geçirimsizliğini azaltarak zeminlerin daha fazla su alıp hacimsel değişikliklerin oluşmasını önlemek amacıyla, zeminlerin tabakalar halinde serilerek mekanik araçlar vasıtasıyla su ve dane hacmi sabitken havanın dışarı atılıp zemin tanelerinin sıkıştırılması işlemine kompaksiyon denilmektedir. Kompaksiyon sonucunda kuru birim hacim ağırlık ne kadar büyük bir değere ulaşırsa zemin o kadar iyi sıkıştırılmıştır. Bu deneyde 305 mm yükseklikten serbest düşen 2,5 kg ağırlığındaki tokmağın sağladığı mekanik iş (standart enerji) kullanılmaktadır. Deneyin nasıl uygulandığı aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır.

- Deney başlangıcında zeminin dane çapı dağılımının belirlenmesi amacıyla 4.75 mm, 9.5 mm ve 20 mm göz açıklığına sahip elekler üzerinde kalan malzeme yüzdeleri belirlenmiştir. 4.75 mm elek üzerinde kalan malzeme oranı %20 ya da daha az olarak bulunmuş, sıkıştırma işlemi üç tabaka halinde standart Proctor kalıbı içerisinde gerçekleştirilmiş, her tabakaya standart Proctor tokmağı kullanılarak 25 vuruş yapılmıştır.
- Açık havada kurutulan ve elekten geçirilen zeminden 5 kg'lık bir numune deney için alınmıştır. Proctor kalıbı taban plakası takılmış olarak 0.01 g

hassasiyetle tartılmıştır. Tartım sonucu not edilmiştir. Sonrasında zemine kohezyonlu olduğu bilindiği için başlangıç olarak %12 ile %15 arasında değişen su zemine ilave edilip, karıştırılmıştır.

- Proctor kalıbı sert ve düzgün bir yüzey üzerine yerleştirilmiş, su ile karıştırılıp homojen bir şekilde karıştırılan zemin üç tabaka halinde kalıbın içine yerleştirilmiş, her tabaka tokmak yardımıyla 25 vuruş yapılarak sıkıştırılmıştır. Tokmak düşüşleri tabakanın her bölgesine eşit şekilde dağıtılarak yapılmıştır.
- Sıkıştırma esnasında eklenecek olan zemin miktarı dikkatli bir şekilde ayarlanmıştır. Zemin kalıbı dolduracak, kalıp yakası çıkarıldığında ise en fazla 6 mm yüksekliğe sahip olacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu fazla kısım yaka çıkarıldıktan sonra kalıp seviyesinde tıraşlanmış ve zemin düzeltilmiştir. Son olarak sıkıştırılan zemin ve kalıp tartılmış, tartım sonuçları hesaplamalar için kayıt altına alınmıştır.
- Sıkıştırılan zemin hidrolik kriko yardımıyla kalıptan çıkarılmış, sonrasında zeminin tümünü yansıtan bir miktarda zeminin alt ve üst kısmından numune alınmış, alınan numunenin su içeriği bulunmuştur. Kalan zemin tekrar ufalanmış, 4.75 mm elekten geçirilmiş ve deney başlangıcındaki numuneye eklenmiştir. Deneyin devamında zemine %2-%3 oranında su eklenmiş ve yukarıda tarif edilen işlemler tekrarlanmıştır. Tekrar sayısı en az beş değer elde edilecek şekilde yapılmış, kullanılan su içerikleri optimum su muhtevası ve en büyük kuru birim hacim ağırlık değerlerini içine alacak şekilde yapılmıştır.
- Elde edilen su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık değerleri grafik üzerinde gösterilmiş, en yüksek kuru birim hacim ağırlığa karşılık gelen su içeriği belirlenmiştir. Optimum su muhtevası değerleri her bir kompozit zemin için bulunmuş, numuneler bulunan içeriklere göre hazırlanmıştır. Çizelge 3.3'de sıkıştırma deneyinde kullanılacak kalıp ve eleklerin tercih şartları açıklanmıştır. Bu kapsamda zeminin büyük çoğunluğu 4.75 mm elekten geçtiğinden, standart Proctor kalıbı kullanılmış, zemin üç tabaka halinde 25 vuruş yapılarak sıkıştırılmıştır.

Çizelge 3.3 Kompaksiyon deneyi kapsamında kalıp ve elek seçimi

Kullanılma şartları	Kullanılacak zemin	Proctor kalıbı boyutları	Tabaka sayısı	Tabakalara yapılacak vuruş sayısı
Zeminin %20'si ya da daha az malzeme 4.75 mm'lik elek üzerinde kalmalı	4.75 mm elekten elenen malzeme kullanılmalı	Çap: 105 mm Boy: 115.5 mm	Üç	25
Zeminin %20'si ya da daha fazla malzeme 4.75 mm'lik elek üzerinde kalmalı, ayrıca %20 ve daha az malzeme 9.5 mm'lik elek üzerinde kalmalı	9.5 mm elekten elenen malzeme kullanılmalı	Çap: 105 mm Boy: 115.5 mm	Üç	25
Zeminin %20'si ya da daha fazla malzeme 9.5 mm'lik elek üzerinde kalmalı, ayrıca %20 ve daha az malzeme 20 mm'lik elek üzerinde kalmalı	20 mm elekten geçen malzeme kullanılmalı	Çap: 152.4 mm Boy: 115.5 mm	Üç	56

Proctor deneyinde zeminin kalıba tabakalar halinde yerleştirilmesi, tartılması, su muhtevasının tespiti için numune alınması işlemleri Şekil 3.12'da gösterilmektedir.



Şekil 3.12. Proctor deneyi: a) Proctor kalıbının tartılması, b) sıkıştırma işlemi, c) sıkıştırılan zeminin tartılması, d) sıkıştırılan zeminden örnek alınması ve tartılması

3.2.4. Şişme Potansiyeli Deneyi

Konsolidasyon deneyinin yapılması, zeminin şişme basıncı ve potansiyelinin bulunması amacıyla ASTM 4546'ya göre üç farklı yöntemin olduğu 2. Bölümde ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Kısaca açıklamak gerekirse bu standartta belirtilen A yöntemiyle örselenmiş zeminin, şişme basıncı ve serbest şişme potansiyeli tespit edilebilmektedir. A yöntemi sıkıştırılmış dolguların sahadaki koşullarını, simüle etmekte kullanılan bir yöntemdir. B yönteminde ise doğal halde bulunan zeminlerden ya da hali hazırda sıkıştırılmış dolgulardan, sahada bulunduğu şekilde örselenmemiş zemin numuneleri alınarak deney gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemle de şişme basıncı ve serbest şişme yüzdesinin bulunması mümkün olmaktadır. C yönteminde ilk yöntemle benzer olarak, örselenmiş ve örselenmemiş zemin numuneleri kullanılabilir. Yöntem yeni imal edilen dolgularda ve zemin üzerinde ek yapı yükleri oluştuğunda ya da her ikisinin birlikte bulunduğu koşullarda kullanılabilir. Bu yöntem zeminin önceden ıslanma kaynaklı olarak oturma ya da şişme gösterdiği durumları simüle etmek için daha uygundur.

Tez kapsamında hazırlanan kompozit numuneler, maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası içeriğine göre kompaksiyon deneyi sonucunda hazırlanmıştır. Buradaki başlıca amaç zemindeki oturmaları azaltmak ve en yüksek dayanıma ulaşmaktır. Tezin içeriğindeki katkı maddelerinin zemine farklı oranlarda eklenmesinin, zeminin şişme potansiyeli üzerindeki etkilerini bulmak, zeminin davranışını anlamada önemli olmaktadır. Sahada yapılacak olan zemin stabilizasyonunu ve etkilerini simüle etmesi amacıyla A yöntemi kullanılarak karışımların şişme potansiyelleri tespit edilmiştir. Bu süreçte konsolidasyon deneyinin uygulama adımları aşağıda açıklanmıştır.

- Optimum su muhtevasında standart Proctor ile sıkıştırılan karışımlar, kompaksiyon deney halkasına yerleştirilmiştir. Bu süreçte sıkıştırılan zemin ile deney halkası arasında yanal boşluk kalmamasına dikkat edilmiştir. Numunenin serbest kısımları yani üst ve alt kısmı tıraşlanarak düzeltilmiştir.
- Yerleştirme ve tıraşlama işleminden sonra zeminin yüksekliği (H_0) ölçülmüş, kalıp ile numunenin ağırlığı tartılmıştır.

- Numunenin alt kısmına filtre kağıdı, onunda altına poroz taşı konulmuştur. Kalıbın üst kısmına filtre kağıdı yerleştirildikten sonra, numune konsolidasyon aletine bağlanmıştır.
- Deney tarifinde numunenin üzerinde 1 kPa'lık basınç olması gerektiği belirtilmiştir. Bu basınç kalıbın üzerine konulan ve yükün zemin yüzeyine üniform şekilde dağıtılmasını sağlayan metal parça ile sağlanmıştır.
- Konsolidasyon aleti ayarlandıktan ve komparatör sıfırlandıktan sonra, zeminin üzerini örtecek miktarda su sisteme ilave edilmiştir.
- Şişme değerleri 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2, 5, 10, 30, 60, 120, 240, 480, 1440, 2880, dakikalarda kontrol edilmiş ve not edilmiştir.
- Şişme okumalarına iki ölçüm arasındaki fark ihmal edecek kadar az olduğunda ya da tamamen bitinceye kadar devam edilir. Deney sonunda yapılan son okuma değeri ΔH 'dir.
- Serbest şişme yüzdesi (şişme potansiyeli değeri) formül 3.2 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\frac{\Delta H}{H_0} \times 100 = \left(\frac{e - e_0}{1 + e_0} \right) \times 100 = \left(\frac{\gamma_{kuru-0}}{\gamma_{kuru}} \right) \times 100 \quad (3.2)$$

Burada;

H_0 : Numunenin deney öncesi yüksekliği

ΔH : Son okunan şişme ya da oturma miktarı

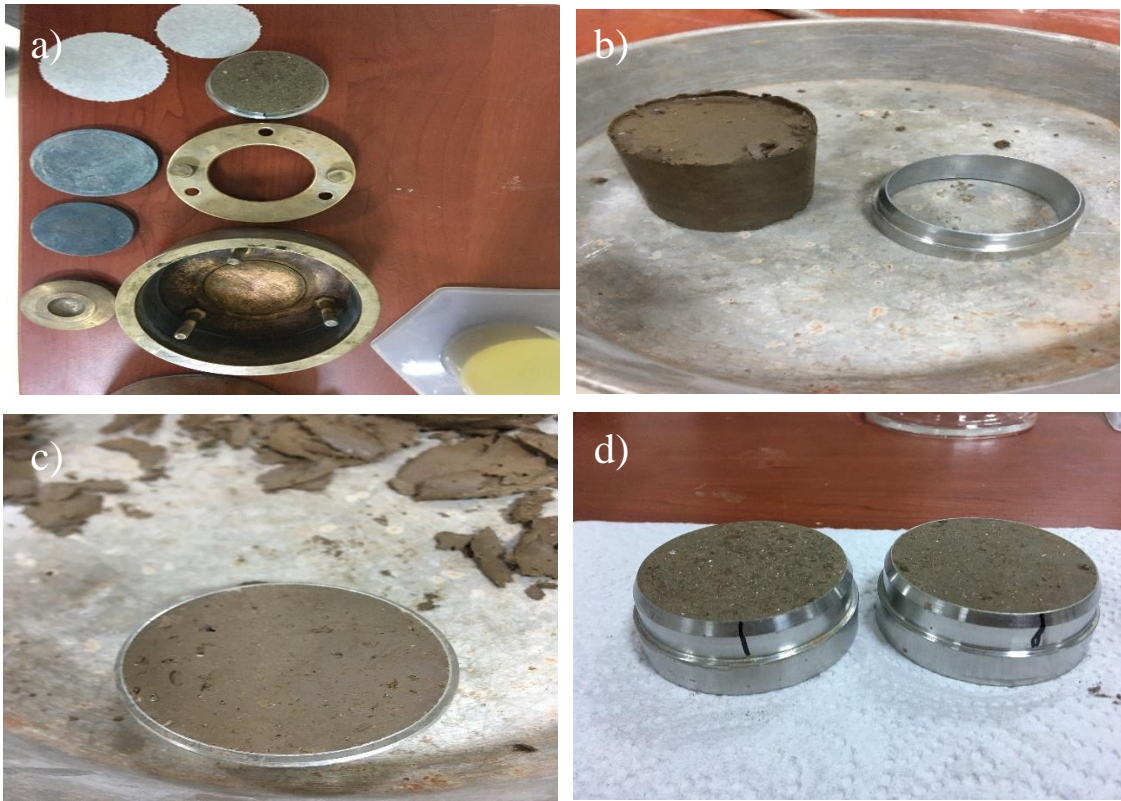
e : Deney sonundaki boşluk oranı

e_0 : Deney öncesi boşluk oranı

γ_{kuru} : Deney sonundaki kuru birim hacim ağırlık

γ_{kuru-0} : Deney öncesi kuru birim hacim ağırlık

Şişme potansiyeli deneyinin işlem adımları ve kullanılan malzemeler Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'de gösterilmektedir.



Şekil 3.13. Kompaksiyon deneyi: a) deney ekipmanları, b) sıkıştırılan zemin, c) kalıba yerleştirme işlemi, d) numunelerin yüksekliklerinin ölçülmesi



Şekil 3.14. Kompaksiyon deneyi: a) numunenin kompaksiyon aletine yerleştirilmesi, b) su ile örtülmesi, c) şişmenin ölçülmesi, d) şişme görüntüsü

3.2.5. Numunelerin Hazırlanması ve Adlandırılması

Tez kapsamında zemine eklenecek katkı maddelerinin oranları, yapılan ön deneyler ve süreç boyunca alınan sonuçlara bağlı olarak sürekli güncellenmiştir. Bu sayede karışımlara eklenecek katkı maddelerinin en yüksek ve en düşük oranları belirlenmiş, ayrıca marjinal faydanın en yüksek olduğu kompozit malzeme bulunmaya çalışılmıştır. Optimum kireç oranı tahmin edildikten sonra, kireç oranı sabit tutulmuş ve diğer katkı maddeleri değişen oranlarda karışıma eklenmiştir. Karışımda artan uçucu kül miktarına bağlı olarak, dayanımın belli bir noktaya kadar arttığı bilindiğinden eklenebilecek en yüksek uçucu kül oranı bulunmaya çalışılmıştır. Benzer şekilde zemine eklenebilecek en yüksek atık lastik içeriğinin bulunması amacıyla ön testler gerçekleştirilmiştir. Atık lastiklerin hem boyutsal hem de içerik olarak kullanım üst sınırları tespit edilmiştir. Plastik malzemeler olmayan uçucu kül ve atık lastiğin zemine eklenmesi, zeminin kendi bütünlüğünü korumasını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle yapılan ön deneyler sırasında zemine kireç, uçucu kül ve değişen oranlarda atık lastik eklenmiştir. Kompaksiyon deneyi sonucunda optimum su muhtevaları tespit edilen karışımlar, belirlenen su muhtevalarında hazırlanmış ve sıkıştırılmıştır. Başlangıçta ağırlıkça %3 oranında atık lastik karışıma eklenmiş, kalıptan çıkarılarak kür işlemine başlanmıştır. Kür süresinin 2. gününde yapılan gözlemlerde zeminin parçalandığı ve yapısal bütünlüğünü kaybettiği ortaya çıkmıştır. Bu olaya neden olarak lastiğin yüksek elastisiteye sahip bir malzeme olması ve yüksek oranlarda zemine eklenerek sıkıştırılması sonrasında başlangıç boyutlarına dönme istediği gösterilebilir. Zeminin kendini tutabileceği en yüksek lastik içeriğinin bulunması için karışıma bu sefer %2 oranında lastik eklenmiş, sıkıştırılmış ve küre bırakılmıştır. Benzer sonuçlar elde edilince lastik oranı %1.5'a düşürülmüş, aynı işlemler tekrarlanmıştır. Kür süresi boyunca gözlemlenen numuneler yapısal bütünlüklerini korumuştur. Bu nedenle zemine eklenecek en yüksek lastik oranı %1.5 ile sınırlandırılmıştır.

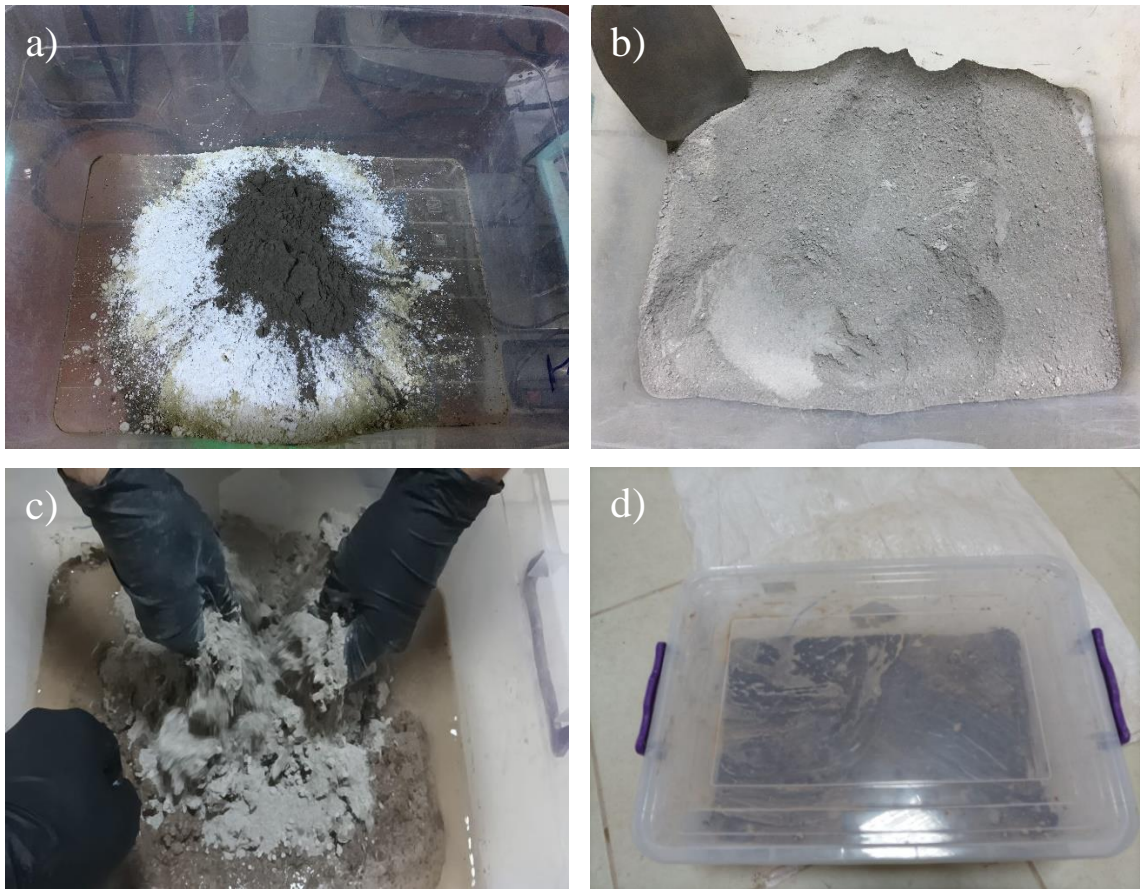
Zemine eklenen kireç, uçucu kül ve atık lastiklerin farklı oranlardaki kombinasyonları kullanılarak kompozit malzemeler hazırlanmıştır. Karışımlar içeriğindeki malzemeler ağırlıkça yüzdelere göre isimlendirilmiştir. Kompozitlerin içeriğindeki malzemelerin kısaltmaları ise doğal zemin için (S), kireç içeriği için L (Lime), uçucu kül için FA (Fly Ash) ve son olarak atık lastik için RP (Rubber Pieces) olarak belirlenmiştir. Kireç %6 oranında, uçucu kül %3, %6, %9, %12, %15, %18 ve atık lastik %0.5, %1, %1.5 oranında

seçilmiştir. Çizelge 3.4'te karışımların isimlendirilmesi ve ağırlıkça yüzde oranları gösterilmektedir. Karışımın içeriğindeki malzemeler harflerle temsil edilmiş, yüzdece oranları ise altlarındaki sayılar ile açıklanmıştır.

Çizelge 3.4. Hazırlanan karışımlar ve oranları

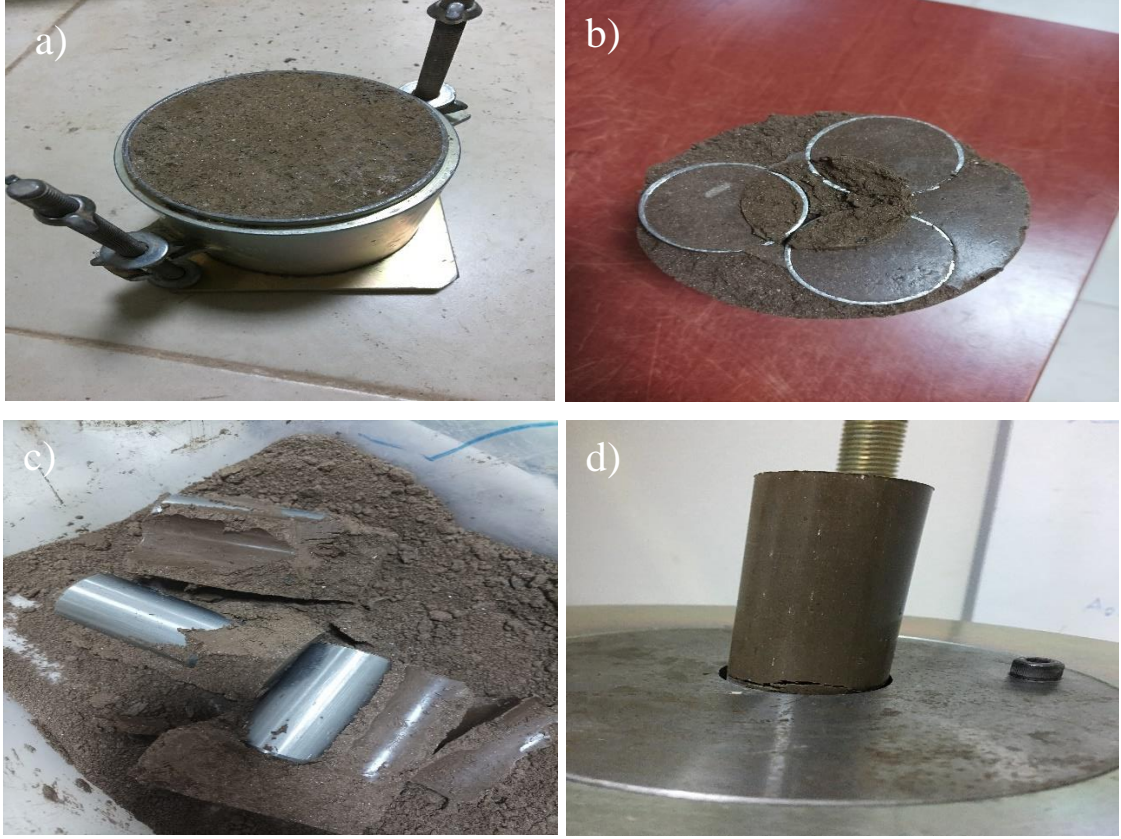
Karışım İsimlendirmesi	Yüksek	Katkı Malzemeleri (%)			
		Kireç	Uçucu Kül	Atık Lastik	Toplam
Zemin (Soil) S,	Plastisiteli				
Kireç (Lime) L,	Kil Zemin				
Uçucu Kül (Fly Ash) FA,	(%)				
Atık Lastik (Rubber Pieces) RP					
$S_{100}L_0FA_0RP_0$	100	0	0	0	100
$S_{94}L_6FA_0RP_0$	94	6	0	0	100
$S_{91}L_6FA_3RP_0$	91	6	3	0	100
$S_{90.5}L_6FA_3RP_{0.5}$	90.5	6	3	0.5	100
$S_{90}L_6FA_3RP_1$	90	6	3	1	100
$S_{89.5}L_6FA_3RP_{1.5}$	89.5	6	3	1.5	100
$S_{88}L_6FA_6RP_0$	88	6	6	0	100
$S_{87.5}L_6FA_6RP_{0.5}$	87.5	6	6	0.5	100
$S_{87}L_6FA_6RP_1$	87	6	6	1	100
$S_{86.5}L_6FA_6RP_{1.5}$	86.5	6	6	1.5	100
$S_{85}L_6FA_9RP_0$	85	6	9	0	100
$S_{84.5}L_6FA_9RP_{0.5}$	84.5	6	9	0.5	100
$S_{84}L_6FA_9RP_1$	84	6	9	1	100
$S_{83.5}L_6FA_9RP_{1.5}$	83.5	6	9	1.5	100
$S_{82}L_6FA_{12}RP_0$	82	6	12	0	100
$S_{81.5}L_6FA_{12}RP_{0.5}$	81.5	6	12	0.5	100
$S_{81}L_6FA_{12}RP_1$	81	6	12	1	100
$S_{80.5}L_6FA_{12}RP_{1.5}$	80.5	6	12	1.5	100
$S_{79}L_6FA_{15}RP_0$	79	6	15	0	100
$S_{78.5}L_6FA_{15}RP_{0.5}$	78.5	6	15	0.5	100
$S_{78}L_6FA_{15}RP_1$	78	6	15	1	100
$S_{77.5}L_6FA_{15}RP_{1.5}$	77.5	6	15	1.5	100
$S_{76}L_6FA_{18}RP_0$	76	6	18	0	100

Numuneler hazırlanırken tüm malzemeler kuru şekilde karışıma eklenmiş ve homojen bir hale gelinceye kadar karıştırılmıştır. Sonrasında belirlenen optimum su muhtevası miktarınca su karışıma ilave edilmiş, pürüzsüz bir karışım elde edilinceye kadar karıştırılmış, bunun ardından yaklaşık 15 dk hava almayacak şekilde bir kutuda bekletilmiş ve son olarak tekrar karıştırılmıştır. Burada amaç karışımın içeriğinde malzemelerin tamamının suyla temasının sağlanması ve reaksiyonların düzgün şekilde gerçekleşmesidir. Aksi takdirde hazırlanan karışımlarda istenmeyen düzensizlikler oluşacak ve dayanımı etkileyecektir. Bu işlem adımları Şekil 3.15'te gösterilmektedir.



Şekil 3.15. Numunelerin hazırlanması: a) zemin ve katkı maddeleri, b) karıştırma işlemi, c) suyun ilave edilmesi, d) karışımın dinlendirilme süreci

Malzemeler karıştırıldıktan sonra, standart Proctor aleti kullanılarak sıkıştırılmıştır. Bu işlemin ardından 38 mm çapında ve 76 mm yüksekliğindeki kalıplar kriko yardımıyla sıkıştırılan zemine penetre ettirilmiştir. Standart bir Proctor kalıbından üç adet numune elde edilebilmektedir. Kalıplar yardımıyla sıkıştırılan zeminden numune alınması işlemi Şekil 3.16'te gösterilmektedir.



Şekil 3.16. Karışımların hazırlanması: a) Proctor ile sıkıştırılan numune, b) zemine penetre ettirilen tüpler, c) tüplerin zeminden ayrılması, d) serbest basınç için hazırlanan numune

Numunelerin hazırlanması sürecinde oluşabilecek hataları minimize etmek amacıyla, her karışım ve farklı kür süreleri için 3'er adet numune hazırlanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda numunelerin temas yüzeylerindeki küçük düzensizliklerin bile dayanıma etki ettiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle numuneler kalıptan çıkarılırken bozulma yaşanmaması için özen gösterilmiş, gerekli durumlarda yüzeyler kürden önce düzeltilmiştir. Bir karışımın farklı kür süreleri için numune hazırlanırken, bu işlemin eş zamanlı olarak yapılmasına özellikle dikkat edilmiştir. Bu sayede deneyler esnasında oluşabilecek hatalar ve numunelerdeki düzensizlikler kontrol altında tutulmuştur. Her karışım için 2, 7, 28 ve 56 gün kür süresi için 12 adet numune hazırlanmış, numuneler kalıptan çıkarılır çıkarılmaz hava almayacak şekilde muhafaza edilmiş ve kür işlemine başlanmıştır. Bu sayede numuneler üzerindeki kısa ve uzun dönem kürün etkileri ve mühendislik özelliklerindeki değişimler gözlemlenmiştir. Hazırlanan ve küre bırakılan numuneler Şekil 3.17'da görülebilmektedir.



Şekil 3.17. Serbest basınç deneyi numuneleri: a) numunelerin ölçülmesi, b) numunelerin küre bırakılması, c) kür sonrası numuneler

3.2.6. Serbest Basınç Deneyi

Proje kapsamında zemine eklenen katkı maddelerinin zeminin mukavemeti üzerindeki etkilerinin incelenmesi amacıyla ASTM D 2166 standardına uygun olarak 2, 7, 28 ve 56 günlük numuneler üzerinde serbest basınç deneyi yapılmıştır. Serbest basınç deneyinde özdeş üç numunenin deney sonuçları kıyaslanmış, sonuçların tutarlılığı kendi içinde değerlendirilmiştir. Üç numunenin de yakın değerler vermesi en optimum durumu ifade etmekte, iki numunenin yakın sonuçlar vermesine karşın diğer numunenin düşük dayanım göstermesi ise imalat hatası olarak kabul edilmektedir. Serbest basınç deneyinin uygulama adımları aşağıda açıklanmıştır.

- Dene başlangıcında hazırlanan numuneleri çapları ve yükseklikleri kumpas yardımıyla ölçülmüş ve ağırlıkları 0.01 g hassasiyetle tartılmıştır.
- Sonrasında numune presin alt platformuna yerleştirilmiş, üst başlık ile numunenin tepesi temas edinceye kadar numune kaldırılmış ve cihazın okuma saati sıfırlanmıştır.
- Yükleme işlemi dakikada 1 mm kısalma oluşturacak şekilde yapılmış, kuvvet ve boy değiştirme okumaları deney boyunca kaydedilmiştir. Deneye numunede göçme yaşanıncaya kadar, göçmenin gözlenmediği herhangi bir tepe değeri okuması yapılamayan yumuşak zeminlerde ise %20 birim boy kısalması oluşuncaya kadar devam edilmiştir.
- Göçme anında ölçülen en büyük basınç değeri, serbest basınç değeri olarak 3.3 formülü yardımıyla hesaplanmıştır.

$$q_u = \frac{F}{A} = \frac{F}{\frac{A_0}{1-\varepsilon}} = \frac{F}{\frac{A_0}{1-\frac{\Delta H}{H_0}}} = \frac{F}{\frac{A_0}{\frac{H_0-\Delta H}{H_0}}} = \frac{F(H_0 - \Delta H)}{A_0 H_0} \quad (3.3)$$

Burada;

F: Numuneye uygulanan kuvvet (kg)

A: Deney esnasında kuvvete bağlı olarak değişen numune kesit alanı (cm^2)

A_0 : Numunenin deney başlangıcındaki temas kesit alanı (cm^2)

ε : Birim şekil değiştirme değeri ($\Delta H/H_0$)

H_0 : Numunenin deney öncesi ölçülen uzunluğu (cm)

ΔH : Numunede oluşan boy kısalması alan A durumunda olduğunda geçerli (cm)

Numunelerin değişen kür sürelerinin ardından serbest basınç deneyine tabii tutulması, görüntülerinin kaydedilmesi ve oluşan kayma düzeyleri Şekil 3.18'te gösterilmektedir.



Şekil 3.18. Serbest basınç deneyi: a) numunenin cihaza yerleştirilmesi, b-c) deney sonrası numuneler, d) serbest basınç deneyine tabii tutulan karışımlar

3.2.7. Mikroyapı Testleri

Değişen oranlarda hazırlanan kompozit malzemelerin mikro seviyedeki içerikleri ve yapılarının bulunması amacıyla testler gerçekleştirilmiştir. Bu testler sayesinde puzolanik reaksiyonların işleyişi, oluşan kristal yapılar ve reaksiyon ürünleri araştırılmıştır. X-ışını floresans spektrometresi (XRF), X-ışını difraktometresi (XRD) ve Taramalı elektron mikroskobu deneyleri Necmettin Erbakan Üniversitesi bünyesinde bulunan, Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

2,7, 28 ve 56 gün kür sonunda serbest basınç deneyine tabii tutulan numuneler, deney sonrasında 105°C etüvde bir gün süreyle kurutulmuştur. Bu işlem ile numunelerin içeriğindeki su ortamdan uzaklaştırılmış, oluşacak reaksiyonların önüne geçilmiştir.

Böylece kısa ve uzun süreli kürün, çeşitli reaksiyon ürünleri üzerindeki etkileri incelenmiştir (Şekil 3.19).



Şekil 3.19. Mikroyapı testleri için etüvde kurutulmuş kompozit numuneler

3.2.7.1. X-Işını Floresans Spektrometresi (XRF)

Bu deneyde malzemenin içeriğindeki atomlar X ışınları kullanılarak uyarılmaktadır. Uyarılan bu atomların yakın yörüngelerindeki elektronlar, daha yüksek enerji sınıflarına çıkmaktadır. Sürecin devamında yüksek enerji sınıfına çıkan bu elektronlar, ilk enerji düzeylerine geri dönerken, uyarılma sonucu kazandıkları fazla enerjiyi ışımaya yaparak geri verirler. Söz konusu bu karakteristik foton enerjileri belirlenir, böylece malzemenin kimyasal bileşimi nicel ve nitel olarak hesaplanır.

X-ışını floresans spektrometresi ile katı, sıvı ve toz halde bulunan materyallerin kimyasal bileşimini Sodyum (Na)-Uranyum (U) aralığında ortaya koymaktadır. Numunelerin kimyasal bileşimi içeriğindeki element ve oksitlerin bulunmasıyla, nitel ve nicel olarak hesaplanmaktadır. Deney kapsamında Rigaku NEX CG test cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.20).



Şekil 3.20. X-ışını floresans spektrometresi test cihazı

3.2.7.2. X-ışını Difraktometresi (XRD)

X-ışını difraktometresi analiziyle malzemenin içeriğindeki mineraller ve kristal yapılar tespit edilebilmektedir. Malzemenin içeriğinde bulunan kristal fazın, kendine özgü atomik dizimlerine bağlı olarak, X-ışınlarını belirli bir düzen içinde kırması prensibine dayanan bir deneydir. Kristal yapının kırdığı X-ışınları tespit edilir, bu kırılma profilleri bir nevi parmak izi gibidir. Bu deney yapılırken malzemeyi tahrip etmemekte, eser miktardaki malzeme kullanılarak bile icra edilebilmekte; sıvı, toz, kristal ve ince film halindeki numuneler kullanılabilir. Deneylerde kullanılan cihaz Panalytical Empyrean olup, Şekil 3.21’de gösterilmektedir. Bu deney için kurutulan numuneler öğütülerek toz haline getirilmiş, sonrasında 0.075 mm elekten elenmiş, son olarak laboratuvara nakledilmiştir.



Şekil 3.21. X-ışını difraktometre cihazı

3.2.7.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Taramalı elektron mikroskobunun çalışma prensibi, vakumlu ortamda elektronların hızlandırılması numuneye odaklanması ve elektronlar yardımıyla malzemenin yüzeyinin taranması mantığına dayanmaktadır. Bu işlem yapılırken numunenin ürettiği sinyaller tespit edilir, sinyaller görüntüye çevrilir ve bir ekrana aktarılır. Böylece numunenin yüzey analizleri mikro ve nano boyutta incelenmiş olur. Deney kapsamında toz partikül, seramik, metal ve tez kapsamındaki benzer kompozit malzemelerin kırık yüzeyleri, mikroyapıları varsa gözenekli yapıları tespit edilebilmektedir. Tez süresince imal edilen kompozit malzemeler çeşitli kür süreleri sonunda SEM deneyi için kurutulmuş, talep edilen boyutlarda küçülmüş ve laboratuvara nakledilmiştir. Şekil 3.22’de SEM analiz cihazı ve hazırlanan numunelerin bir kısmı görülmektedir. Analizlerde kullanılan cihaz ise HITACHI SU1510 olarak bildirilmiştir.



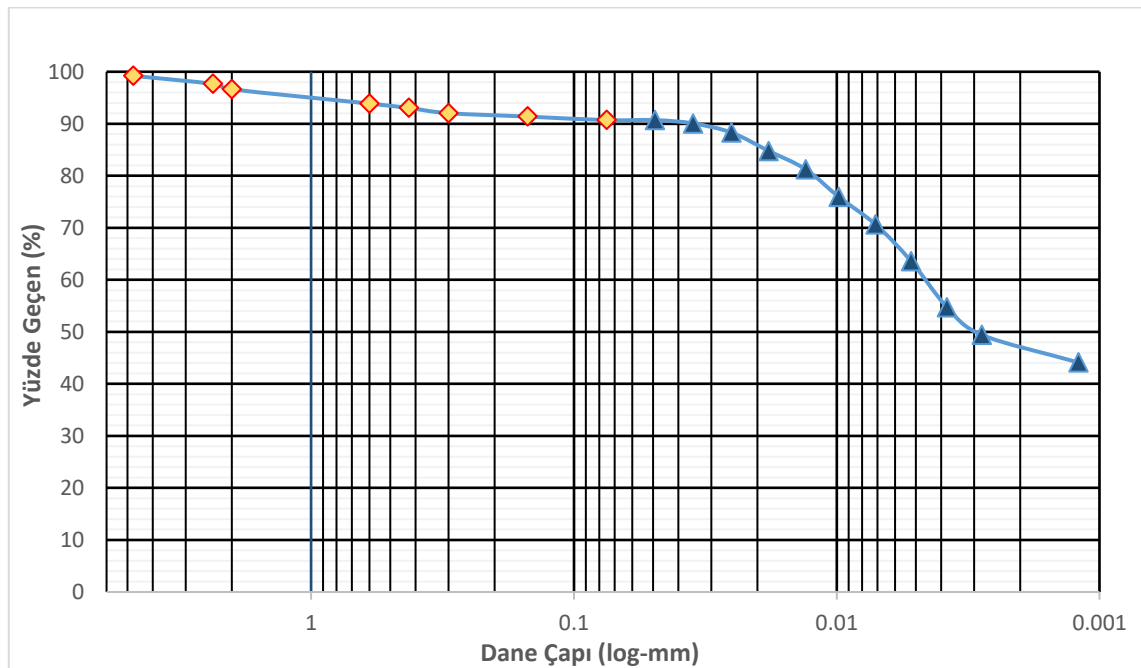
Şekil 3.22. SEM deneyi: a) deney cihazı, b) laboratuvar numunesi, c) deney öncesi numunelerin görüntüsü

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

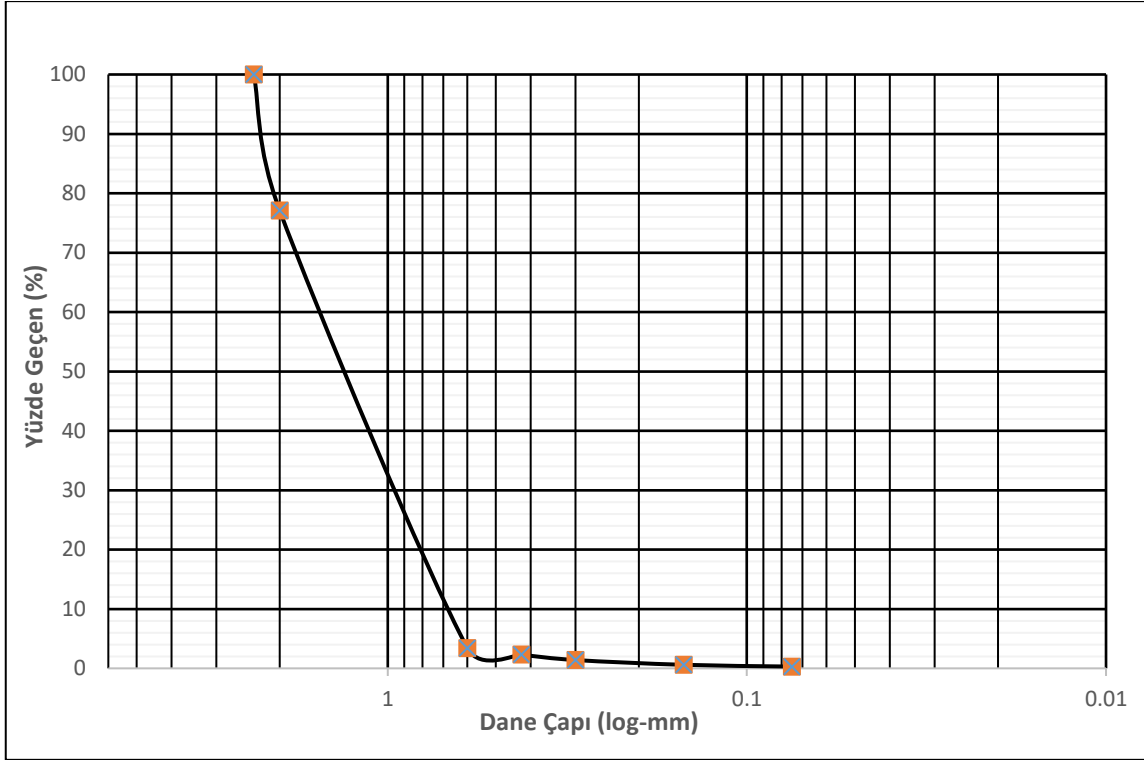
Bu bölümde tez kapsamında tarifi yapılan laboratuvar deneylerinin sonuçları paylaşılmaktadır. Ön deneyler sonucunda zemine eklenecek katkı malzemelerinin oranları ve boyutları bulunmuş, başlangıçta doğal zeminin mühendislik özellikleri tanımlanmıştır. Çalışmaların devamında tespit edilen optimum kireç miktarı zemine eklenmiş; kıvam limitleri, kompaksiyon, şişme potansiyeli, serbest basınç deneyi ve mikroyapı testleri icra edilmiştir. Çalışma kapsamında zemine, kireç ve farklı oranlarda uçucu kül eklenerek optimum uçucu kül oranı tespit edilmiştir. Son olarak kireç ve uçucu kül ile stabilize edilen karışımlara atık lastik ilave edilmiş, oluşturulan kompozitlerin 2, 7, 28 ve 56 günlük dayanımları incelenmiştir. Deneyler ile geleneksel olarak zemin iyileştirmesinde kullanılan kireç ya da kireç-üçucu kül katkılarının alternatif bir malzeme olan atık lastik ile etkileşimi araştırılmıştır.

4.1. Elek Analizi ve Hidrometre Deneyi Sonuçları

Tez kapsamında kullanılan zemin ve atık lastik parçalarının dane çapının belirlenmesi amacıyla yapılan elek analizi ve hidrometre deney sonuçları Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Doğal zemin dane çapı dağılımı eğrisi (sarı işaret: ıslak elek analizi, mavi: hidrometre)

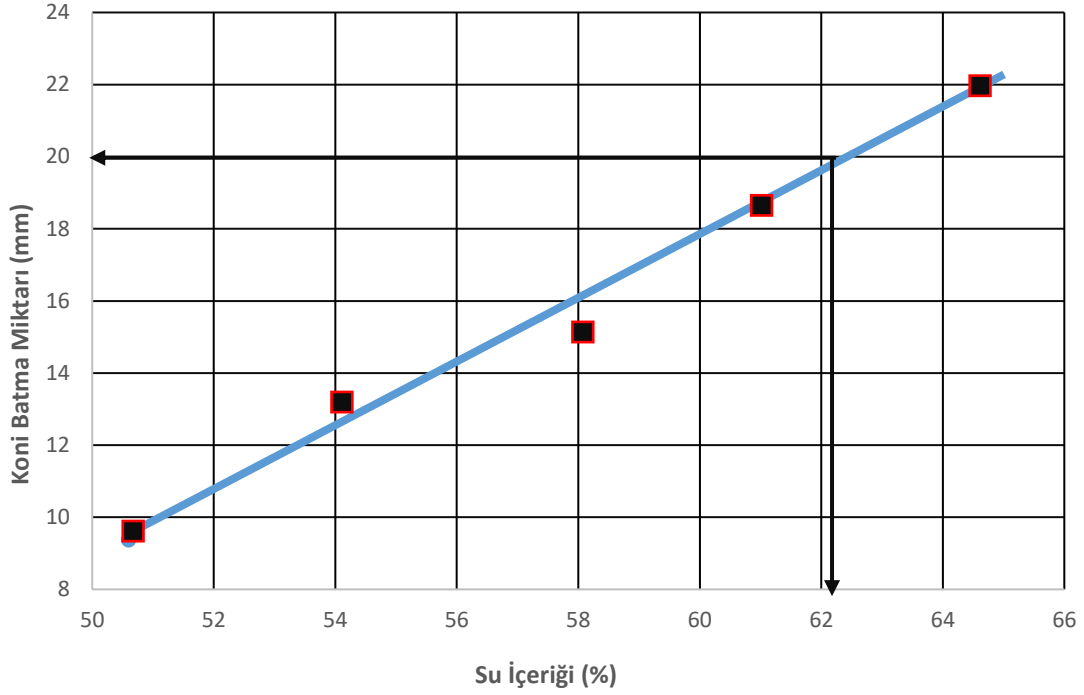


Şekil 4.2. Atık lastik dane çapı dağılım eğrisi

Yapılan elek analizi ve hidrometre sonuçlarına göre doğal zeminin %3,38'lik kısmı çakıl, %5,92'si kum, %43,2'si silt ve geriye kalan %47,5'lik kısmı ise kil olarak tespit edilmiştir. Atık lastiğin dane dağılımı incelendiğinde ise malzemenin neredeyse tamamı 2.36 mm-0.6 mm arasında bulunmaktadır. Atık lastiğin büyük çoğunluğunun lastik fiberi şeklinde olduğu ve belirtilen genişlikteki malzemeden oluştuğu görülmektedir.

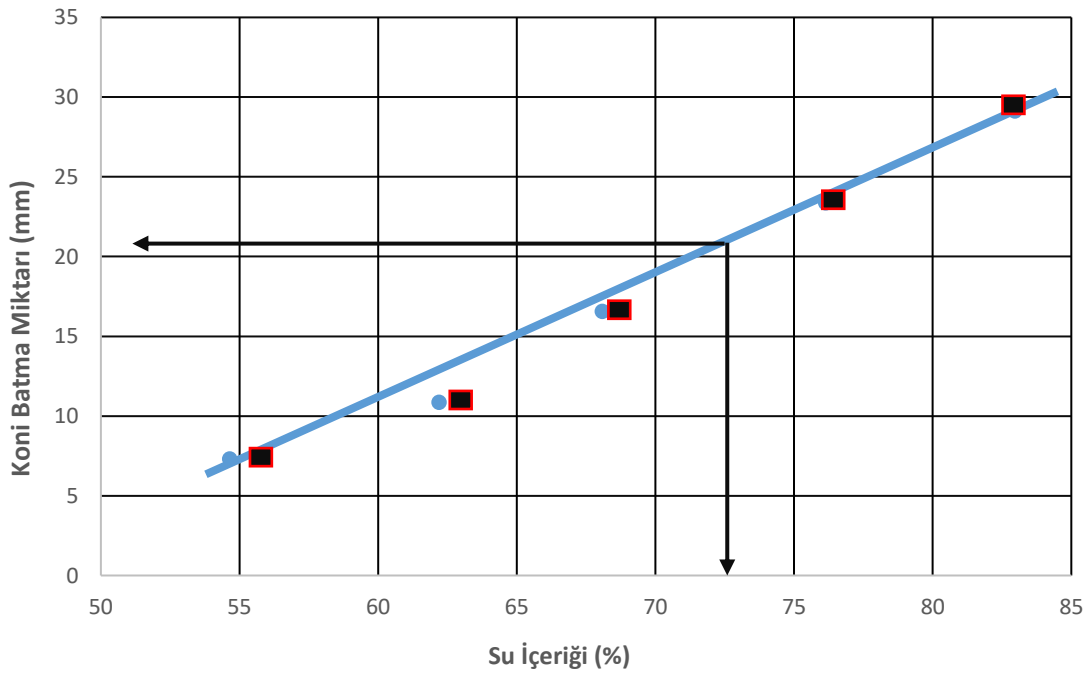
4.2. Likit Limit ve Plastik Limit Deneyi Sonuçları

Zeminin ve oluşturulan kompozitlerin kıvam limitlerinin bulunması ve zemin sınıfının tespiti amacıyla likit ve plastik limit deneyleri gerçekleştirilmiş, sonuçlar bu bölümde paylaşılmıştır. Doğal zemin haricinde deneye tabii tutulan karışımlar ise $S_{94}L_6FA_0RP_0$, $S_{91}L_6FA_3RP_0$, $S_{88}L_6FA_6RP_0$, $S_{85}L_6FA_9RP_0$, $S_{82}L_6FA_{12}RP_0$, $S_{79}L_6FA_{15}RP_0$ olarak atık lastik bulunmayan malzemelerdir. Atık lastiğin plastik olmayan bir malzeme olması ve plastik limitin atık lastik içeren kompozit malzemelerde bulunamaması bu seçimde etkili olmuştur. Şekil 4.3 'te karışımların likit limitlerinin koni batma deneyi sonucunda bulunan değerleri grafiksel olarak verilmiştir.



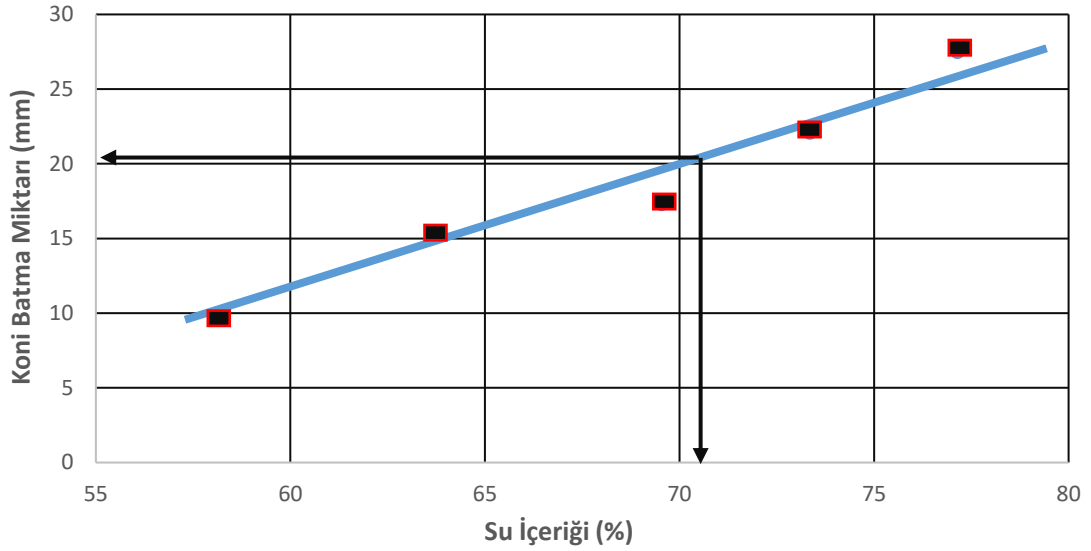
Şekil 4.3. Doğal numune likit limit deney grafiği

Doğal zemin üzerinde beş farklı su muhtevasında yapılan koni batma deneyi sonuçlarına göre zeminin likit limit değeri, $w_L = \%62,3$ olarak bulunmuştur.



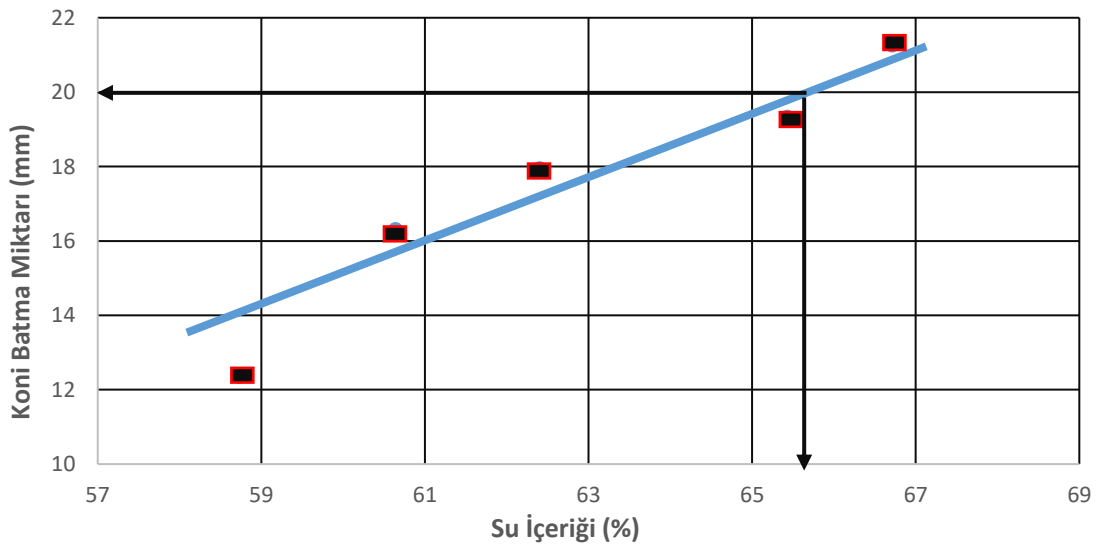
Şekil 4.4. %6 kireç katkılı zeminin likit limit deneyi ($S_{94}L_6FA_0RP_0$)

Zemine %6 oranında kireç eklendiğinde karışımın likit limiti, doğal zemine kıyasla artarak $w_L = \%72,15$ olarak gerçekleşmiştir. Bu duruma kirecin sahip olduğu yüksek su emme kapasitesinin sebep olduğu düşünülmektedir (Şekil 4.4).

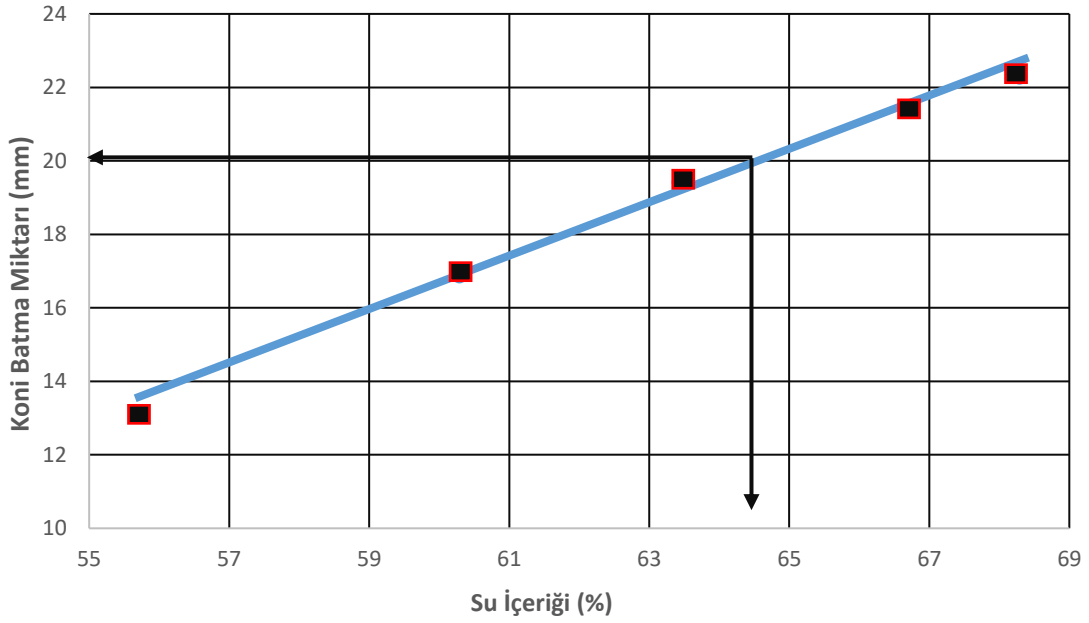


Şekil 4.5. %6 kireç ve %3 uçucu kül içeren karışımın likit limit değeri ($S_{91}L_6FA_3RP_0$)

Zemin ve %6 kireç içeren karışıma %3 oranında uçucu kül eklendiğinde karışımın likit limiti $w_L = \%70$ olmuş ve yalnızca kireç içeren karışıma göre likit limitte bir miktar düşüş gözlemlenmiştir (Şekil 4.5).

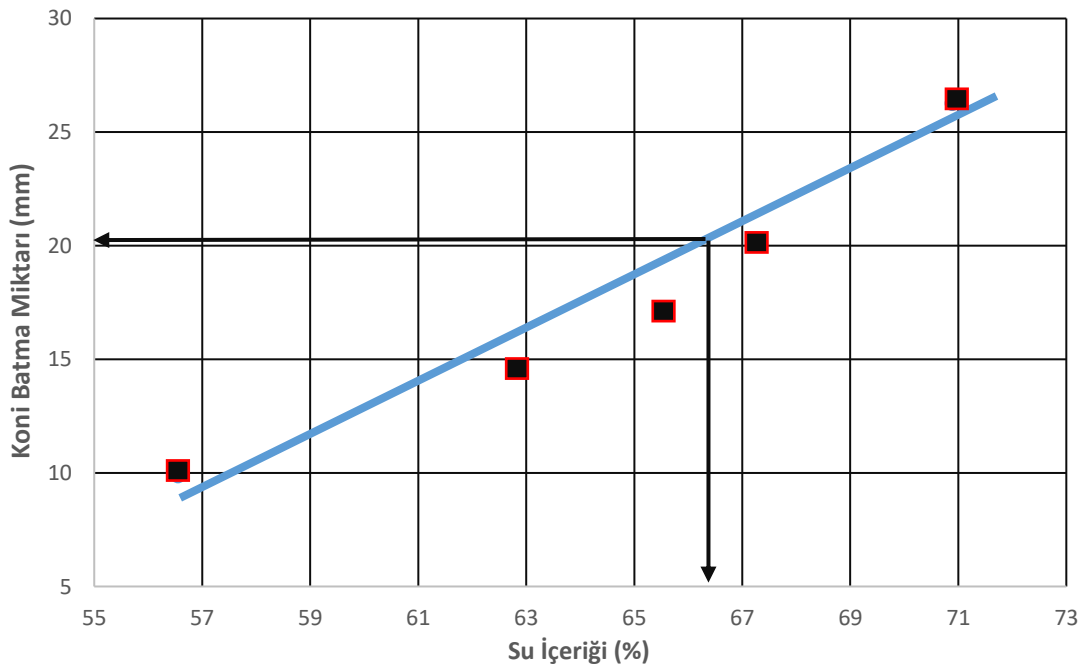


Şekil 4.6. %6 kireç ve %6 uçucu kül içeren karışımın likit limit değeri ($S_{88}L_6FA_6RP_0$)

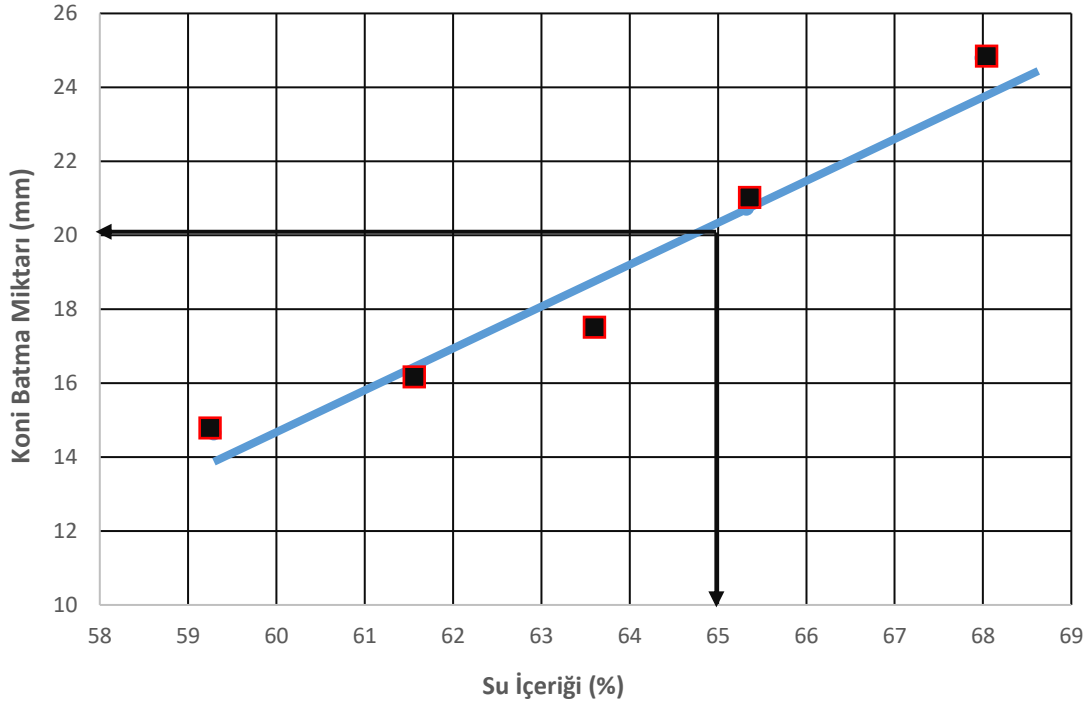


Şekil 4.7. %6 kireç ve %9 uçucu kül içeren karışımın likit limit değeri ($S_{85}L_6FA_9RP_0$)

Karışımlara artan oranlarda uçucu kül ilave edildiğinde likit limit değeri düşüş eğilimi göstermektedir. %6 kireç ilaveli zemine %6 ve %9 oranında uçucu kül ilave edildiğinde likit limit değerleri sırasıyla $w_L = \%65,8$ ve $w_L = \%64,4$ olarak ölçülmüştür (Şekil 4.6, Şekil 4.7).



Şekil 4.8. %6 kireç ve %12 uçucu kül içeren karışımın likit limit değeri ($S_{82}L_6FA_{12}RP_0$)



Şekil 4.9. %6 kireç ve %15 uçucu kül içeren karışımın likit limit değeri ($S_{79}L_6FA_{15}RP_0$)

Zemine, kirece ek olarak %12 ve %15 oranında uçucu kül eklendiğinde, %9 uçucu içeren karışıma oranla likit limit değerinde bir miktar artış göze çarpmaktadır. %12 uçucu kül içerikli kompozit malzemede likit limit değeri $w_L = \%66,6$ olmuş, %15 uçucu içerikli karışımda ise likit limit değeri $w_L = \%65$ olarak ölçülmüştür (Şekil 4.8, Şekil 4.9). Likit limit ya da plastik limit değerleri tek başlarına kullanıldığında zeminin davranışını anlamada yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle karışımları yorumlarken plastik ve likit limit değerlerinden türetilen plastisite indisini kullanmak daha anlamlı olacaktır. Düşük plastisite indisi zeminin işlenebilirliğini arttırdığı için istenen bir özellik olmaktadır. Çizelge 4.1’de doğal zeminin ve diğer karışımların likit ve plastik limit değerleri, buna bağlı olarak plastisite indisleri gösterilmektedir. Zemine kireç ilave edilmesinin karışımın plastik limitini büyük ölçüde arttırdığı görülmektedir. Kireç ve uçucu kül kullanılarak üretilen numunelerde ise plastik limit başlangıçta bir miktar düşmüş, artan oranlarda uçucu kül eklenmesiyle plastik limitte küçük bir yükselme yaşanmıştır. Bu verilere dayanarak plastik limit üzerinde asıl etkili olan faktörün uçucu külden ziyade kireç olduğu söylenebilir. Plastisite indisi ise her iki katkı maddesine bağlı olarak değişmektedir. En düşük plastisite indisine %6 kireç ve %15 uçucu kül içeren karışımlarda ulaşılmış, %9 uçucu kül katkılı kompozitte iyi bir performans sergilemiştir.

Çizelge 4.1. Karışımların likit ve plastik limit değerleri, plastisite indisleri

Karışım	Likit Limit (%)	Plastik Limit (%)	Plastisite İndisi (%)
Doğal zemin	62.3	30.4	31.9
$S_{94}L_6FA_0RP_0$	72.15	48.07	24.08
$S_{91}L_6FA_3RP_0$	70	45.38	24.62
$S_{88}L_6FA_6RP_0$	65.8	44.63	21.17
$S_{85}L_6FA_9RP_0$	64.4	44.86	19.54
$S_{82}L_6FA_{12}RP_0$	66.6	45.63	20.97
$S_{79}L_6FA_{15}RP_0$	65	47.9	17.1

4.2.1. Aktivite

Zemin içeriğindeki kil oranı ve plastisite indisi bilindiğine göre, zeminin aktivitesi hakkında yorum yapmak mümkündür. Aktivite plastisite indisinin zeminin kil oranına bölünmesiyle bulunan bir değer olup, killerin şişme potansiyelini tahmin etmekte kullanılan bir terimdir. Nelson ve Miller (1992) kil zeminleri, sahip oldukları aktivite değerine bağlı olarak üç ayrı grupta incelemişlerdir:

- $A < 0,75$ ise kil düşük aktiviteli
- $0,75 < A < 1,25$ arasında ise normal aktiviteli
- $A > 1,25$ olduğu durumda ise yüksek aktiviteli

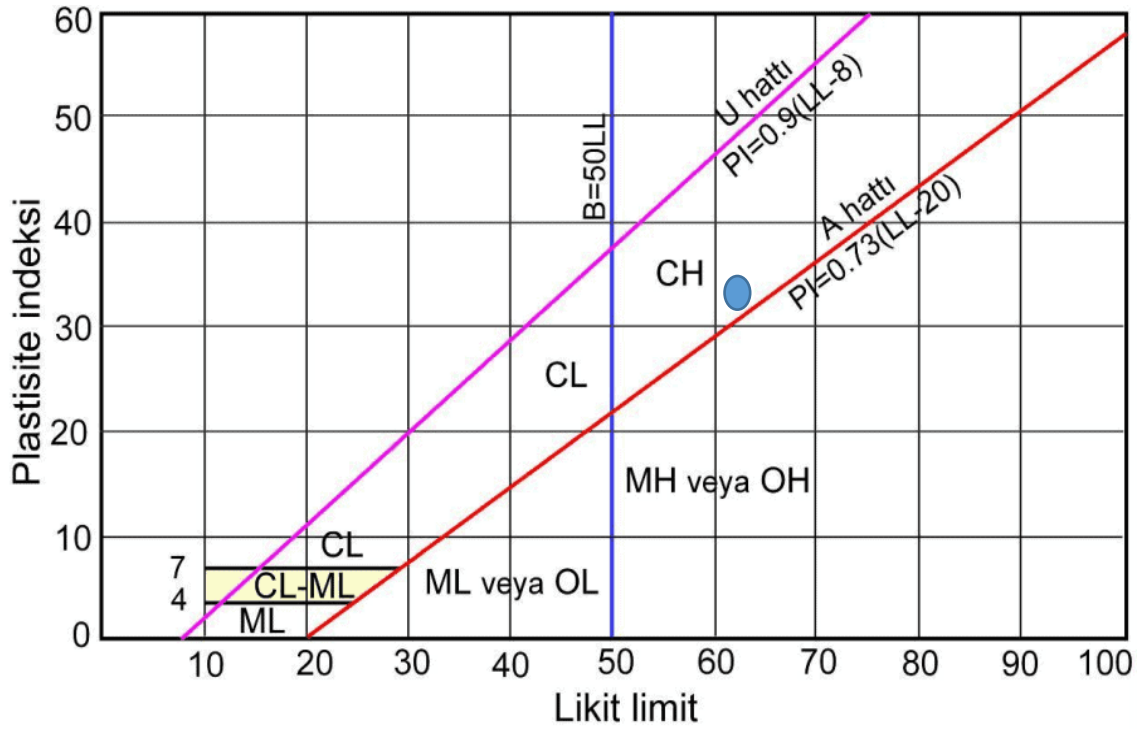
Aktivite formül 4.1 yardımıyla hesaplanmış olup $A=0,84$ olarak bulunmuştur. Kilin aktivite değeri 0,75 ile 1,25 arasında olduğunda normal aktiviteli bir zemindir.

$$A = \frac{PI}{C} \quad (4.1)$$

Burada PI zeminin plastisite indisini, C ise kil yüzdesini belirtmektedir.

Zeminin plastisite kartındaki yeri ve zemin sınıfının bulunması amacıyla formül 4.2 kullanılmıştır. Bu sayede zemin ile A hattı arasındaki ilişki ortaya konulmuştur. Zeminin likit limiti olan %62,3 değerine karşılık olarak, A hattının geçtiği plastisite indisi değeri %30,89 olarak bulunmuştur. Zeminin plastisite indisi bu değer üzerinde kaldığı için USCS sınıflandırma sistemine göre zemin yüksek plastisiteli (CH) olarak bulunmuştur. Zeminin plastisite kartındaki konumu Şekil 4.10'da gösterilmektedir.

$$PI: 0.73(LL - 20) \quad (4.2)$$



Şekil 4.10. Zeminin plastisite kartında yeri ve sınıflandırılması

4.3. Özgül Ağırlık Deney Sonuçları

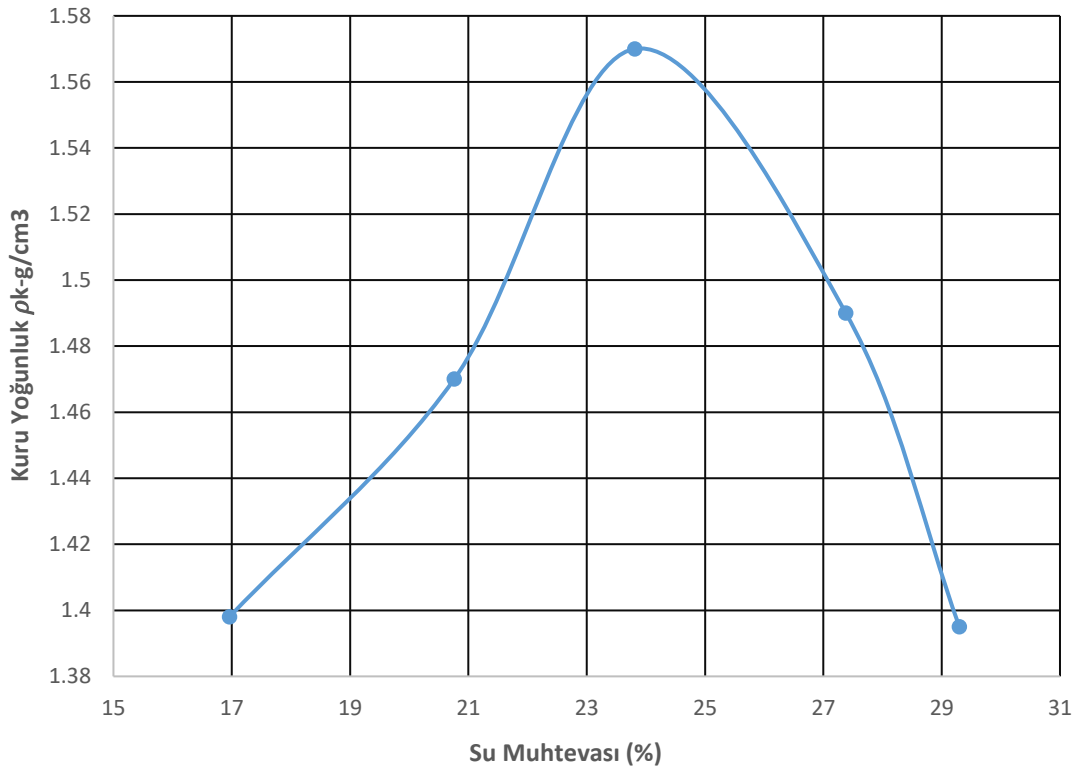
Tez kapsamında kullanılan yüksek plastisiteli kil zemin, kireç uçucu kül ve atık lastik parçaları özgül ağırlık deneyine tabii tutulmuştur. Sonuçların doğruluğunu arttırmak için, çalışmada su ve alkol deney sıvısı olarak kullanılmıştır. Yapılan gözlemlerde zeminin ve kirecin suyu bünyesine alarak şişme eğiliminde olduğu bu nedenle özgül ağırlık deney sonuçlarını etkilediği tespit edilmiş, bu nedenle söz konusu malzemelerin deneylerinde alkol deney sıvısı olarak kullanılmıştır. Benzer şekilde uçucu külün özgül ağırlığı hem alkol hem de su ile ayrı ayrı test edilmiş, uçucu kül ile su arasında etkileşim olduğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak uçucu külün özgül ağırlık deneyleri su kullanılarak icra edilmiştir. Çizelge 4.2’de malzemelerin özgül ağırlık deney sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.2. Zemin, kireç, uçucu kül ve lastiğin özgül ağırlıkları

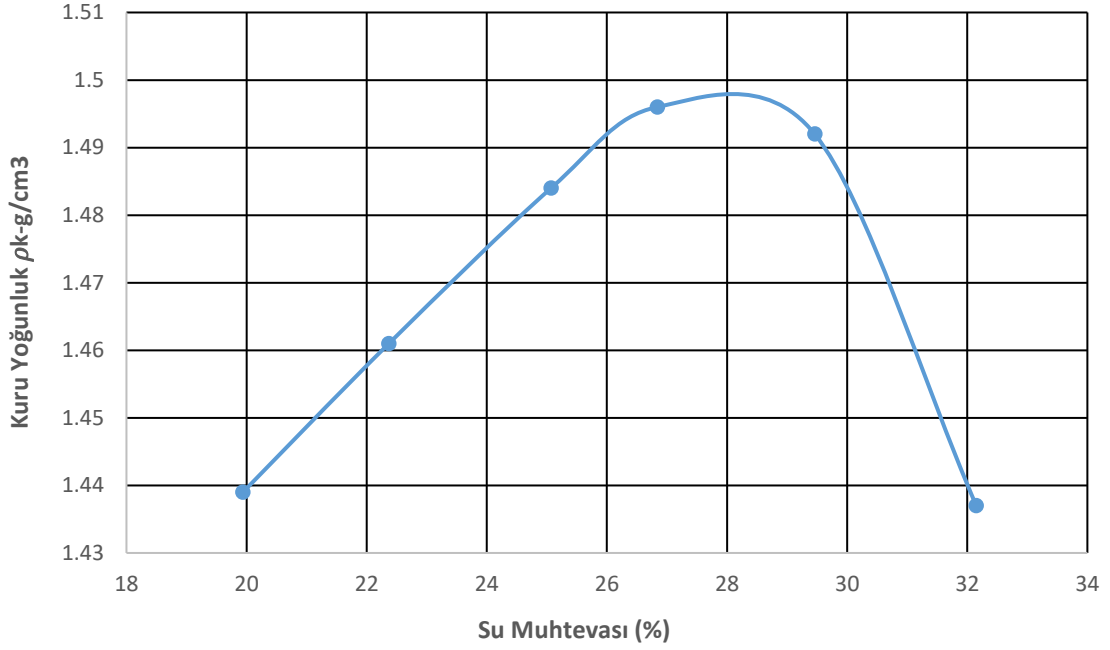
Malzemeler	Özgül Ağırlık (g/cm ³)
Yüksek plastisiteli kil zemin	2,645
Uçucu kül	2,446
Atık Lastik	1,048
Kireç	2,251

4.4. Kompaksiyon Deney Sonuçları

Zeminin ve çeşitli oranlarda katkı maddelerinin zemine eklenmesiyle hazırlanan kompozit malzemelerin sıkışma özelliklerinin belirlenmesi amacıyla kompaksiyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Üzerinde standart Proctor deneyi yapılan karışımlar ise $S_{94}L_6FA_0RP_0$, $S_{91}L_6FA_3RP_0$, $S_{88}L_6FA_6RP_0$, $S_{85}L_6FA_9RP_0$, $S_{82}L_6FA_{12}RP_0$, $S_{79}L_6FA_{15}RP_0$, $S_{76}L_6FA_{18}RP_0$, $S_{90.5}L_6FA_3RP_{0.5}$, $S_{90}L_6FA_3RP_1$ olarak belirlenmiştir. Yapılan ön deneylerde atık lastik katkısının ağırlıkça %0,5 ve %1 oranda karışıma eklenmesinin, optimum su muhtevasında bir miktar düşüşe neden olduğu, %1,5 eklenmesiyle ise karışımın optimum su muhtevasında diğer oranların aksine artışa sebep olduğu belirlenmiştir. Şekilde 4.11’de doğal zeminin kompaksiyon eğrisi görülmektedir.

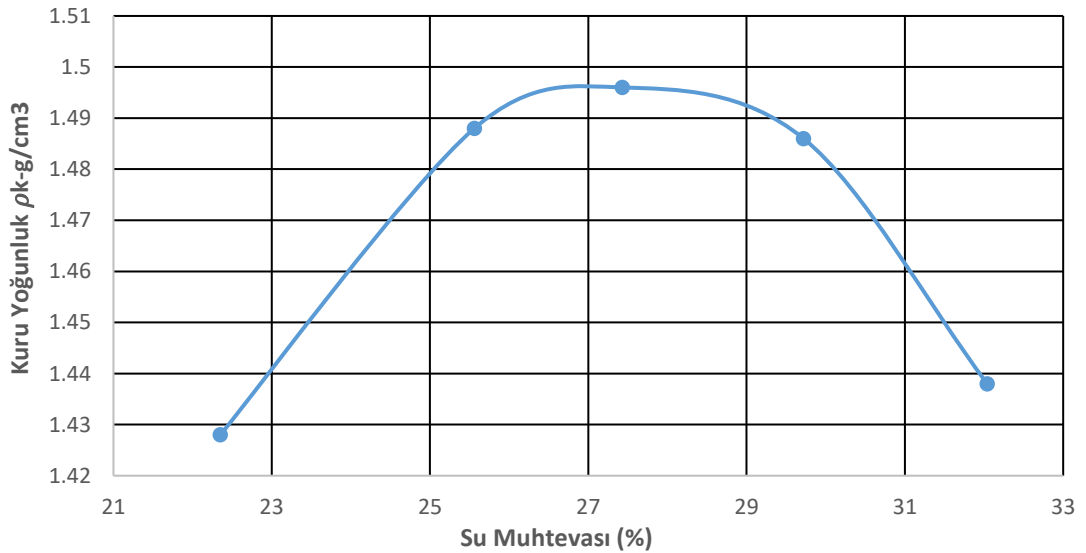


Şekil 4.11. Doğal zeminin kompaksiyon eğrisi, optimum su muhtevası

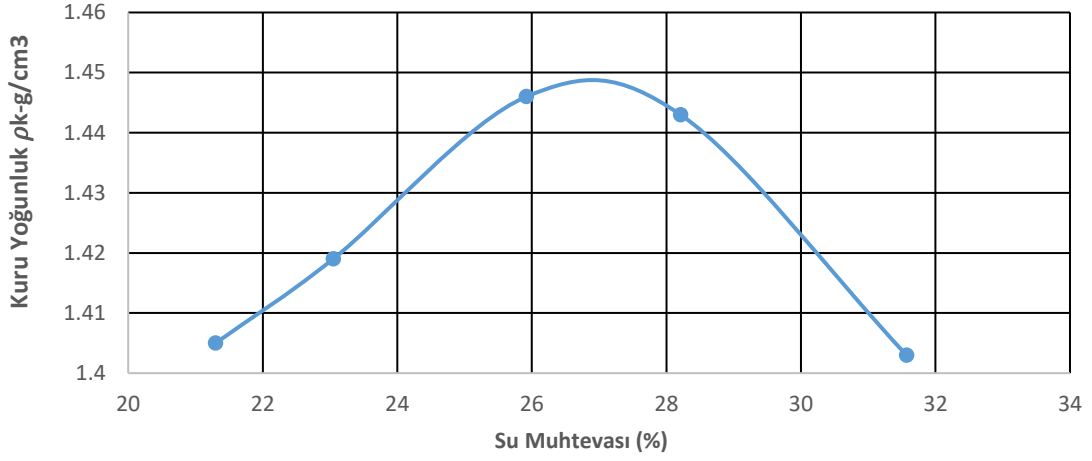


Şekil 4.12. %6 kireç katkıli karışımın kompaksiyon eğrisi

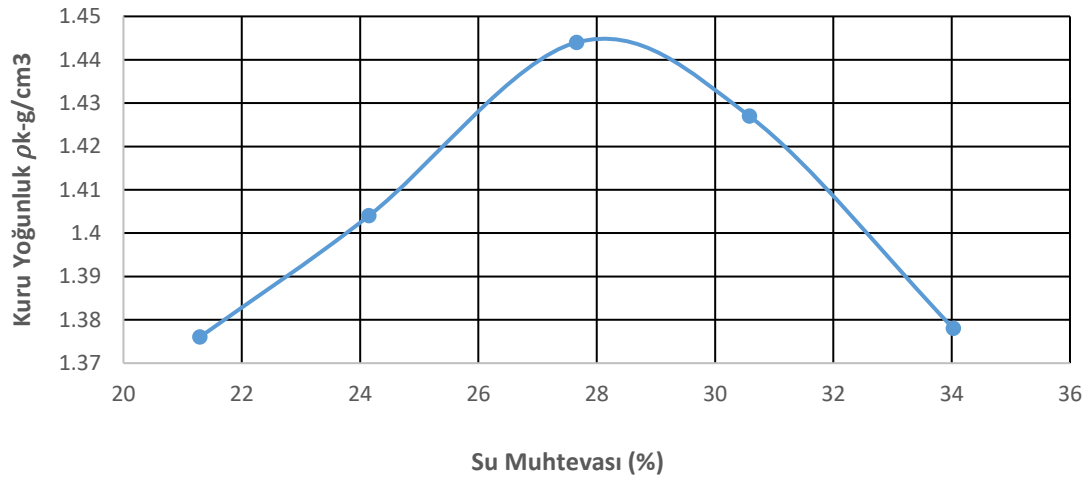
Zemine %6 oranında kireç ilave edildiğinde karışımın maksimum kuru birim hacim ağırlığı düşmüş, buna karşın optimum su muhtevasında artış gözlenmiştir. Bu duruma kirecin düşük özgül ağırlığı ve yüksek su emme kapasitesinin sebep olduğu düşünülmektedir (Şekil 4.12).



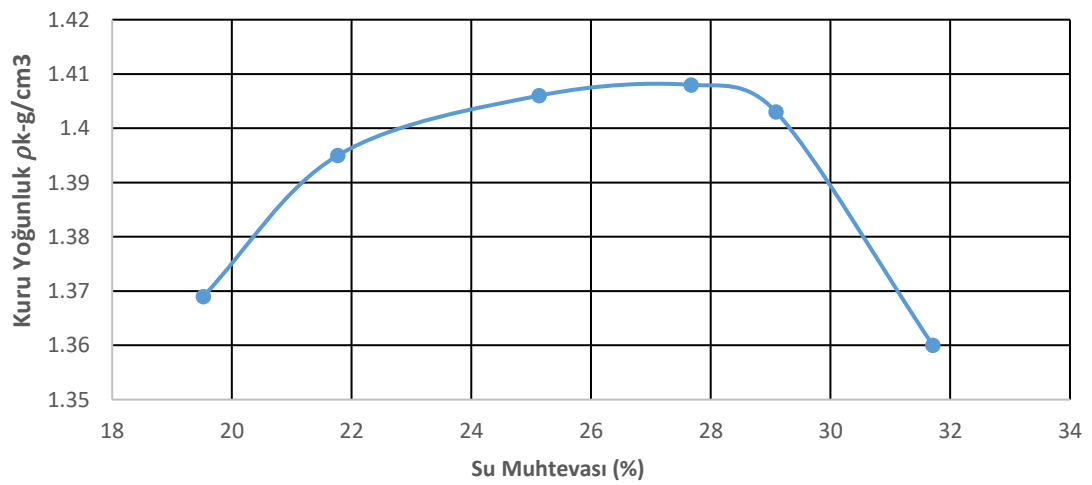
Şekil 4.13. %6 kireç ve %3 uçucu kül katkıli karışımın kompaksiyon eğrisi



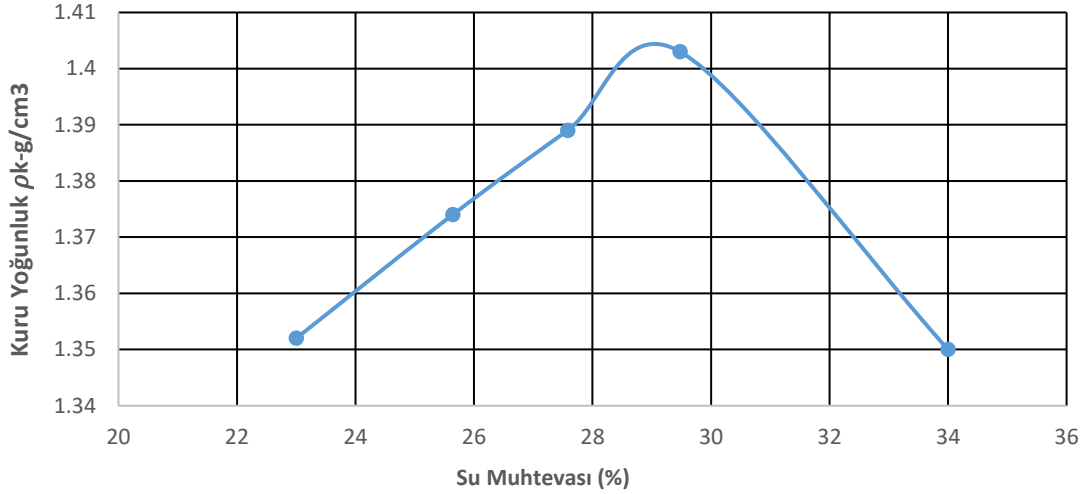
Şekil 4.14. %6 kireç ve %6 uçucu kül katkıli karışımın kompaksiyon eğrisi



Şekil 4.15. %6 kireç ve %9 uçucu kül katkıli karışımın kompaksiyon eğrisi

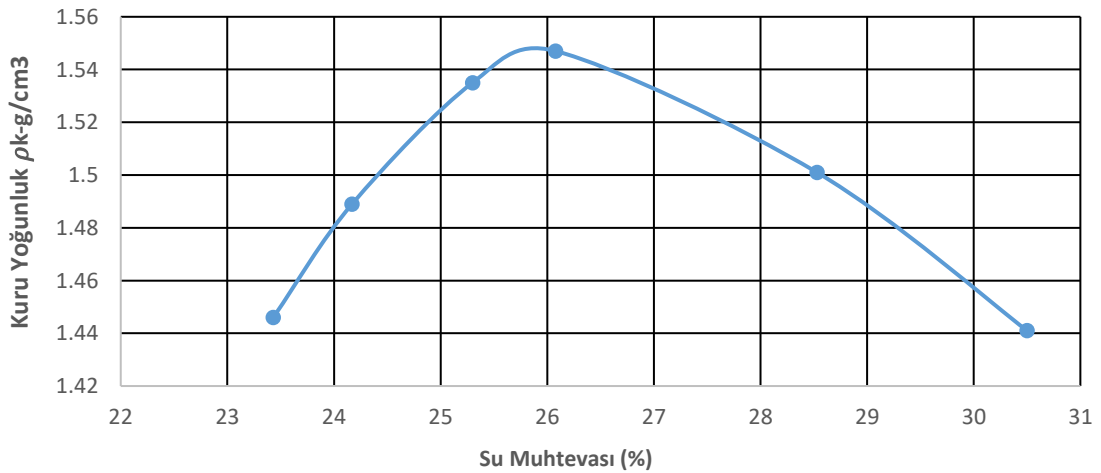


Şekil 4.16. %6 kireç ve %12 uçucu kül katkıli karışımın kompaksiyon eğrisi

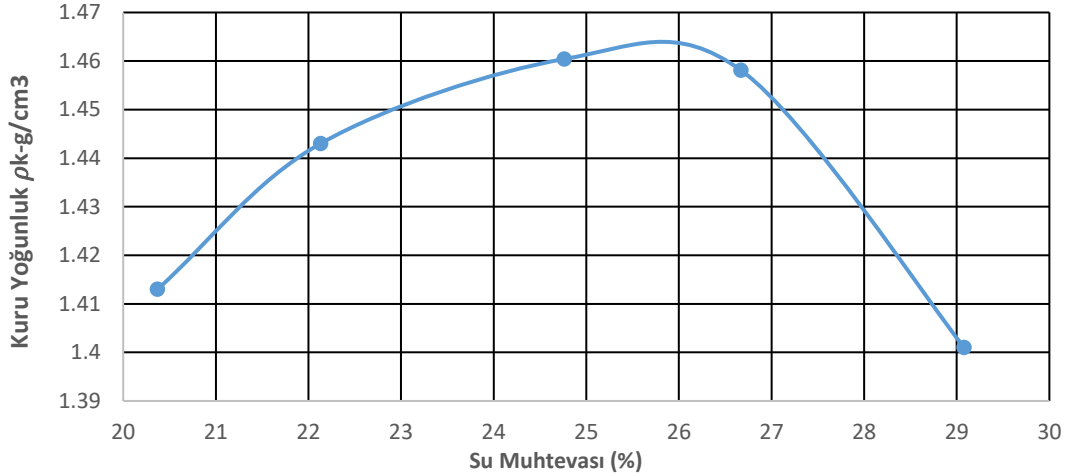


Şekil 4.17. %6 kireç ve %15 uçucu kül katkıli karışımın kompaksiyon eğrisi

Karışımlara artan oranlarda uçucu kül eklenmesinin, maksimum kuru birim hacim ağırlıkta düşüş meydana getirdiği grafikler incelendiğinde anlaşılmaktadır. Bu duruma uçucu külün özgül ağırlığının, az da olsa doğal zeminden düşük olmasının neden olduğu düşünülmektedir. Uçucu kül katkısının karışımın optimum su muhtevastaki etkisi ise dalgalı bir seyir izlemiştir. %6 kireç katkıli zemine %3 ve %6 oranında uçucu kül eklendiğinde optimum su muhtevası giderek azalmıştır. Ancak %9 ve artan oranlarda uçucu kül ilavesiyle birlikte davranış tersine dönerek, optimum su muhtevastında artış gözlenmiştir. Bu duruma artan oranlarda uçucu kül katkısının, yağlanma etkisi ve danelerin birbirine göre hareket edebilmeleri için daha fazla suya ihtiyaç duymasıyla ilgili olduğu düşünülmektedir.

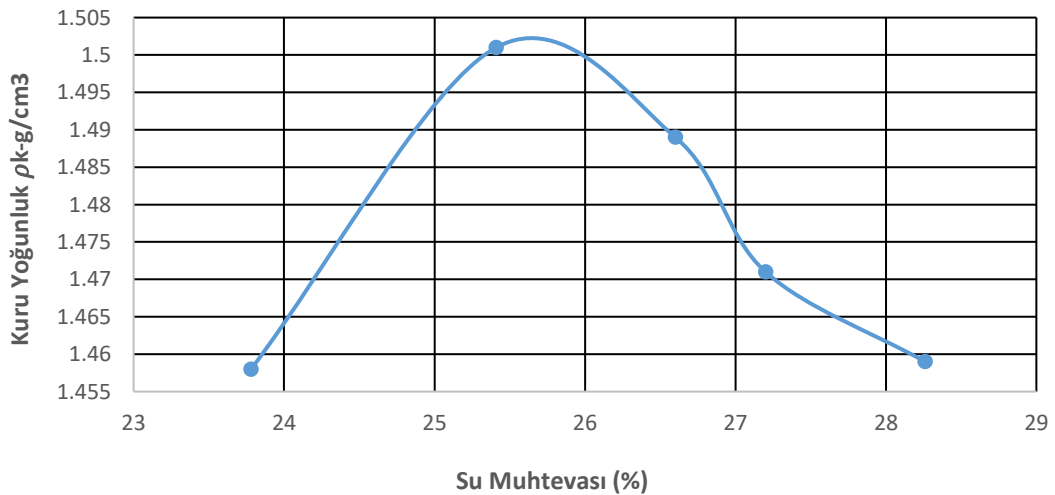


Şekil 4.18. %6 kireç ve %18 uçucu kül katkıli karışımın kompaksiyon eğrisi

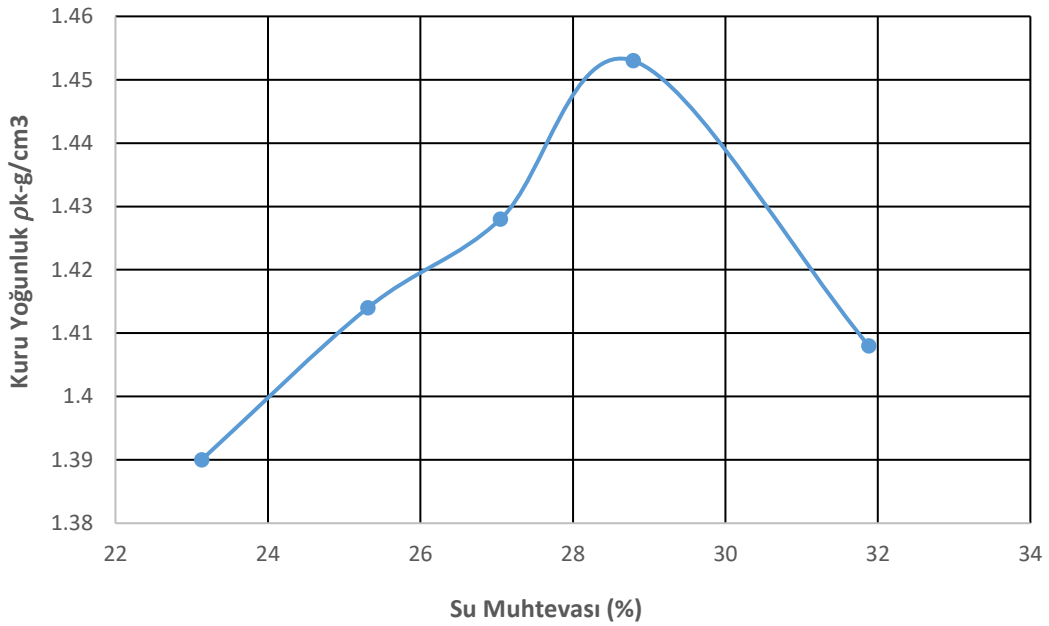


Şekil 4.19. $S_{90.5}L_6FA_3RP_{0.5}$ karışımının kompaksiyon deney eğrisi

%6 kireç ve %3 uçucu kül içeren karışıma %0.5 oranında lastik ilave edilmesiyle maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevasında düşüş yaşanmıştır. Karışıma %1 oranında atık lastik eklendiğinde ise, kuru birim hacim ağırlık değerinde artış, optimum su muhtevasında ilk orana benzer şekilde düşüş gözlenmiştir. % 1.5 lastik içerikli kompozitlerde ise beklenenin aksine optimum su muhtevasında artış, kuru birim hacim ağırlıkta ise düşüş yaşanmıştır. Optimum su muhtevasındaki bu dalgalanma su emme kapasitesi çok düşük olan lastiğin belli bir noktaya kadar optimum su muhtevasını azaltıcı, eşik değerden sonra ise artan sürtünme kuvvetleri ve yağlanma ihtiyacından dolayı optimum su muhtevasını arttırıcı bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir (Şekil 4.19, Şekil 4.20 ve Şekil 4.21).



Şekil 4.20. $S_{90}L_6FA_3RP_1$ karışımının kompaksiyon deney eğrisi



Şekil 4.21. $S_{89.5}L_6FA_3RP_{1.5}$ karışımının kompaksiyon deney eğrisi

Karışım içeriğindeki kireç ve uçucu kül miktarına bağlı olarak optimum su muhtevası değeri artsa bile, bu artışın optimum su muhtevasında hazırlanan karışımların hidrasyonu için hangi ölçüde yeterli olduğu bilinmemektedir. Kesin bir çıkarım yapabilmek için hazırlanan numunelerin serbest basınç deneyi sonuçlarıyla, karışımın içeriğindeki su, kireç ve uçucu kül oranlarının incelenmesi gerekmektedir. Çizelge 4.3'te karışımlardaki su oranıyla, kireç ve uçucu kül oranları kıyaslanmış, optimum su muhtevası ve buna karşılık gelen birim hacim ağırlık değerleri paylaşılmıştır. Çizelge incelendiğinde karışımlardaki katkı maddesi miktarı arttıkça, su/kireç ve uçucu kül oranı giderek azalmıştır.

Çizelge 4.3. Karışımların, optimum su muhtevası, ρ_{kmax} ve su/katkı maddesi oranları

Karışımlar	Optimum su muhtevası (%)	Kuru Yoğunluk (g/cm ³)	Su/kireç ve uçucu kül oranı (w/L+FA)
$S_{91}L_6FA_3RP_0$	27.43	1.496	3.048
$S_{88}L_6FA_6RP_0$	27	1.448	2.25
$S_{85}L_6FA_9RP_0$	27.66	1.444	1.844
$S_{82}L_6FA_{12}RP_0$	28.4	1.408	1.578
$S_{79}L_6FA_{15}RP_0$	29.2	1.404	1.39
$S_{76}L_6FA_{18}RP_0$	30.2	1.396	1.258

4.5. Şişme Potansiyeli Deney Sonuçları

Tez kapsamında karışımların şişme potansiyellerinin tespit edilmesi amacıyla konsolidasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Üzerinde konsolidasyon deneyi yapılan karışımlar ise $S_{94}L_6FA_0RP_0$, $S_{91}L_6FA_3RP_0$, $S_{88}L_6FA_6RP_0$, $S_{85}L_6FA_9RP_0$, $S_{82}L_6FA_{12}RP_0$, $S_{79}L_6FA_{15}RP_0$, $S_{76}L_6FA_{18}RP_0$, $S_{84.5}L_6FA_9RP_{0.5}$ olarak belirlenmiştir. Kompaksiyon deneyi sonucunda bulunan optimum su muhtevalarına göre karışımlar sıkıştırılarak hazırlanmıştır. Deney numuneleri hazırlanırken, oluşabilecek hataları en aza indirmek amacıyla her karışım için 2 adet örnek imal edilmiş ve eş zamanlı olarak deney aletine yerleştirilmiştir. Şişmenin sona ermesi beklenmiş, numunelerin yüksekliklerinde meydana gelen artışlar kayıt altına alınmıştır.

Çizelge 4.4 hazırlanan karışımların şişme potansiyeli değerlerini göstermektedir. Test sonuçlarına göre katkısız zeminin şişme potansiyeli değeri %10,08 olarak gerçekleşmiştir. Zemin kireç ile iyileştirildiğinde ise şişme potansiyeli değeri ihmal edilebilecek kadar düşük seviyelere ulaşmıştır. Kirecin şişme potansiyelini düşürmede efektif olarak kullanılabilceği bu sonuçlara dayanılarak söylenebilir. Tez kapsamında kullanılan bir diğer katkı malzemesi olan uçucu külün, şişme potansiyeli üzerindeki etkisi ise sınırlı seviyede kalmıştır. Artan uçucu kül oranıyla başlangıçta bir miktar düşüş gözlemlenmiş, ancak devam eden süreçte artan uçucu kül oranlarına rağmen şişme potansiyeli değeri belli bir aralıkta kalmıştır. Yine benzer şekilde atık lastik içeren karışımın şişme potansiyeli değeri, kireç ve uçucu kül kullanılarak hazırlanan karışımlarla benzerlik göstermektedir. Bu sonuçlara göre şişme potansiyelinin düşürülmesinde kirecin, uçucu kül ve atık lastiğe oranla daha büyük bir etkiye sahip olduğu söylenebilir.

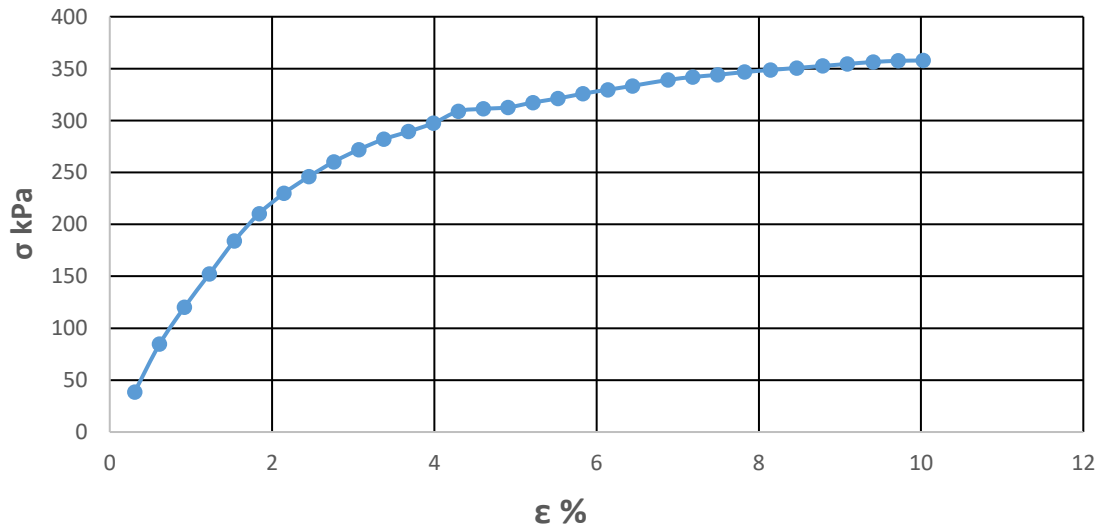
Zemin, kireç ile yapılan iyileştirme sonrasında minimum şişme potansiyeli değerine neredeyse ulaşmış, diğer katkı maddelerinin eklenmesiyle şişme potansiyelinde kayda değer bir değişim görülmemiştir. Ancak uçucu kül ve atık lastik katkılarının zeminin şişme potansiyeli üzerindeki bireysel etkileri bu çalışmada ele alınmamıştır. Yalnızca kireç, uçucu kül ya da atık lastik kullanılarak yapılan iyileştirmelerde, zeminin şişme potansiyelinin düştüğü farklı araştırmacılar tarafından bildirilmiştir (Zha vd., 2008; Mohammed ve Vipulanandan, 2015; Zhou vd., 2019).

Çizelge 4.4. Doğal zeminin ve karışımların şişme potansiyeli değerleri

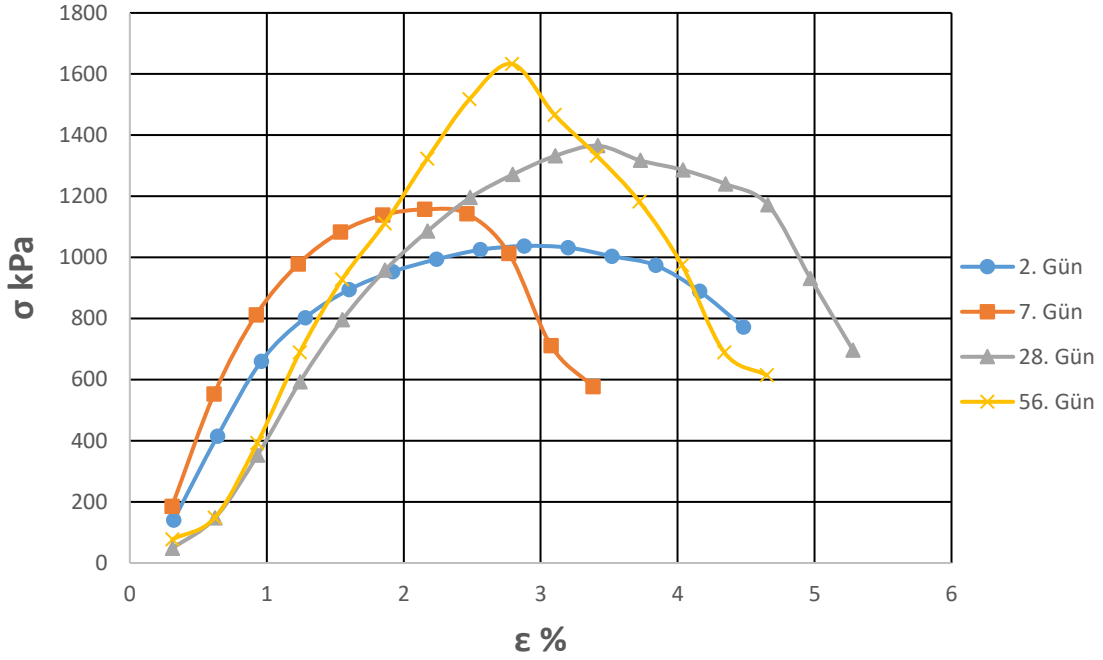
Karışım	Şişme miktarı ΔH (mm)	Numune Yükseklği	Şişme Potansiyeli (%)	Ortalama (%)
Doğal Zemin	2.03	20.13	10.08	10.08
$S_{94}L_6FA_0RP_0$	0.18	20.55	0.876	0.83
	0.16	20.41	0.784	
$S_{91}L_6FA_3RP_0$	0.09	20.14	0.446	0.446
$S_{88}L_6FA_6RP_0$	0.08	19.87	0.402	0.4095
	0.085	20.35	0.417	
$S_{85}L_6FA_9RP_0$	0.13	20	0.65	0.545
	0.09	20.41	0.441	
$S_{82}L_6FA_{12}RP_0$	0.11	20.23	0.543	0.642
	0.15	20.2	0.742	
$S_{79}L_6FA_{15}RP_0$	0.11	20.47	0.537	0.595
	0.13	19.91	0.653	
$S_{76}L_6FA_{18}RP_0$	0.1	20.49	0.488	0.513
	0.11	20.43	0.538	
$S_{84.5}L_6FA_9RP_{0.5}$	0.12	21.03	0.57	0.526
	0.1	20.75	0.482	

4.6. Serbest Basınç Deneyi Sonuçları

Optimum su muhtevasında hazırlanan ve sıkıştırılan numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. 2, 7, 28 ve 56 günlük kür uygulamasıyla karışımların erken ve geç dönem dayanımları, puzolanik reaksiyonların farklı karışımlardaki etkileri ve hızları değerlendirilmiştir. Doğal zemin üzerinde yapılan serbest basınç deneyi, zeminin yüksek plastikliği nedeniyle belirgin bir kırılma gözlemlenmeden, %10 şekil değiştirmeye ulaşıldığında sona erdirilmiştir (Şekil 4.22).



Şekil 4.22. Doğal zemin serbest basınç dayanımı



Şekil 4.23. $S_{94}L_6FA_0RP_0$ karışımının 2, 7, 28 ve 56 gün kür uygulanmış serbest basınç dayanımları

Optimum kireç ve su muhtevasında hazırlanan numunelerde, 2 günlük kür süresinin ardından dayanım normal zemine kıyasla %190 oranında artmıştır. 7, 28 ve 56 gün kür süreleri için dayanım değerleri ise sırasıyla %224, %282 ve %357 oranında yükselmiştir (Şekil 4.23).

4.6.1. Kireç ve Uçucu Kül Katkılı Numuneler

Kireç ve uçucu kül katkılı numunelerin hazırlanması sürecinde, optimum uçucu kül oranını tespit etmek için nihai dayanımında (56 gün kür süreli) düşüş gözlemlenene kadar karışıma artan oranlarda uçucu kül ilave edilmiştir. 2 ve 7 gün kür süreli numunelerde en iyi performansı %6 kireç- %9 uçucu kül ilaveli ($S_{85}L_6FA_9RP_0$) karışım göstermiş, yalnızca kireç ile yapılan iyileştirmeye göre dayanım %15,7 ve %104,5 oranında artmıştır. 28 günlük kürün sonunda yapılan serbest basınç deneylerinde ise en yüksek dayanıma %6 kireç-%18 uçucu kül içeren ($S_{76}L_6FA_{18}RP_0$) karışım ulaşmış, kirece göre %83 daha iyi performans göstermiştir. Kireç ve uçucu katkılı kompozitlerde, 56 günlük kür sür sonunda yapılan testlerde ise %6 kireç-%15 uçucu içeren karışım maksimum değere sahip olmuş, kireç ile yapılan iyileştirmeye kıyasla %150,8 daha yüksek dayanım göstermiştir (Çizelge 4.5).

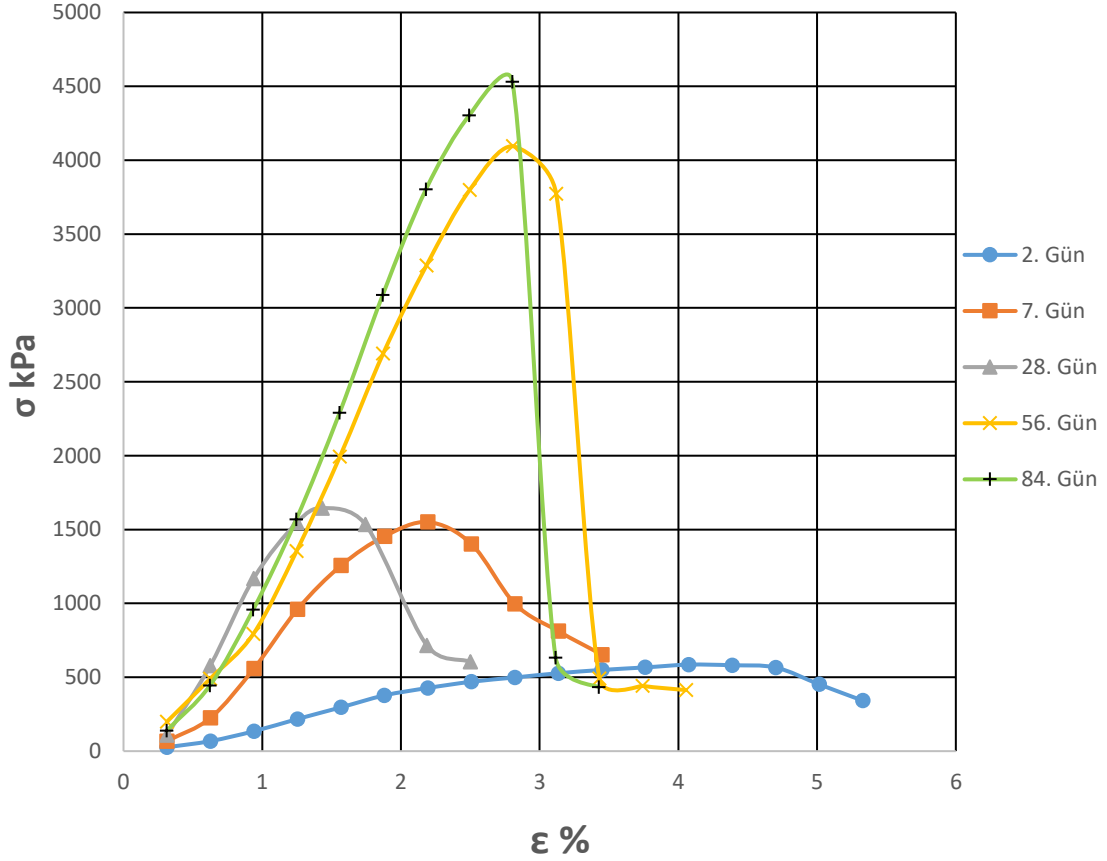
Çizelge 4.5. Kireç ve uçucu kül katkılı numunelerin 2, 7, 28 ve 56 günlük UCS dayanımları

Karışımlar	Kür süresi (gün)			
	2.gün q_u (kPa)	7.gün q_u (kPa)	28.gün q_u (kPa)	56.gün q_u (kPa)
$S_{100}L_0FA_0RP_0$	357	-	-	-
$S_{94}L_6FA_0RP_0$	1037.31	1157.06	1365.27	1632.71
$S_{91}L_6FA_3RP_0$	916.28	1302.14	1638.57	2669.22
$S_{88}L_6FA_6RP_0$	935.72	1025.75	2184.42	3095.78
$S_{85}L_6FA_9RP_0$	1200.41	2366.92	2504.53	2740.94
$S_{82}L_6FA_{12}RP_0$	702.17	1501.033	2125.14	3201.02
$S_{79}L_6FA_{15}RP_0$	585.62	1550.28	1939.24	4094.79
$S_{76}L_6FA_{18}RP_0$	1031.52	2249.29	2710.99	3368.85

Serbest basınç deneyi sonuçlarına göre, karışıma %15 oranına kadar uçucu kül eklenmesinin kompozitlerin 56 günlük dayanımlarını istikrarlı olarak arttırdığı, uçucu kül içeriğinin daha yüksek olduğu durumlarda ise dayanımın düştüğü görülmektedir. Bu duruma aşağıda belirtilen olaylardan birinin ya da birden fazlasının neden olduğu düşünülmektedir.

- Karışımındaki su/katkı maddesi oranının giderek düşmesi, buna bağlı olarak karışımda hidratasyon için yeterince su bulunmaması gerekçe olabilir.
- İkinci alternatif neden ise artan katkı maddesi oranıyla birlikte, karışımın içeriğindeki puzolanik reaksiyonların nihayete ermemesi, bu nedenle dayanımın düşmesi olabilir.
- Son olarak karışım içeriğindeki zemin miktarının azalması, bu nedenle toplam katyon değiştirme kapasitesinin düşmesi ve C-S-H oluşumunun sınırlı kalması başka bir gerekçe olabilir.

En iyi 56. gün dayanımına sahip olan karışımın tespit edilmesinden sonra, bu karışımındaki puzolanik reaksiyonların, devam eden kür süresiyle değişimi incelenmeye devam edilmiştir. Bu kapsamda yeni numuneler hazırlanmış, bu numuneler üzerinde 84 gün boyunca kür uygulanmış ve serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda 84 günlük kürün ardından dayanım, 56 gün kür süreli numunelere kıyasla %10,6 oranında artmıştır. Bu durum karışımındaki puzolanik reaksiyonların 56 gün sonrasında da devam ettiğini ispatlamıştır. Çimento hidratasyonuna benzer olarak reaksiyonlar uzun süre devam edebilmekte ve malzeme dayanım kazanmaya devam etmektedir (Şekil 4.24). Pik öncesi şekil değiştirmede yaşanan düşüşün ise malzemenin daha gevrek hala gelmesine sebep olduğu söylenebilir.

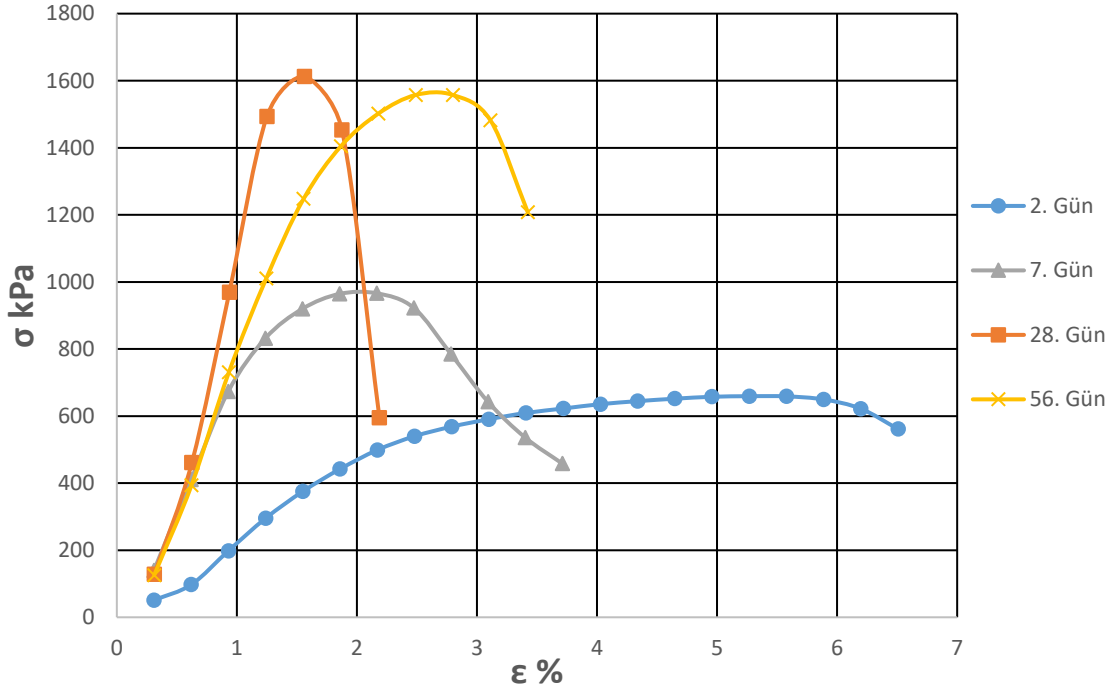


Şekil 4.24. $S_{79}L_6FA_{15}RP_0$ karışımının 2, 7, 28, 56 ve 84 gün kür uygulanmış serbest basınç dayanımları

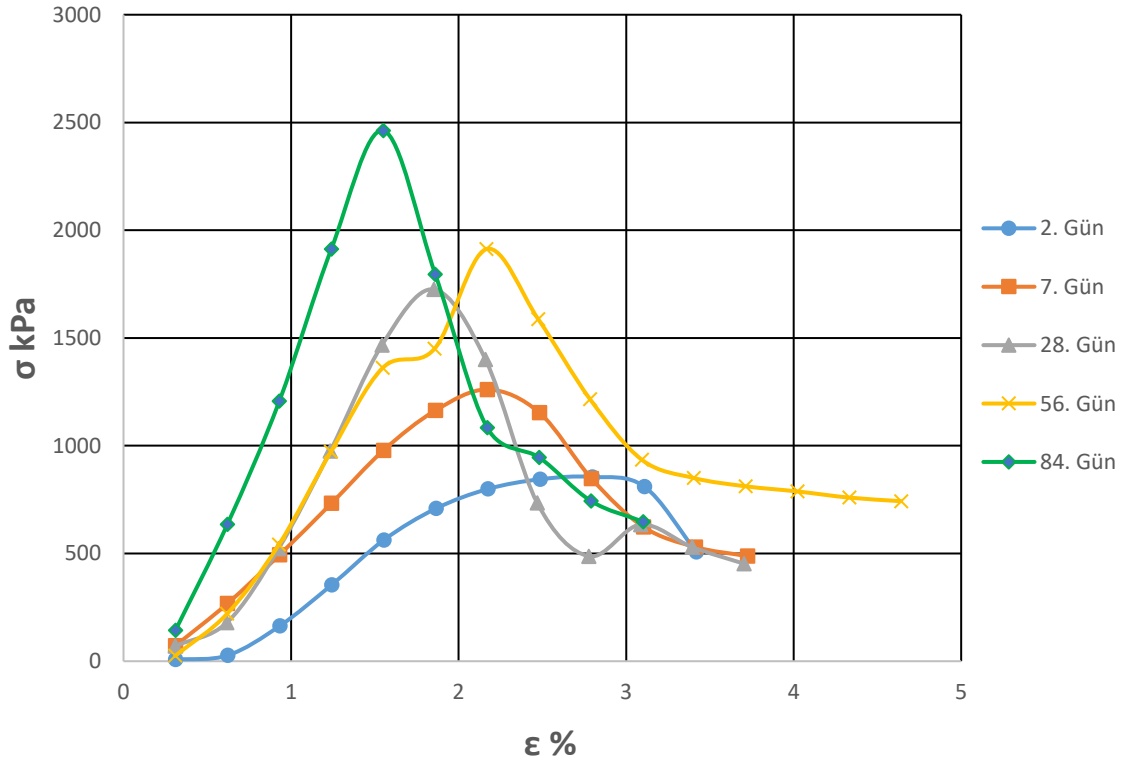
4.6.2. Kireç, Uçucu Kül ve Atık Lastik Katkılı Numuneler

Kireç ve uçucu kül katkıli numunelerde optimum oranın bulunmasının ardından, atık lastik içerikli kompozitlerin üretilmesine başlanmıştır. Bu süreçte uçucu kül katkısı %15 ile sınırlandırılmış, karışımlara %0.5, %1 ve %1.5 oranında atık lastik ilave edilmiş, sonrasında numuneler 2, 7, 28, 56 ve bazı numunelerde 84 güne kadar küre tabii tutulmuştur.

Şekil 4.25'te $S_{90.5}L_6FA_3RP_{0.5}$ karışımının serbest basınç deneyi sonuçları gösterilmektedir. Grafiğe göre kireç ve uçucu kül ile yapılan iyileştirmeden farklı olarak, 28 gün sonunda elde edilen dayanım, 56 gün sonunda elde edilenden yüksek çıkmıştır. Bu duruma, malzemenin içindeki fiziksel mekanizmalardan ziyade, reaksiyonlar sonucu oluşan stabil olmayan bir fazın sebep olduğu düşünülmektedir (Al-Subari vd., 2021).

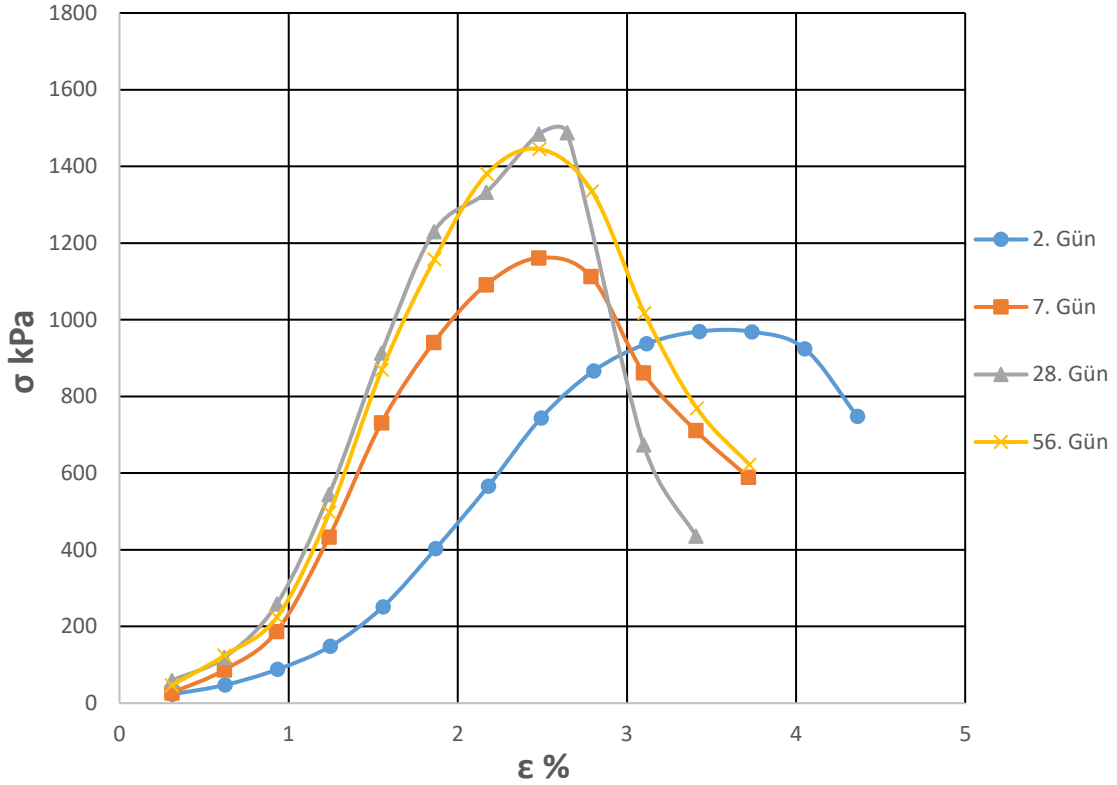


Şekil 4.25. $S_{90.5}L_6FA_3RP_{0.5}$ karışımının 2, 7, 28 ve 56 gün kür uygulanmış serbest basınç dayanımları



Şekil 4.26. $S_{90}L_6FA_3RP_1$ karışımının 2, 7, 28, 56 ve 84 gün kür uygulanmış serbest basınç dayanımları

Karışıma %1 oranında atık lastik ilave edildiğinde ise kireç ve uçucu kül ile iyileştirilen karışımlara benzer olarak, artan kür süresiyle dayanımda da artış yaşanmıştır. Bu durum yapılan önceki çıkarımın aksine, karışımdaki atık lastik oranına bağlı olarak malzemenin mekanik davranışının değiştiğine işaret ediyor olabilir (Şekil 4.26).



Şekil 4.27. $S_{89.5}L_6FA_3RP_{1.5}$ karışımının 2, 7, 28 ve 56 gün kür uygulanmış serbest basınç dayanımları

Yapılan deneyler sonucunda %6 kireç %3 uçucu kül ve lastik içerikli karışımlarda, en iyi 56 günlük dayanıma $S_{90}L_6FA_3RP_1$ karışımında rastlanmıştır. Ancak bu karışımın 56 günlük dayanımı kireç ve uçucu kül kullanılarak yapılan iyileştirmeden daha kötü performans sergilemiştir. Pozitif bir sonuç olarak ise bu kompozit yalnızca kireç ve uçucu kül içeren karışıma kıyasla daha yüksek 28 günlük dayanıma sahiptir. 56 günlük sonuçların elde edilmesinden sonra, %1 katkılı karışımın devam eden kür ile nasıl bir performans sergileyeceği sorgulanmıştır. Bu nedenle yeni numuneler hazırlanmış ve 84 gün kür numuneler üzerinde uygulanmıştır. Sonuç olarak kompozitin dayanımı 56 günlük küre kıyasla %28.76 oranında artmış ve yalnızca kireç ve uçucu kül ile yapılan iyileştirmeye oldukça yaklaşmıştır. Yaşanan bu durumun atık lastik ilavesinin, geç

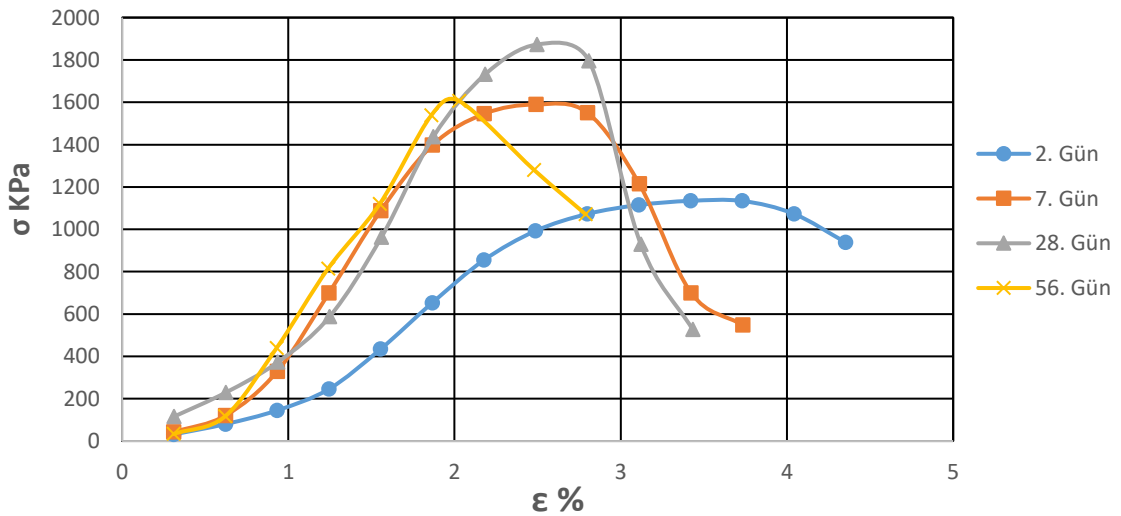
dönemli puzolanik reaksiyon ürünlerinin oluşmasını yavaşlatması ile açıklanabileceği düşünülmektedir (Çizelge 4.6).

Çizelge 4.6. %6 kireç %3 uçucu kül ve atık lastik katkıli kompozitlerin serbest basınç dayanımları

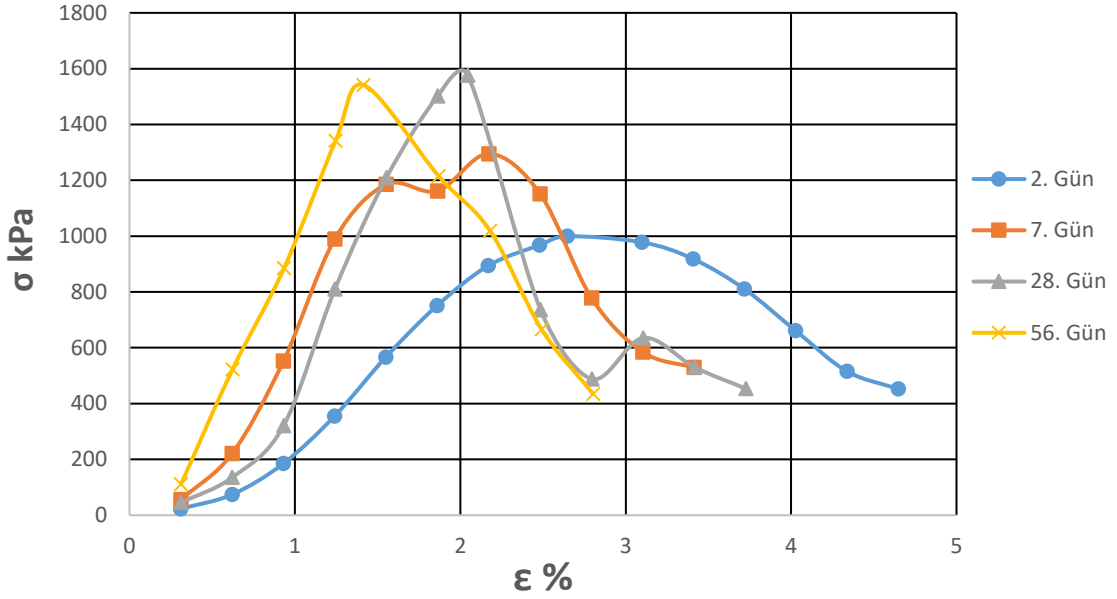
Karışımlar	Kür süresi (gün)				
	2.gün q_u (kPa)	7.gün q_u (kPa)	28.gün q_u (kPa)	56.gün q_u (kPa)	84.gün q_u (kPa)
$S_{100}L_0FA_0RP_0$	357	-	-	-	-
$S_{94}L_6FA_0RP_0$	1037.31	1157.06	1365.27	1632.71	-
$S_{91}L_6FA_3RP_0$	916.28	1302.14	1638.57	2669.22	-
$S_{90.5}L_6FA_3RP_{0.5}$	659.27	966	1612	1557	-
$S_{90}L_6FA_3RP_1$	855	1260	1725	1912	2462
$S_{89.5}L_6FA_3RP_{1.5}$	969	1161	1487	1444	-

Sonuç olarak $S_{90.5}L_6FA_3RP_{0.5}$ içerikli karışım, yalnızca kireç ile yapılan iyileştirmeye kıyasla %17,15 oranda daha yüksek 56 günlük dayanıma sahiptir. Ayrıca 56 gün sonrasında, artan kür süresiyle birlikte yalnızca kireç ve uçucu kül kullanılarak yapılan iyileştirmeye kıyasla daha fazla dayanım kazanmıştır.

%6 kireç %6 uçucu içerikli karışımlara %0.5 oranında atık lastik eklendiğinde, $S_{90.5}L_6FA_3RP_{0.5}$ içerikli karışıma benzer bir davranış sergilediği görülmüştür. 28 gün sonunda ulaşılan dayanım değeri, 56 günlüğe kıyasla daha yüksek bir değere ulaşmıştır. Kireç ve uçucu kül ile yapılan iyileştirmeye kıyasla 28 ve 56 günlük dayanımlarda ciddi bir düşüş göze çarpmaktadır. Ancak erken dayanımda ise kompozit malzeme daha iyi bir performans sergilemiştir (Şekil 4.28).

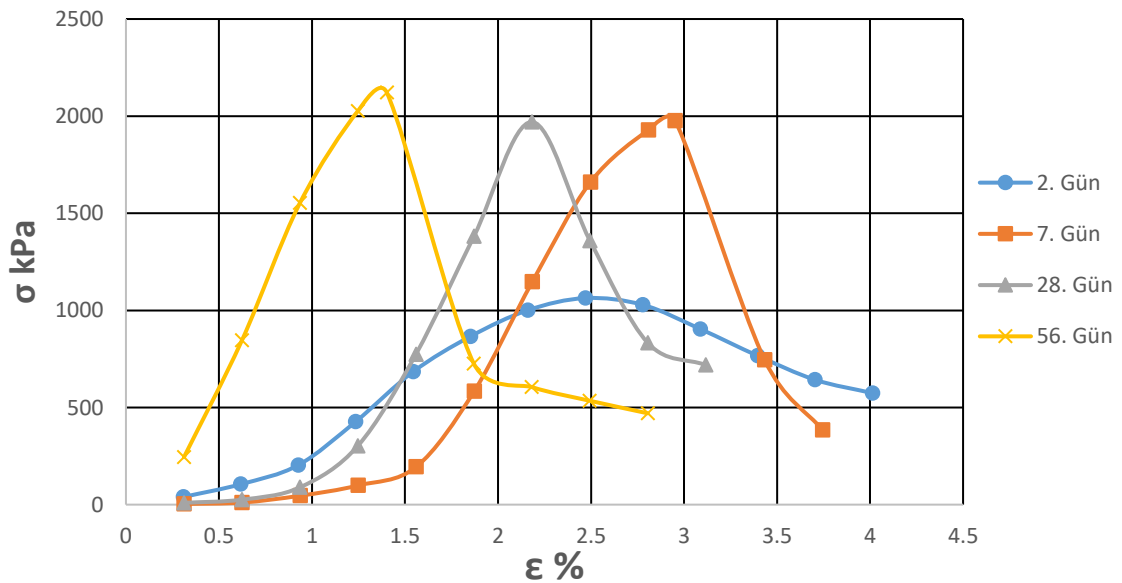


Şekil 4.28. $S_{87.5}L_6FA_6RP_{0.5}$ karışımının 2, 7, 28 ve 56 gün kür uygulanmış serbest basınç dayanımları



Şekil 4.29. $S_{87}L_6FA_6RP_1$ karışımının 2, 7, 28 ve 56 gün kür uygulanmış serbest basınç dayanımları

2 ve 7 günlük dayanımlarda lastik katkılı kompozitlerin, kireç ya da kireç ve uçucu kül ile yapılan iyileştirmelere kıyasla daha yüksek dayanıma sahip olduğu, 28 ve 56 günlük dayanımlarda ise kirece göre daha iyi performans sergilediği ancak kireç ve uçucu kül katkılı karışımların gerisinde kaldığı görülmüştür. Atık lastik katkılı kompozitler arasında en iyi 7, 28 ve 56 günlük dayanımı $S_{86.5}L_6FA_6RP_{1.5}$ içerikli karışımın gösterdiği belirlenmiştir (Çizelge 4.7).

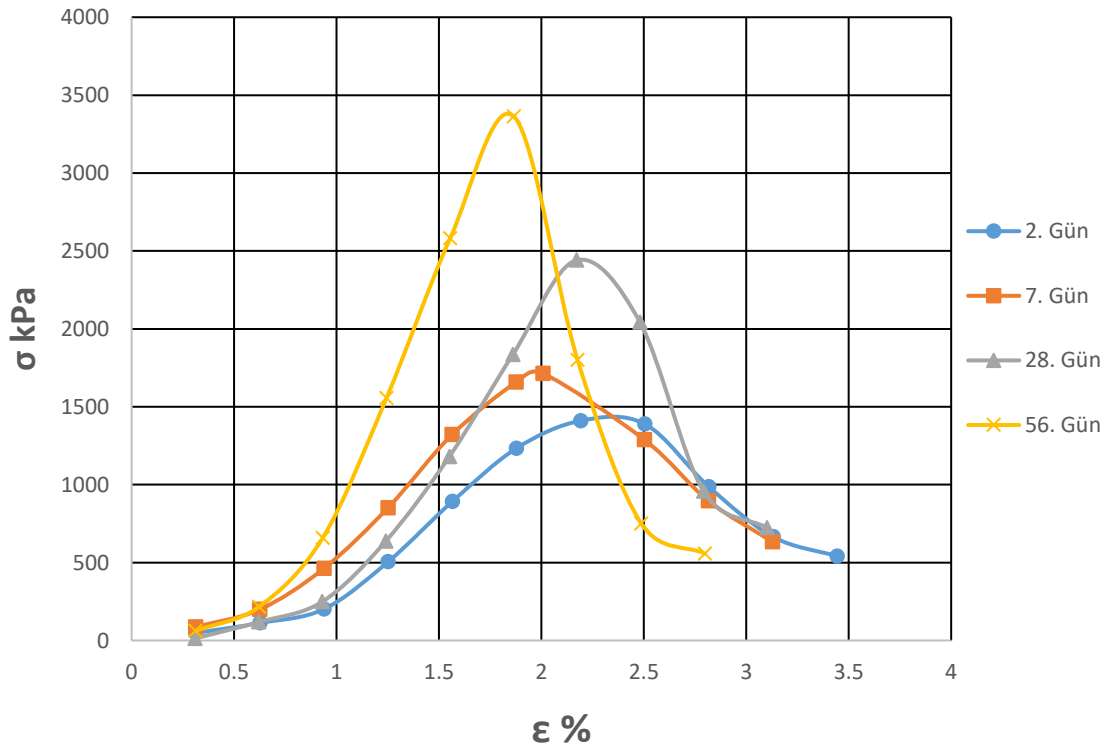


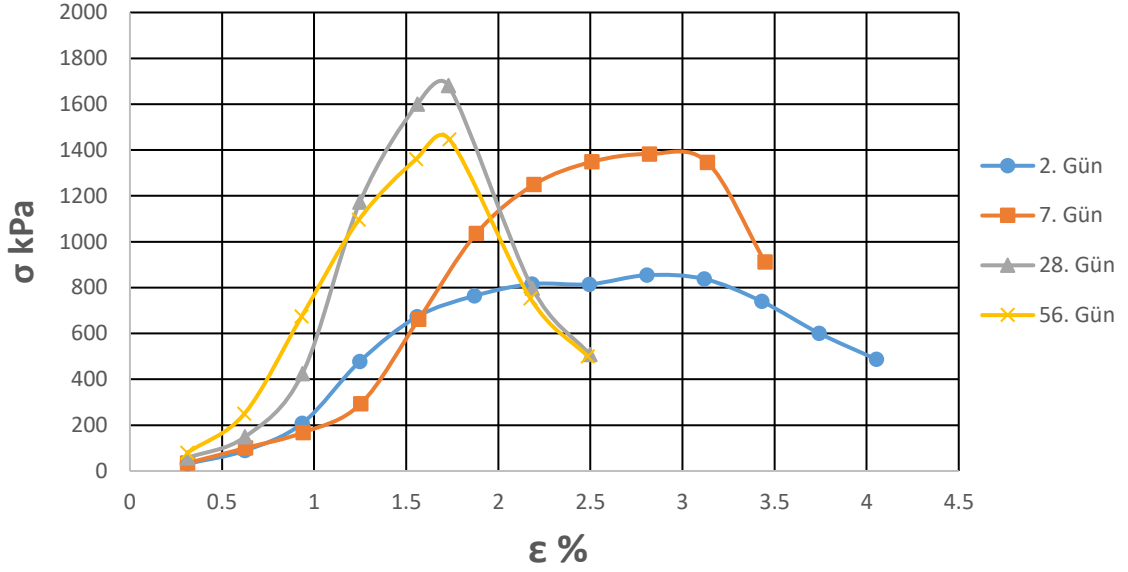
Şekil 4.30. $S_{86.5}L_6FA_6RP_{1.5}$ karışımının 2, 7, 28 ve 56 gün kür uygulanmış serbest basınç dayanımları

Çizelge 4.7. %6 kireç %6 uçucu kül ve atık lastik katkıli kompozitlerin serbest basınç dayanımları

Karışımlar	Kür süresi (gün)			
	2.gün q_u (kPa)	7.gün q_u (kPa)	28.gün q_u (kPa)	56.gün q_u (kPa)
$S_{100}L_0FA_0RP_0$	357	-	-	-
$S_{94}L_6FA_0RP_0$	1037.31	1157.06	1365.27	1632.71
$S_{88}L_6FA_6RP_0$	935.72	1025.75	2184.42	3095.78
$S_{87.5}L_6FA_6RP_{0.5}$	1134	1589	1872	1606
$S_{87}L_6FA_6RP_1$	999	1294	1576	1541
$S_{86.5}L_6FA_6RP_{1.5}$	1063	1977	1970	2121

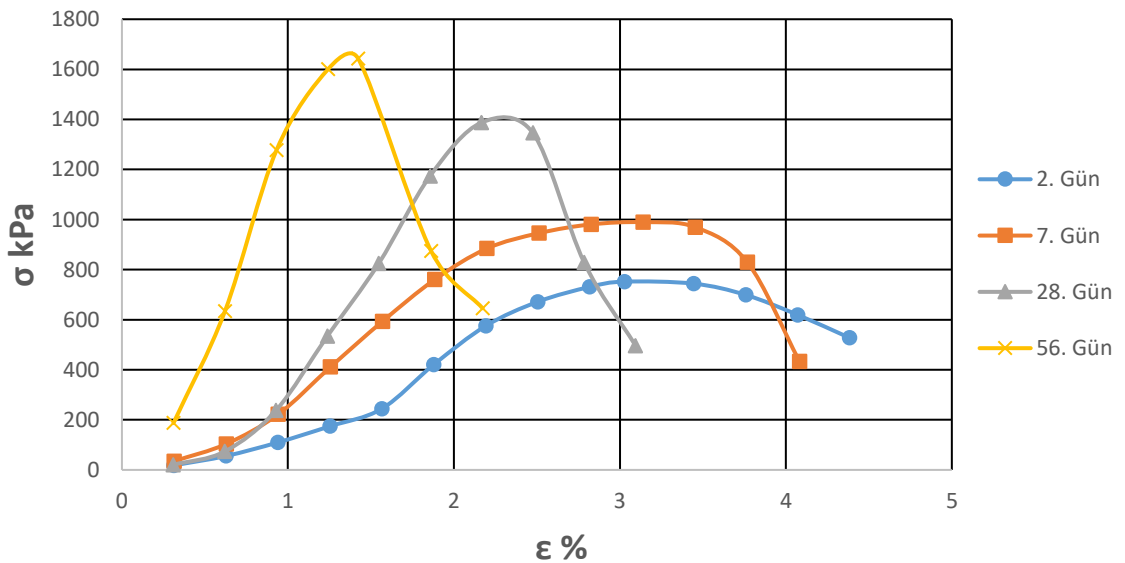
%6 Kireç ve %9 uçucu kül içerikli karışımlara %0.5 oranında atık lastik ilave edildiğinde, ele alınan önceki kompozitlerden farklı olarak, artan kür süresiyle birlikte dayanımında istikrarlı bir artış gözlemlenmiştir. Ayrıca atık lastik ilavesiyle birlikte, kireç ve uçucu kül kullanılarak yapılan iyileştirmeye kıyasla, ilk defa daha yüksek 56. gün dayanımı elde edilmiştir. $S_{84.5}L_6FA_9RP_{0.5}$ içerikli kompozit, $S_{85}L_6FA_9RP_0$ içerikli karışıma göre %22.7 daha yüksek 56. gün dayanımına sahiptir. Buna ek olarak atık lastik katkısı pik öncesi şekil değiştirmeyi %11.37 oranında arttırmış, malzemeyi daha sünek hale getirmiştir (Şekil 4.31).

Şekil 4.31. $S_{84.5}L_6FA_9RP_{0.5}$ karışımının 2, 7, 28 ve 56 gün kür uygulanmış serbest basınç dayanımları



Şekil 4.32. $S_{84}L_6FA_9RP_1$ karışımının 2, 7, 28 ve 56 gün kür uygulanmış serbest basınç dayanımları

28 gün kür sonrası dayanımında düşüş yaşanması durumu $S_{84}L_6FA_9RP_1$ içerikli kompozitte de yaşanmıştır. Bu kompozit 56 günlük dayanım açısından da kötü bir performans sergilemiş ve yalnızca kireç ile yapılan iyileştirmeye göre daha düşük dayanım göstermiştir. Buna karşın $S_{83.5}L_6FA_9RP_{1.5}$ içerikli karışımda beklendiği gibi artan kür süresiyle birlikte dayanımda artmıştır. Söz konusu 56 günlük dayanım olduğunda bu kompozit, küçük bir yükselişle daha iyi bir dayanım elde etmiştir (Şekil 4.32 ve Şekil 4.33).

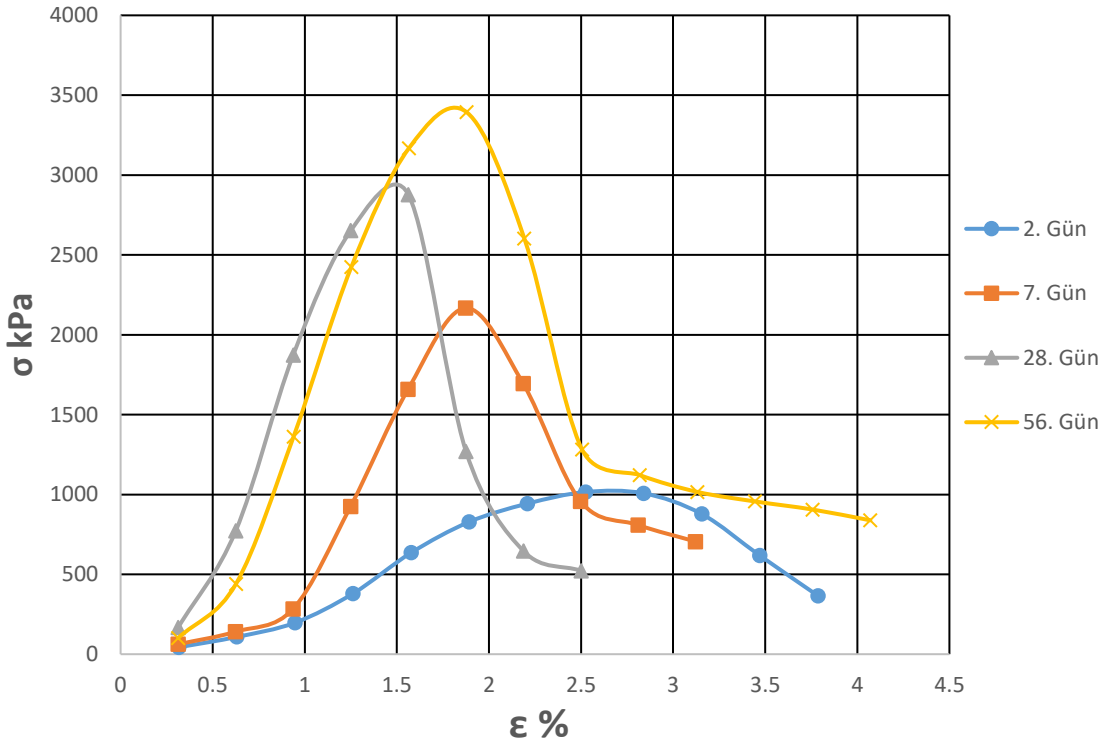


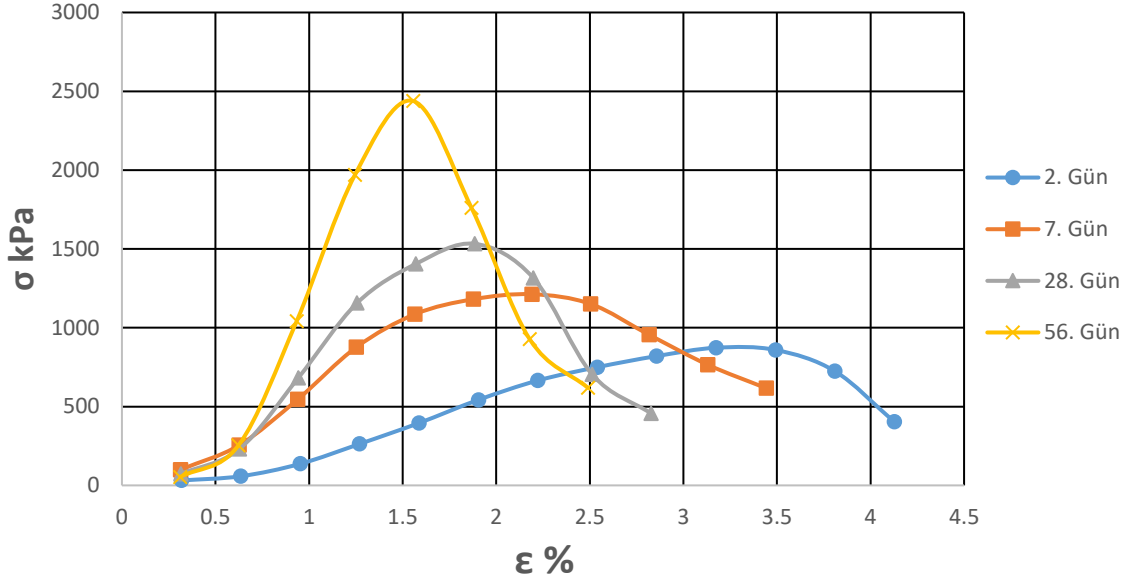
Şekil 4.33. $S_{83.5}L_6FA_9RP_{1.5}$ karışımının 2, 7, 28 ve 56 gün kür uygulanmış serbest basınç dayanımları

Çizelge 4.8. %6 kireç %9 uçucu kül ve atık lastik katkıli kompozitlerin serbest basınç dayanımları

Karışımlar	Kür süresi (gün)			
	2.gün q_u (kPa)	7.gün q_u (kPa)	28.gün q_u (kPa)	56.gün q_u (kPa)
$S_{100}L_0FA_0RP_0$	357	-	-	-
$S_{94}L_6FA_0RP_0$	1037.31	1157.06	1365.27	1632.71
$S_{85}L_6FA_9RP_0$	1200.41	2366.92	2504.53	2740.94
$S_{84.5}L_6FA_9RP_{0.5}$	1410	1714	2440	3363
$S_{84}L_6FA_9RP_1$	853	1382	1680	1446
$S_{83.5}L_6FA_9RP_{1.5}$	752	989	1387	1643

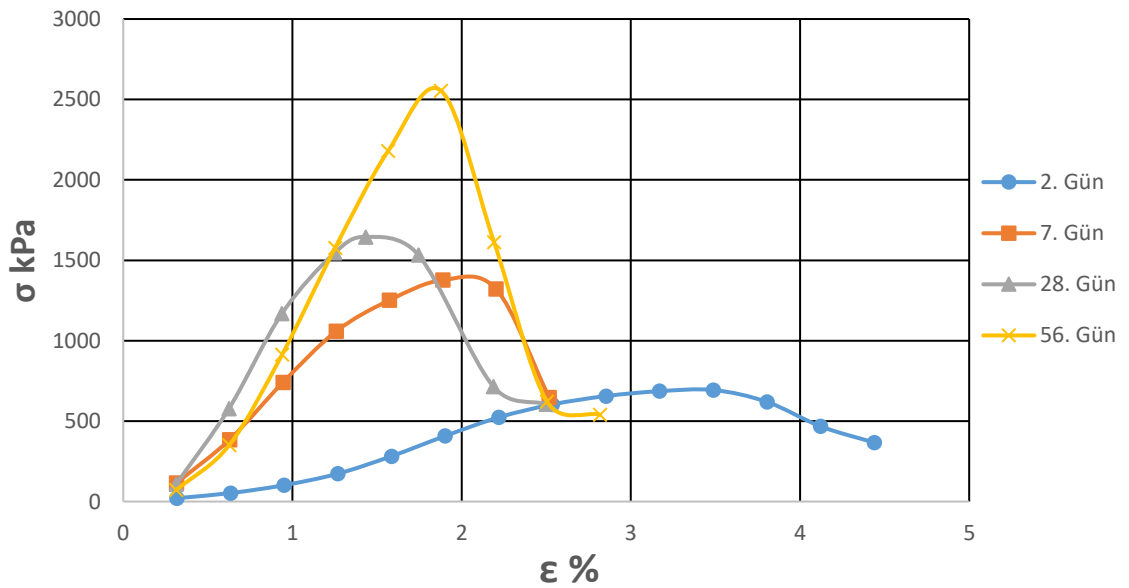
%6 kireç ve %12 uçucu kül içerikli karışıma, %0.5 oranında atık lastik ilave edildiğinde, lastik içerikli kompozitler arasındaki en yüksek 56. gün dayanıma ulaşılmıştır. Ayrıca bu kompozit malzeme yalnızca kireç ve uçucu kül kullanılarak hazırlanan karışıma kıyasla, %5.99 daha yüksek 56. gün dayanıma sahiptir. Atık lastik ilavesi yalnızca dayanımı iyileştirmemiş, aynı zamanda pik öncesi şekil değiştirme miktarını da %19,16 oranında arttırmış, malzeme daha sünek hale gelmiştir (Şekil 4.34).

**Şekil 4.34.** $S_{83.5}L_6FA_9RP_{1.5}$ karışımının 2, 7, 28 ve 56 gün kür uygulanmış serbest basınç dayanımları



Şekil 4.35. $S_{81}L_6FA_{12}RP_1$ karışımının 2, 7, 28 ve 56 gün kür uygulanmış serbest basınç dayanımları

$S_{81}L_6FA_{12}RP_1$ ve $S_{80.5}L_6FA_{12}RP_{1.5}$ içerikli kompozitler benzer 7, 28 ve 56. gün dayanımları göstermişlerdir. Karışımlar artan kür süresiyle birlikte, istikrarlı olarak dayanım kazanmışlardır. Her iki karışımda kireç ve uçucu kül ile yapılan iyileştirmeye kıyasla daha düşük 56. gün dayanıma sahiptirler. Buna karşın yalnızca kireç içeren karışıma kıyasla, sırasıyla %49,3 ve %56,43 daha yüksek 56. gün dayanımı sergilemişlerdir (Şekil 4.35 ve Şekil 4.36).

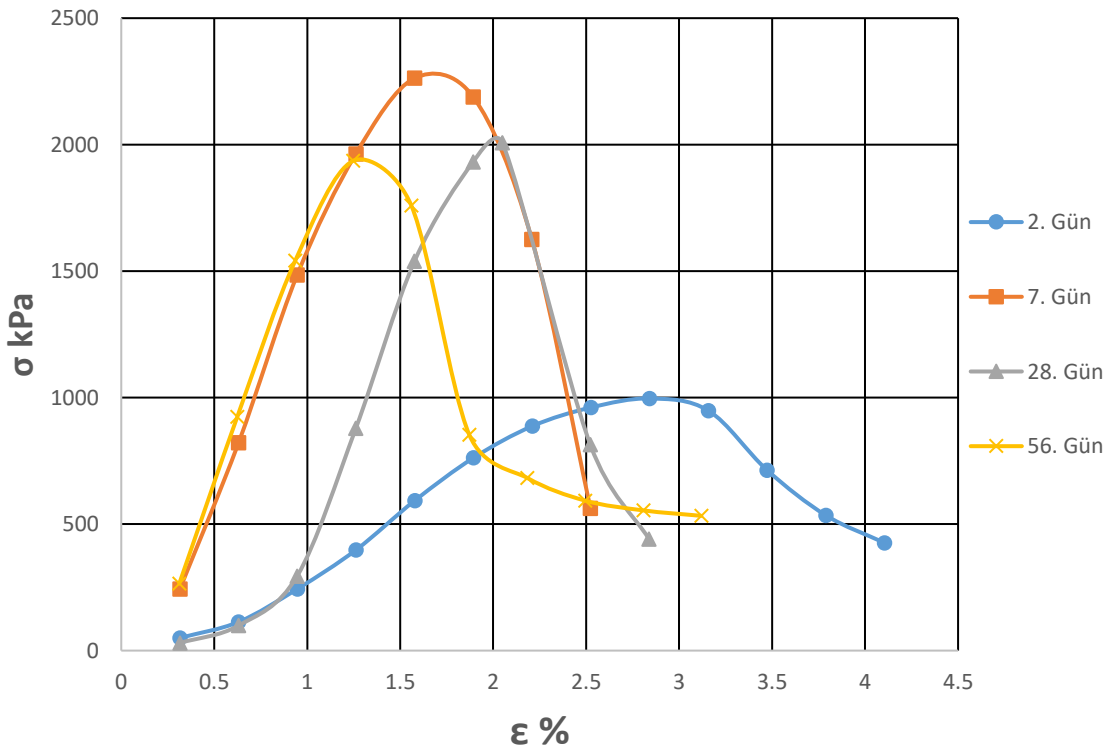


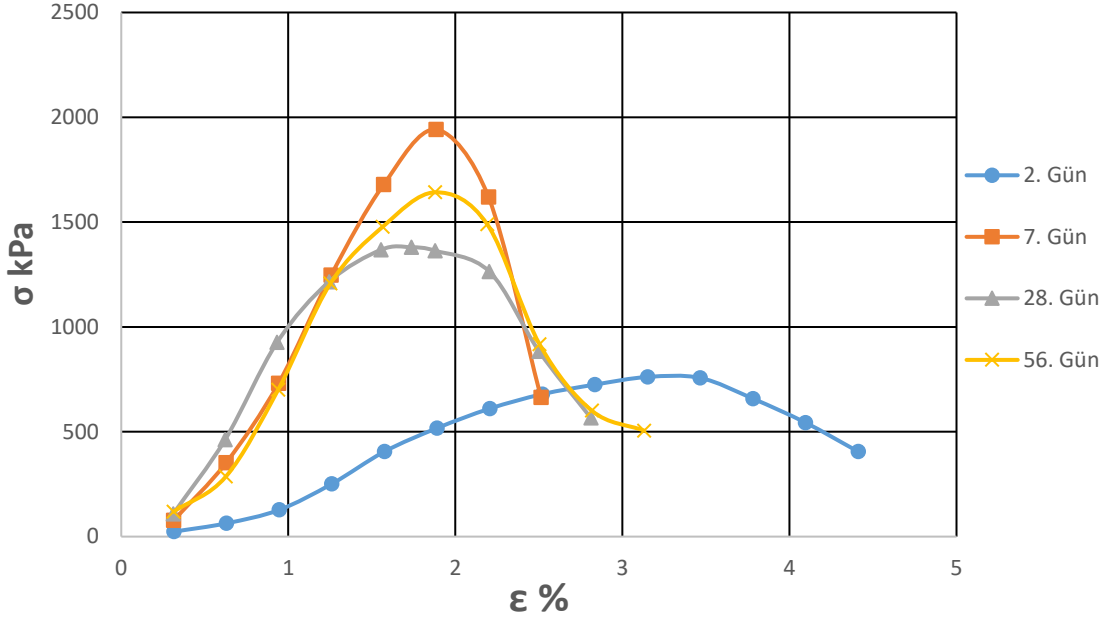
Şekil 4.36. $S_{80.5}L_6FA_{12}RP_{1.5}$ karışımının 2, 7, 28 ve 56 gün kür uygulanmış serbest basınç dayanımları

Çizelge 4.9. %6 kireç %12 uçucu kül ve atık lastik katkıli kompozitlerin serbest basınç dayanımları

Karışımlar	Kür süresi (gün)			
	2.gün q_u (kPa)	7.gün q_u (kPa)	28.gün q_u (kPa)	56.gün q_u (kPa)
$S_{100}L_0FA_0RP_0$	357	-	-	-
$S_{94}L_6FA_0RP_0$	1037.31	1157.06	1365.27	1632.71
$S_{82}L_6FA_{12}RP_0$	702.17	1501.033	2125.14	3201.02
$S_{81.5}L_6FA_{12}RP_{0.5}$	1015	2167	2877	3393
$S_{81}L_6FA_{12}RP_1$	873	1212	1532	2438
$S_{80.5}L_6FA_{12}RP_{1.5}$	693	1377	1645	2553

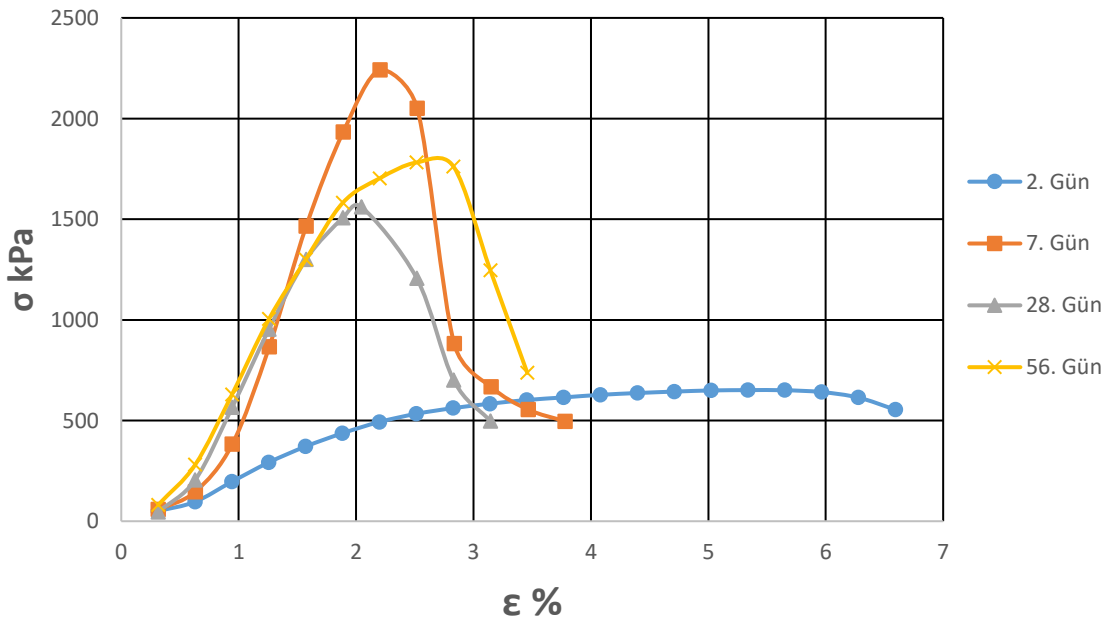
%6 kireç ve %15 uçucu kül içeren karışıma, %0.5, %1 ve %1.5 oranında atık lastik eklendiğinde, kireç ve uçucu kül ile hazırlanan karışıma kıyasla 56. gün dayanımında ciddi düşüşler gözlenmiştir. Bu içerikte hazırlanan tüm kompozitler beklenmedik şekilde, 7 gün kürün ardından en yüksek dayanımları sergilemişler, devam eden kür süresince dayanımda düşüş yaşamışlardır. Bu duruma daha önce bahsedilen stabil olmayan ara faz ürünlerinin sebep olduğu düşünülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, bu noktadan sonra kompozitlerin kimyasal ve mekanik işleyişlerinin oldukça farklı davranmaya başladığı söylenebilir (Şekil 4.37, Şekil 4.38 ve Şekil 4.39).

Şekil 4.37. $S_{78.5}L_6FA_{15}RP_{0.5}$ karışımının 2, 7, 28 ve 56 gün kür uygulanmış serbest basınç dayanımları



Şekil 4.38. $S_{78}L_6FA_{15}RP_1$ karışımının 2, 7, 28 ve 56 gün kür uygulanmış serbest basınç dayanımları

Atık lastik ilavesiyle birlikte, yalnızca dayanımda değil malzemenin sünekliğinde de ciddi düşüş yaşanmıştır. Pik öncesi şekil değiştirmede $S_{78.5}L_6FA_{15}RP_{0.5}$ içerikli kompozit, $S_{79}L_6FA_{15}RP_0$ içerikli karışıma kıyasla, 56 gün kür süreli numunelerde %124,5 daha az şekil değiştirmiştir. Bir diğer deyişle %124,5 daha erken dayanımını kaybetmiş ve kırılmıştır (Şekil 4.37).



Şekil 4.39. $S_{77.5}L_6FA_{15}RP_{1.5}$ karışımının 2, 7, 28 ve 56 gün kür uygulanmış serbest basınç dayanımları

Çizelge 4.10. %6 kireç %15 uçucu kül ve atık lastik katkıli kompozitlerin serbest basınç dayanımları

Karışımlar	Kür süresi (gün)			
	2.gün q_u (kPa)	7.gün q_u (kPa)	28.gün q_u (kPa)	56.gün q_u (kPa)
$S_{100}L_0FA_0RP_0$	357	-	-	-
$S_{94}L_6FA_0RP_0$	1037.31	1157.06	1365.27	1632.71
$S_{79}L_6FA_{15}RP_0$	585.62	1550.28	1939.24	4094.79
$S_{78.5}L_6FA_{15}RP_{0.5}$	996	2262	2007	1936
$S_{78}L_6FA_{15}RP_1$	761	1941	1380	1642
$S_{77.5}L_6FA_{15}RP_{1.5}$	651	2241	1561	1781

Çizelge 4.11’de farklı ülke standartlarına göre bir malzemenin sıkıştırılmış toprak, yollarda ise temel ve alt temel olarak kullanılabilmesi için sahip olması gereken en düşük serbest basınç deneyleri gösterilmektedir. Sonuçlara göre atık lastik katkıli kompozitler ve kireç- uçucu kül katkıli karışımlar çizelgedeki birçok standardın gerekliliklerini karşılamaktadır.

Çizelge 4.11. Yollarda temel-alt temel ve sıkıştırılmış toprak için minimum UCS değerleri (Al-Subari vd., 2021)

Ülke	Standart Kaynağı	Serbest Basınç Dayanımı (MPa)		
		Sıkıştırılmış zemin	Yol alt temel	Yol temeli
USA	Standard Specifications for Construction of Roads and Bridges on Federal Highway Projects		1.4	
USA	Soil Cement Laboratory Handbook		2.07	5.52
Güney Afrika	Pavement Engineering Manual		2-4	4-8
Birleşik Krallık	Stabilized materials for civil engineering purposes, General requirements		2.5-4.5	4.5-7.5
Birleşik Krallık	British practice in the design and specification of cement-stabilized bases and sub-bases for roads		1.7	3.5
Avustralya	Transport and Main Roads Specifications.		Min. 3	
Çin	Technical specifications for construction of highway roadbases.		>2	>4
Yeni Zelanda	Cement Stabilization		Min. 3	
Türkiye	Turkish Highway Technical Specification			3.43-5.39
Avustralya	The Australian earth building handbook	0.4-0.6		
Avustralya	Bulletin 5. “Earth wall construction	0.25		
Yeni Zelanda	The New Zealand Standard for engineering design of earth buildings	0.5		
USA	New Mexico Earthen Building Materials Code.	1.38		

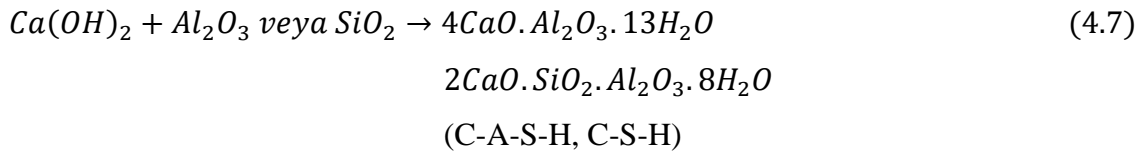
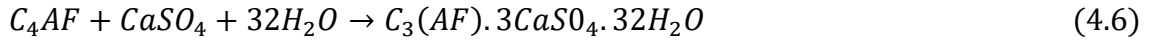
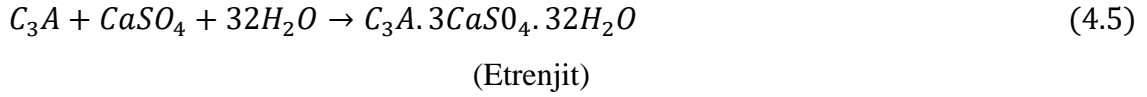
4.7. Mikroyapı Test Sonuçları

Çalışma kapsamında hazırlanan karışımların kimyasal yapılarını, mineral içeriklerini ve mikro seviyedeki kompozisyonlarını belirlemek amacıyla XRF, XRD ve SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. Kireç ve uçucu kül kullanılarak yapılan zemin iyileştirmesinde, zeminin dayanım kazanmasında etkili olan faktörün puzolanik reaksiyonlar olduğu bilinmektedir. Çimentonun hidratasyonu süresince yaşanan reaksiyonların benzerleri, kireç ve uçucu kül içerikli karışımlarda da gerçekleşmektedir. Çimentonun içeriği incelendiğinde, malzemenin %85'inden fazlasının kalsiyum ve silisyum oksitten (CaO ve SiO₂) oluştuğu görülmektedir (Parisatto vd., 2015). Benzer olarak bu çalışmada kullanılan zemin, kireç ve uçucu külün de ağırlıklı olarak kalsiyum ve silisyum oksitten meydana geldiği yapılan XRF deneyleri sonucu belirlenmiştir. Kimyasal yapıdaki benzerlikler göz önüne alındığında benzer reaksiyonların gözlemlenmesi şaşırtıcı bir sonuç değildir. Çizelge 4.12'de tez kapsamında kullanılan zeminin, kirecin ve uçucu külün oksit içerikleri standart bir çimento numunesiyle kıyaslanmıştır.

Çizelge 4.12. XRF deney sonuçları

Temel Oksitler	Çimento	Kireç	Uçucu Kül	Zemin
CaO	64.65	91.2	5.18	7.01
SiO ₂	21.01	0.162	49.2	40.5
Al ₂ O ₃	4.75	0.0843	13.2	8.01
Fe ₂ O ₃	2.37	0.0697	10.9	9.99
MgO	1.93	1.21	3.63	8.53

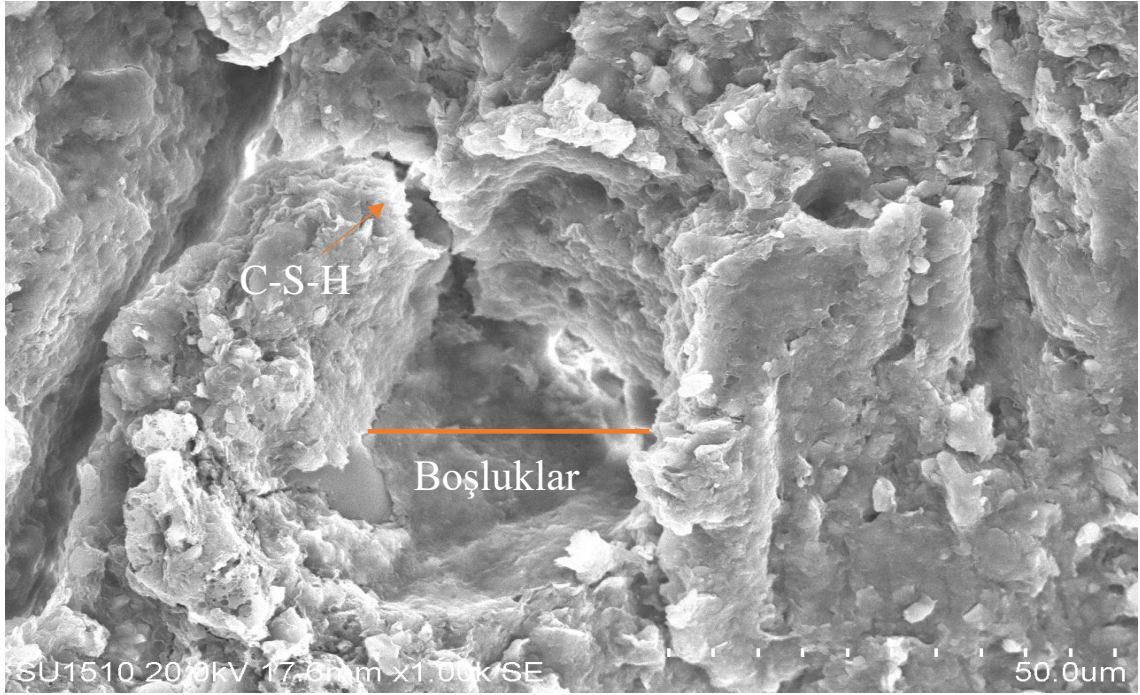
Zemine kireç ve uçucu kül katkılarının eklenmesiyle ortaya çıkan reaksiyonların, kavranabilmesi amacıyla çimentonun hidratasyon sürecinin incelenmesi faydalı olacaktır. Çimento ile suyun reaksiyonu, çimentonun suyun içerisinde kısmı olarak çözünmesiyle başlamaktadır. Su ile çözünen bu bileşikler farklı oranlarda ve hızlarda reaksiyona girmektedirler. Reaksiyonlar sonucu oluşan yeni ürünler ise çimentonun dayanım kazanmasında ana rolü oynamaktadır. Çimentoda temel olarak iki ana bileşen bulunmaktadır. Bunlar kalsiyum silikatlar (C₃S – C₂S) ve kalsiyum aluminatlarıdır (C₃A – C₄AF). Çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan reaksiyonlar ve ürünler aşağıda gösterilmektedir.



C-S-H çimentoya bağlayıcılık özelliği kazandıran ve malzemeyi oluşturan taneleri bir arada tutan reaksiyon ürünüdür. Çimentoda hidrate olan ürünlerin yaklaşık %60'ını C-S-H oluşturmaktadır. C-H (kireç) dayanıma etkisi olmayan bir malzeme olup, zayıf yapısı ve taneler arasındaki aderansı azaltıcı etkisi nedeniyle istenmeyen bir reaksiyon ürünüdür.

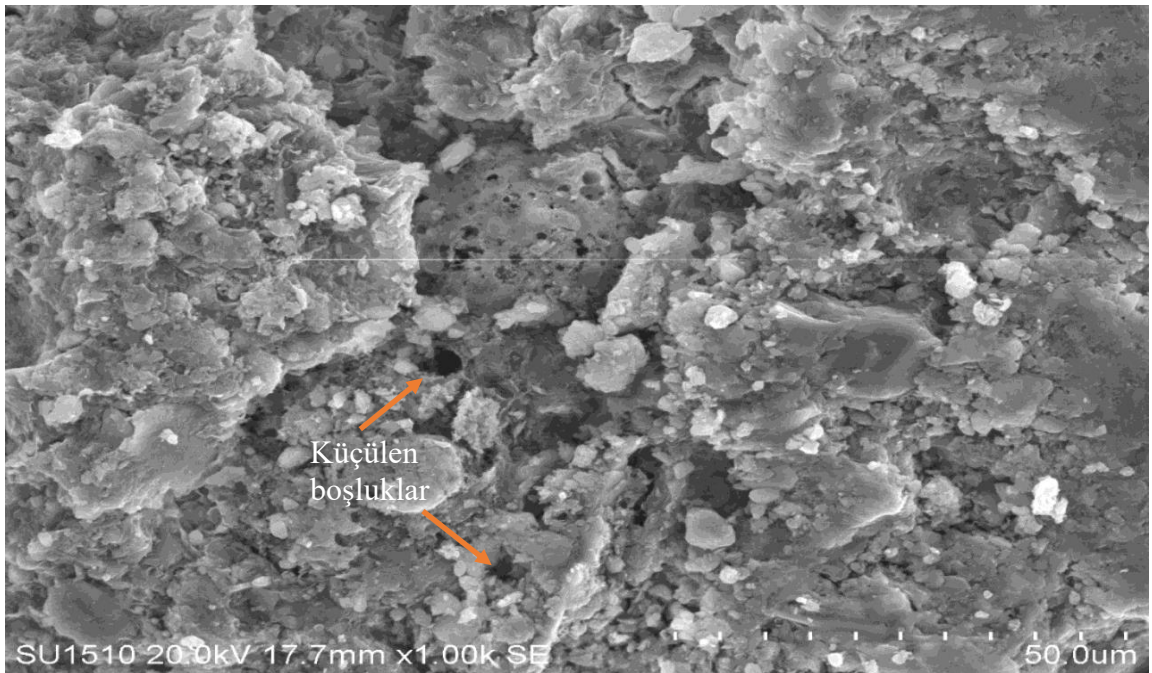
Artan uçucu kül oranının, kireç-uçucu kül katkılı karışımlar üzerindeki etkisini anlamak için karışımlar üzerinde SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. Karışımlar 56 günlük kür süresinin ardından etüvde kurutulmuş ve deneye tabii tutulmuştur. Yapılan deneyler sonucunda artan uçucu kül miktarıyla bağlantılı olarak karışımlardaki C-S-H oranının arttığı, bu artışa bağlı olarak dayanımda iyileşme yaşandığı gözlemlenmiştir. SEM görüntülerinde açık beyaz renk olarak gözüken yapılar hidratasyon ürünlerini temsil etmektedir. Ayrıca düşük uçucu kül içerikli karışımlarda, malzemedeki büyük boşluklar göze çarpmaktadır. Karışımdaki uçucu kül oranı kademeli olarak arttırıldığında, görüntülerdeki dairesel boşlukların giderek küçüldüğü tespit edilmiştir. Burada artan puzolanik reaksiyonlar sonucu, boşlukların reaksiyon ürünleriyle doldurulduğu düşünülmektedir.

Görüntüler incelendiğinde hidrate olmamış uçucu kül varlığı tespit edilememiştir. Bu sonuca göre kompaksiyon deneyi sonucu bulunan, optimum su muhtevası değerlerinin karışımlardaki hidratasyon reaksiyonları için yeterli miktarda olduğu sonucuna varılabilir.

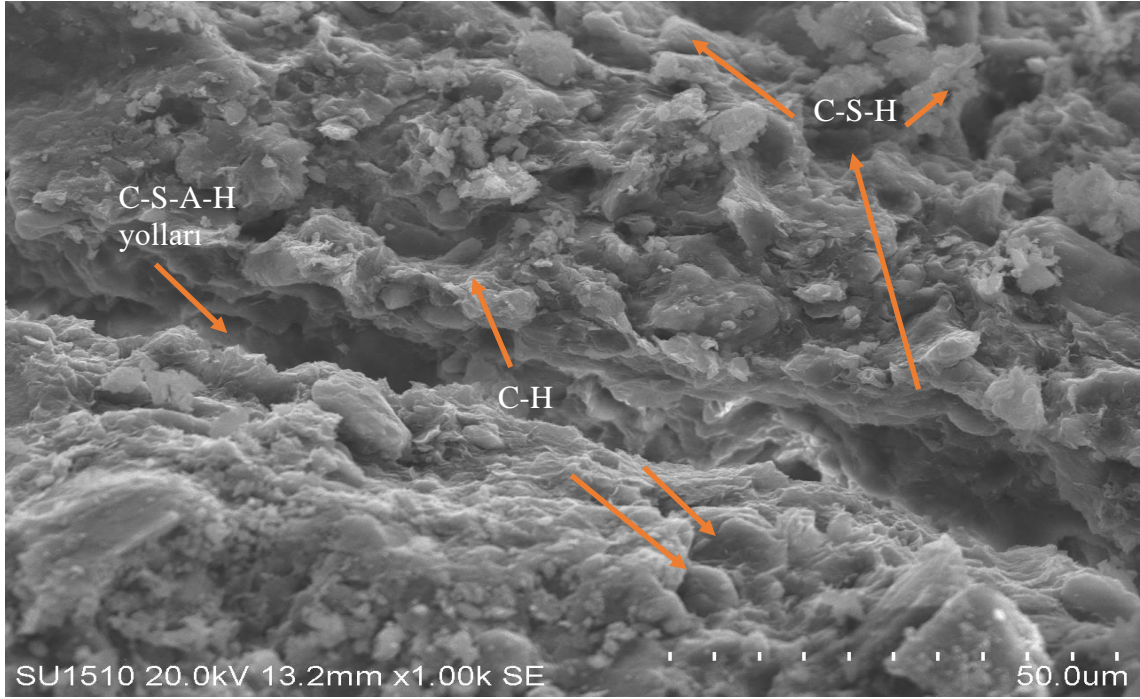


Şekil 4.40. $S_{91}L_6FA_3RP_0$ içerikli karışımın 56 gün kür sonrası SEM görüntüsü

$S_{91}L_6FA_3RP_0$ ve $S_{88}L_6FA_6RP_0$ içerikli karışımların SEM görüntüleri kıyaslandığında, %3 uçucu kül artışıyla birlikte malzemedeki boşlukların azaldığı ve daha kompakt hale geldiği söylenebilir. Bu sonuç serbest basınç deneyi çıktılarıyla uyumlu gözükmektedir (Şekil 4.40, Şekil 4.41).

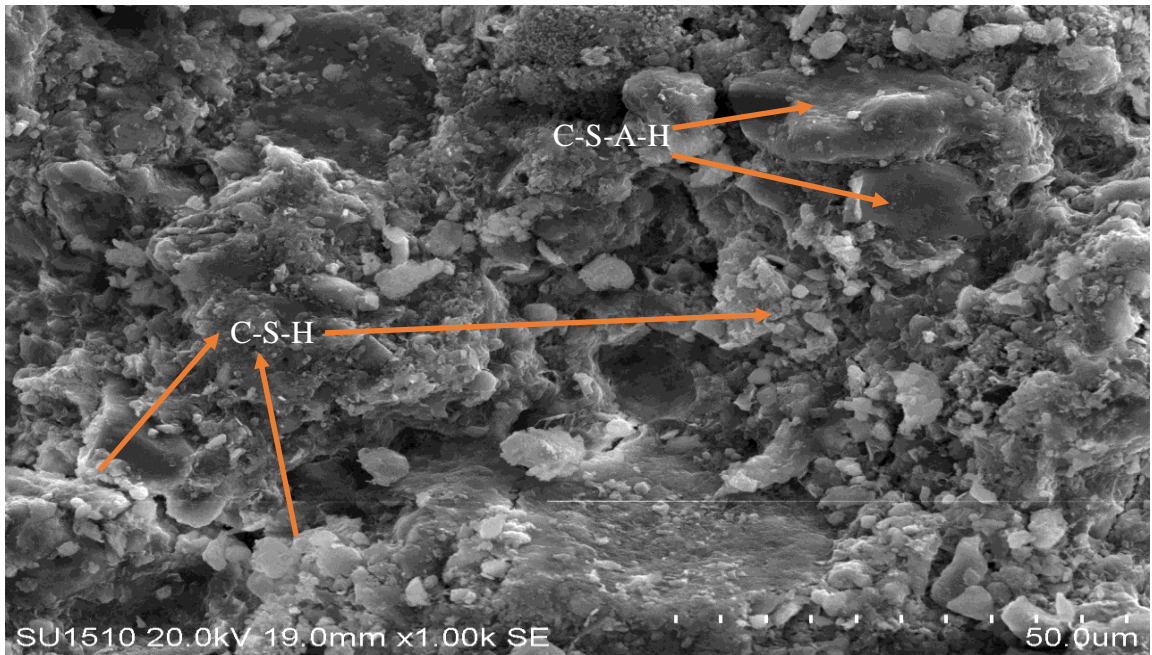


Şekil 4.41. $S_{88}L_6FA_6RP_0$ içerikli karışımın 56 gün kür sonrası SEM görüntüsü



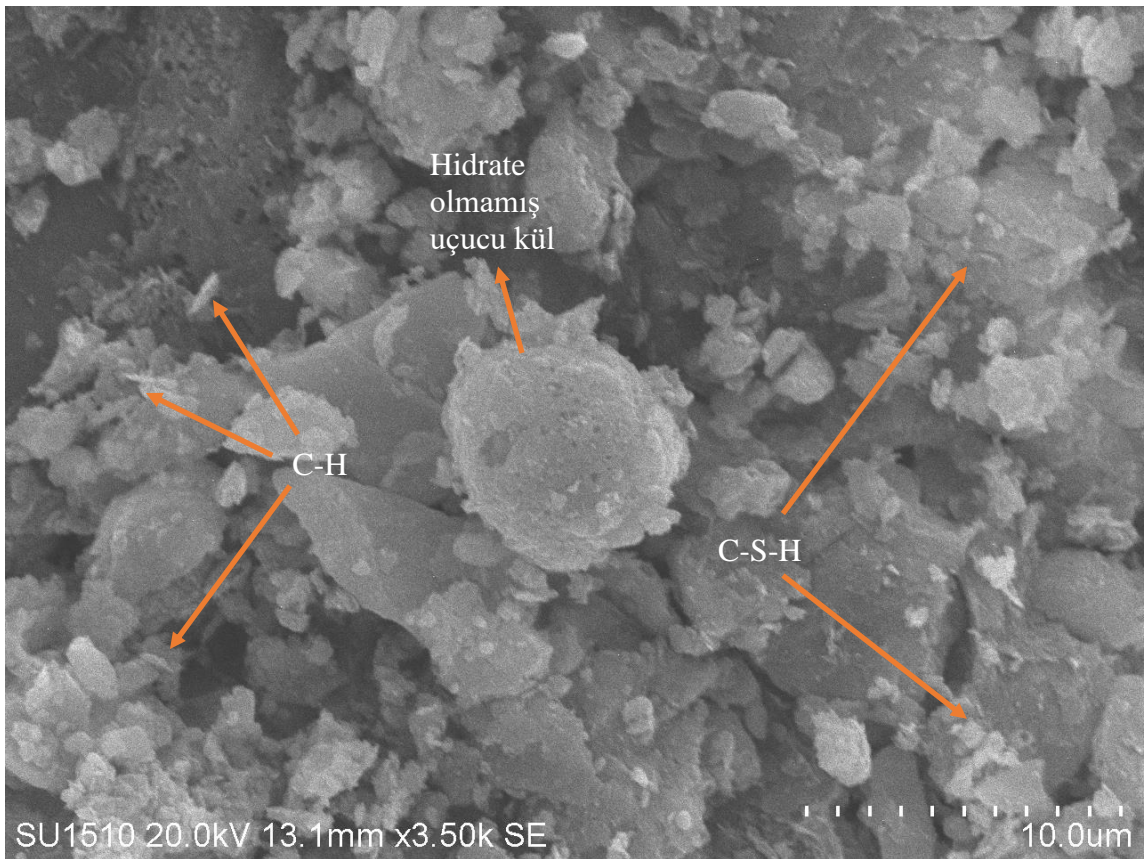
Şekil 4.42. $S_{85}L_6FA_9RP_0$ içerikli karışımın 56 gün kür sonrası SEM görüntüsü

$S_{85}L_6FA_9RP_0$ içerikli karışımında hidrasyon ürünleri daha belirgin hale gelmiştir. C-S-H ve C-H yapıları artmış, buna paralel olarak malzemede C-S-A-H yolları oluşmuştur. Görüntüdeki düzgün altıgen şekilli tabakalı yapılar C-H kristallerini göstermektedir (Şekil 4.42).



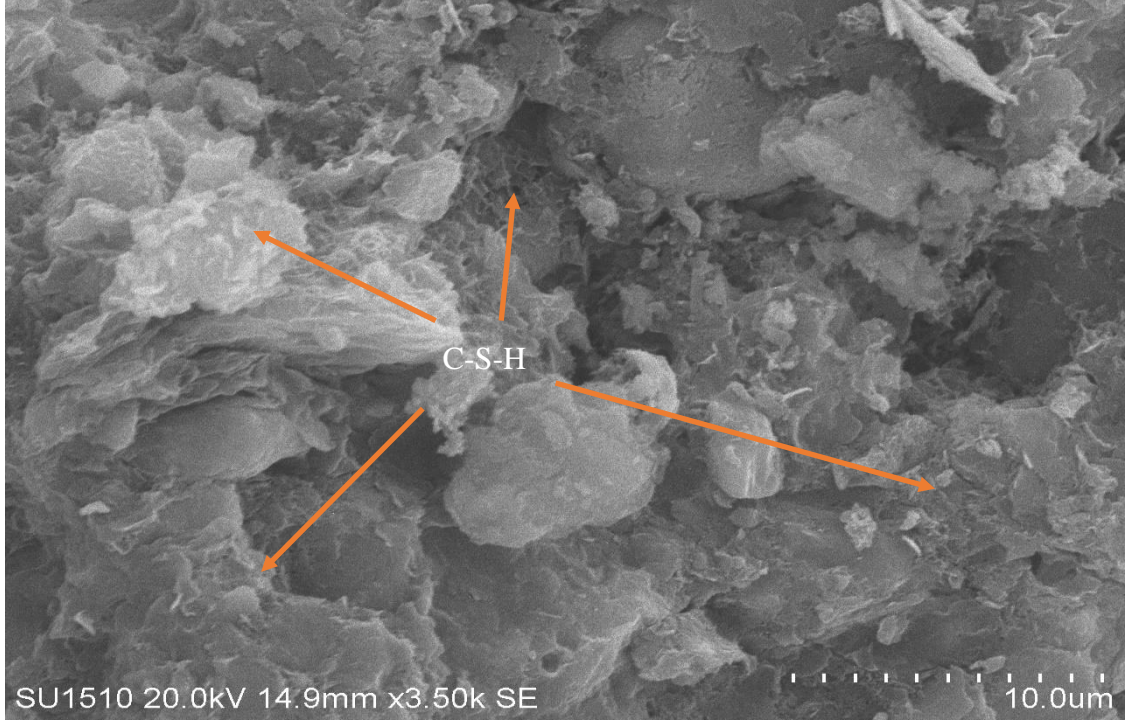
Şekil 4.43. $S_{82}L_6FA_{12}RP_0$ içerikli karışımın 56 gün kür sonrası SEM görüntüsü

$S_{82}L_6FA_{12}RP_0$ içerikli karışım incelenen en yüksek mukavemete sahip kompozitlerden birisidir. SEM görüntülerinde C-H kristallerine rastlanmamış, buna karşın yüksek miktarda C-S-H ve C-S-A-H oluşumu gözlenmiştir (4.43). Uçucu külün alüminyum oksit yönünden zengin bir malzeme olduğu düşünüldüğünde, oluşan yüksek miktardaki C-S-A-H ürünü şaşırtıcı olmamaktadır. Ayrıca daha düşük uçucu kül içerikli karışımlara kıyasla malzemedeki boşluk oranının çok daha az olduğu görülebilmektedir. Bu durum serbest basınç deneyi sonuçları ile tutarlı olmaktadır.



Şekil 4.44. $S_{82}L_6FA_{15}RP_0$ içerikli karışımın 7 gün kür sonrası SEM görüntüsü

$S_{82}L_6FA_{15}RP_0$ içerikli karışım en yüksek mukavemete sahip olan, kireç ve uçucu katkıli kompozit olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle karışımın artan kür süresine bağlı olarak değişimi SEM görüntüleriyle incelenmiştir. 7 günlük kür süresinin ardından karışım içeriğindeki puzolanik reaksiyonların nihayete ermediği göze çarpmaktadır. SEM görüntülerinde hidrate olmamış uçucu kül taneleri ve C-H kristallerinin varlığı tespit edilmiştir. Karışımın mukavemet kazanmasında büyük önem arz eden, C-S-H oluşumunun erken evrede kısıtlı oranda kaldığı belirlenmiştir. Bu gözlemlerin serbest basınç deneyi sonuçlarıyla paralel olduğu söylenebilir (Şekil 4.44).

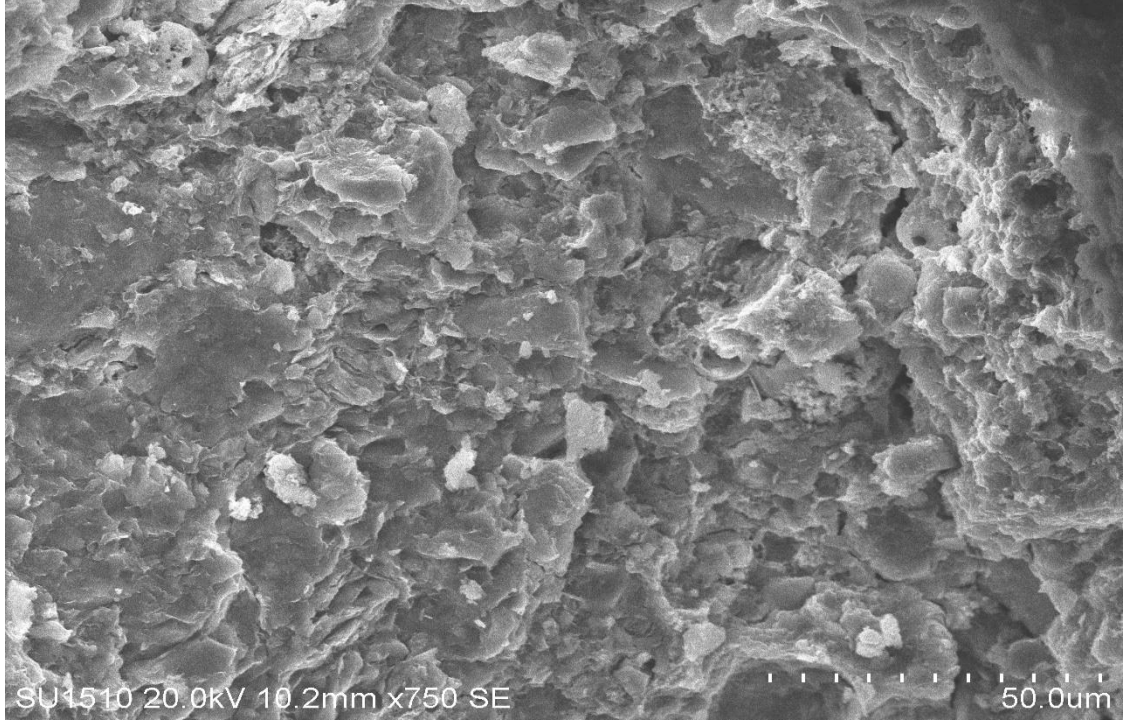


Şekil 4.45. $S_{82}L_6FA_{15}RP_0$ içerikli karışımın 56 gün kür sonrası SEM görüntüsü

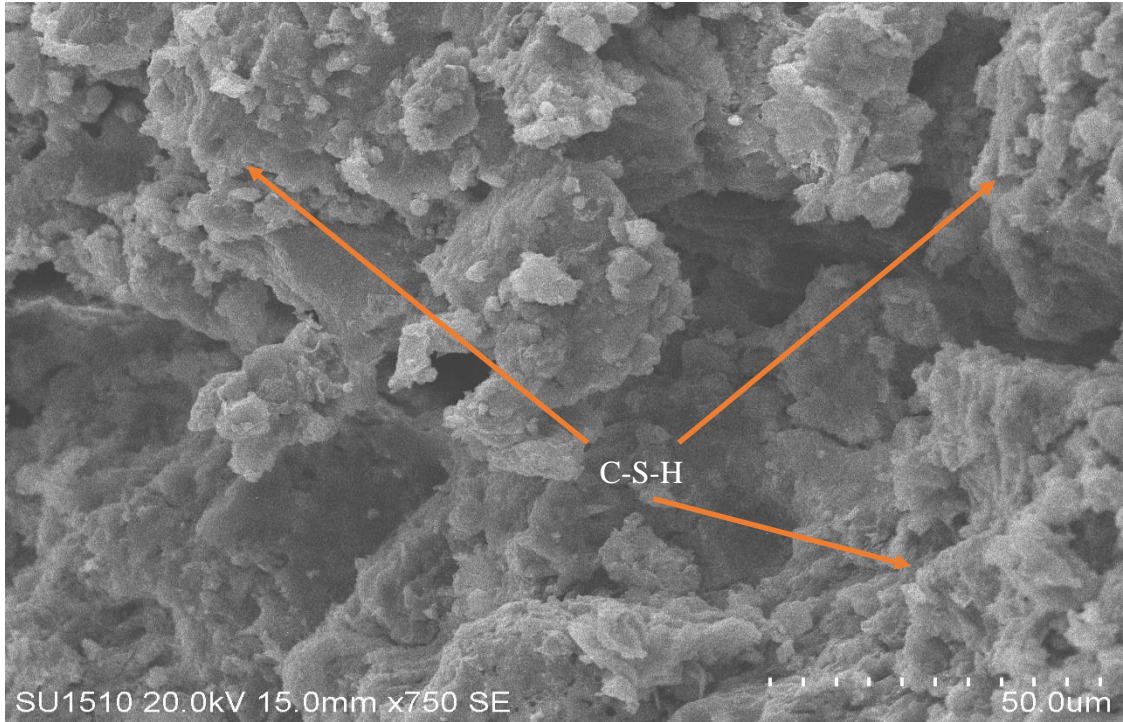
56 gün kür süresinin ardından $S_{82}L_6FA_{15}RP_0$ içerikli karışımın SEM görüntüleri incelendiğinde, ilk göze çarpan yapının artan kür süresiyle birlikte gelişen ağı yapılar olduğu söylenebilir. Bu durum puzolanik reaksiyonların önemli ölçüde gerçekleştiğinin, ayrıca hidrasyon ürünleri olan C-S-H ve C-S-A-H oluşumunun önemli bir kanıtıdır. Buna ek olarak görüntülerde hidrate olmamış uçucu kül ve C-H gözlemlenmemesi dayanım açısından önemli bir gelişmedir. Artan kür süresiyle birlikte oluşan hidrasyon ürünleri malzemenin içeriğindeki boşlukları doldurmuş, böylece daha rijit bir yapıya kavuşmasını sağlamıştır (Şekil 4.45).

Atık lastik katkıli kompozitlerin mikroyapılarının incelenmesi amacıyla, $S_{90.5}L_6FA_3RP_{0.5}$ ve $S_{81.5}L_6FA_{12}RP_{0.5}$ içerikli karışımlar üzerinde SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu karışımlardan $S_{90.5}L_6FA_3RP_{0.5}$ içerikli olan en düşük 56. gün mukavemetine sahip lastik katkıli numune olması, $S_{81.5}L_6FA_{12}RP_{0.5}$ içerikli olan ise lastik katkıli kompozitler arasında en yüksek 56. gün dayanımını göstermesi nedeniyle seçilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde kompozitler arasında yapısal olarak iki temel farkın bulunduğu, bunların tane boyutundaki değişim ve hidrasyon ürünleri olduğu belirlenmiştir. $S_{81.5}L_6FA_{12}RP_{0.5}$ içerikli kompozit daha büyük tanelerden meydana gelirken, $S_{90.5}L_6FA_3RP_{0.5}$ içerikli olan ise nispeten daha küçük tanelere sahiptir. Belli bir

seviyeye kadar artan uçucu kül oranıyla birlikte serbest basınç mukavemetinin arttığı yapılan deneyler sonucu kanıtlandığından, bu durumun lastik katkıli kompozitler içinde geçerli olduğunu söylemek mümkündür (Şekil 4.46 ve Şekil 4.47).

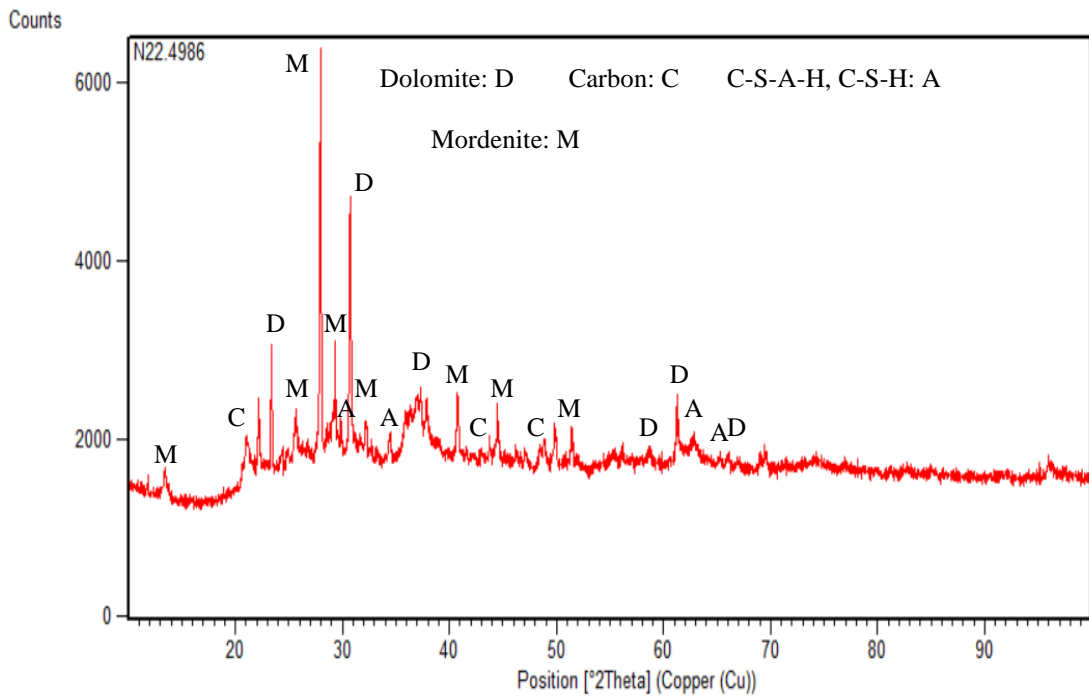


Şekil 4.46. $S_{82}L_6FA_3RP_{0.5}$ içerikli karışımın 56 gün kür sonrası SEM görüntüsü



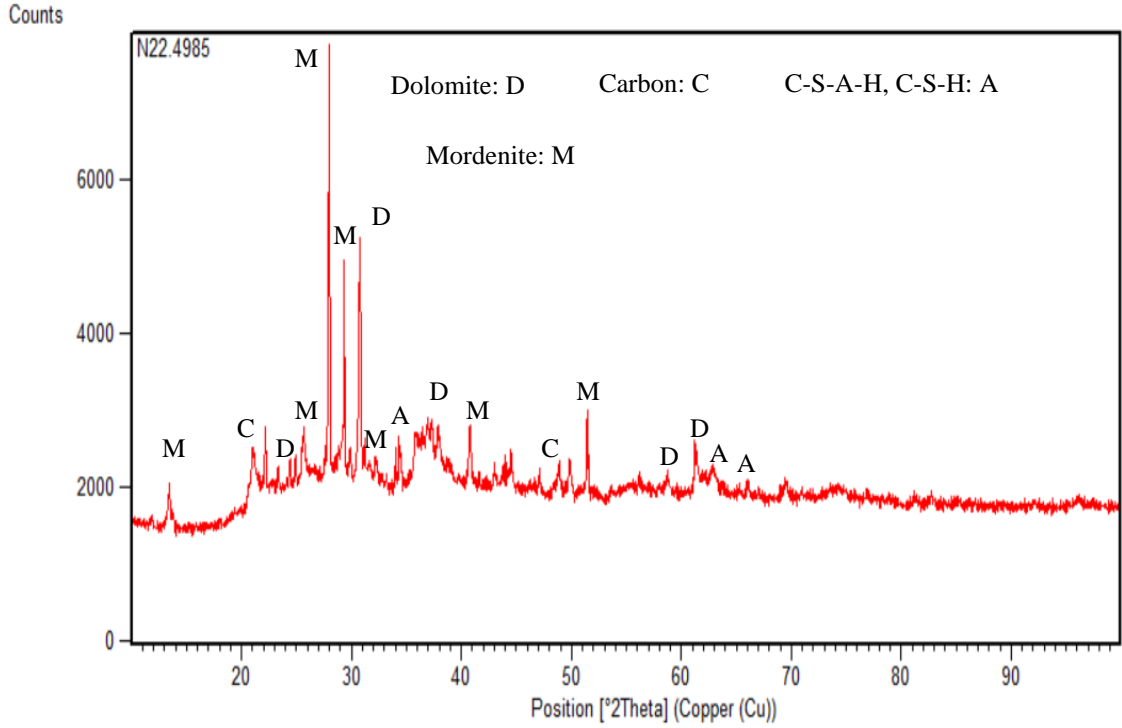
Şekil 4.47. $S_{82}L_6FA_{12}RP_{0.5}$ içerikli karışımın 56 gün kür sonrası SEM görüntüsü

Malzemelerin mineralojik özelliklerinin tespit edilmesi amacıyla yapılan XRD deneyleri ise farklı kür süreleri göz önünde bulundurularak incelenmiştir. Özellikle serbest basınç deneyinde en iyi sonucu veren, atık lastik katkılı $S_{81.5}L_6FA_{12}RP_{0.5}$ içerikli kompozitlerin mineral yapıları araştırılmıştır. Bu amaçla 2 ve 56 gün kür süreli karışımlar hazırlanmış, etüvde kurutulmuş XRD deneyine tabii tutulmuştur. Elde edilen difraksiyon grafikleri Xpert HighScore Plus programı kullanılarak incelenmiştir. Grafikte oluşan pik değerler program yardımıyla bulunmuş ve olası mineral eşleşmeleri tespit edilmiştir. Şekil 4.44'te $S_{81.5}L_6FA_{12}RP_{0.5}$ içerikli kompozitin 2 günlük kür sonrası XRD deney sonucu ve olası bileşikler gösterilmektedir.



Şekil 4.48. $S_{81.5}L_6FA_{12}RP_{0.5}$ içerikli kompozitin 2 gün kür süreli XRD difraksiyon grafiği

Grafikler incelendiğinde kompozitin içeriğinde temel olarak dolomite ve mordenite bulunduğu görülmektedir. Ayrıca atık lastik katkısından gelen karbon elementi ve hidrasyon sonucu oluşan C-S-H, C-S-A-H ürünleri XRD deneyi sonucu tespit edilmiştir.



Şekil 4.49. $S_{81.5}L_6FA_{12}RP_{0.5}$ içerikli kompozitin 56 gün kür süreli XRD difraksiyon grafiği

56 gün sonunda yapılan XRD deney sonuçları 2 gün kür süreli karışımın grafiği ile kıyaslandığında kompozitin içeriğinde dolomite miktarının azaldığını, buna karşın mordenite $((Na_2, Ca, K_2)_4(Al_8Si_{14})O_{96} \cdot 28H_2O)$ oranının arttığı görülmektedir. Ayrıca malzeme içeriğindeki serbest karbon elementinin bazı açı değerlerinde, düşüş gösterdiği söylenebilir. Buna ek olarak C-S-A-H ve C-S-H ürünlerinin pik değerlerinde artış göze çarpmaktadır (Şekil 4.45). Mordenite içeriğinde Al elementi içeren bir mineraldir. Bu gerçekten hareketle artan uçucu kül miktarı malzemedeki Al içeren bileşiklerin oranlarının artmasını sağlamıştır. Ayrıca uçucu külün içeriğinde bulunan CaO yeni hidrasyon ürünlerinin oluşmasına imkân vermiştir. Tüm bu sonuçlar, serbest basınç ve SEM deneyleriyle uyumlu gözükmektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Kireç ve uçucu kül ile stabilize edilen zeminlere, atık lastik katkısı eklenmesiyle zeminin mühendislik özelliklerindeki değişimlerin araştırıldığı bu tez çalışmasında kapsamlı deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarda kullanılan katkı malzemelerinin zemine eklenebileceği alt ve üst sınırlarının bulunması amacıyla ön testler gerçekleştirilmiştir. Yapılan ön testlerin ardından numunelerin üretimine başlanmış, üretilen kompozitler üzerinde 2, 7, 28, 56 ve sınırlı sayıda numune için ise 84 gün kür uygulanmıştır. Serbest basınç deneylerinde standart bir dayanımın bulunması amacıyla her bir karışım için 12 adet numune eş zamanlı olarak hazırlanmıştır. Çalışma kapsamında toplamda 400 adet serbest basınç deneyi gerçekleştirilmiş, deney sonrası numuneler üzerinde XRD ve SEM analizleri icra edilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular aşağıda kısaca özetlenmiştir.

5.1. Sonuçlar

- Zeminin sınıflandırılması için yapılan deneyler sonucunda, zeminin likit limit değeri %62.3, plastik limit değeri ise %30.4 olarak bulunmuş, birleştirilmiş zemin sınıflandırma yöntemine göre zeminin CH (yüksek plastisiteli kil) sınıfına girdiği tespit edilmiştir. Tez kapsamında kullanılan kilin orta seviye aktiviteye sahip olduğu belirlenmiştir.
- Çalışma kapsamında kullanılan kil zemin, kireç, uçucu kül ve atık lastik parçalarının özgül ağırlık değerleri sırasıyla; 2.645 g/cm³, 2,251 g/cm³, 2.446 g/cm³, 1.048 g/cm³ olarak belirlenmiştir.
- Zemine kireç eklenmesiyle malzemenin likit limitinde %9.85, plastik limitinde ise %17.67 oranında artış yaşanmış, sonuç olarak plastisite indisinde %7.82'lik bir düşüş gözlemlenmiştir. Likit limitteki bu artışa kirecin sahip olduğu yüksek su emme kapasitesinin sebep olduğu düşünülmektedir. En düşük plastisite indisi değerine ise S₇₉L₆FA₁₅RP₀ adlandırılmalı kompozit malzemedeki rastlanmış, plastisite indisi doğal zemine göre %14.8 azalarak %17.1 değerine ulaşmıştır. Kireç ve uçucu kül katkısının zeminin işlenebilirliğini arttırdığı bu sonuçlara dayanarak söylenebilmektedir.

- Kompaksiyon deneyi sonuçlarına göre, zemine kireç ilavesinin kuru birim hacim ağırlığı düşürdüğü, optimum su muhtevasını ise arttığı tespit edilmiştir. Kireç ve uçucu kül kullanılarak hazırlanan kompozitlerde ise uçucu kül içeriğindeki artışla birlikte, kuru birim hacim ağırlık değerinin giderek azaldığı belirlenmiştir. Pik değer olarak en düşük kuru birim hacim ağırlığa %6 kireç ve %18 uçucu kül içeren karışımda rastlanmıştır. Bu karışımında, doğal zemine kıyasla kuru birim hacim ağırlık değerinde yaklaşık %10 oranında düşüş gerçekleşmiştir.
- Karışımların ve doğal zeminin şişme potansiyelleri incelendiğinde, zeminin iyileştirme öncesi şişme potansiyeli %10,08 olarak gerçekleşmiştir. Kireç ile yapılan iyileştirme sonrası şişme potansiyeli %9,25 oranında düşerek, %0,83 değerine ulaşmıştır. Kireç ve uçucu külün eklendiği karışımlarda şişme potansiyeli değeri bir miktar daha düşmüş, en düşük şişme potansiyeli değerine ise %6 kireç ve %6 uçucu kül içeren karışımlarda ulaşılmıştır. Deneyler sonucunda şişme potansiyelini düşürmede etkili olan malzemenin kireç olduğu, uçucu kül ve atık lastik parçalarının ise ikinci planda kaldığı söylenebilir.
- Serbest basınç deney sonuçlarına göre, 2 günlük kür süresinin ardından kireç ile iyileştirilen zeminin dayanımı %143 oranında artmış, bu artış 7,28 ve 56 günlük kür süreleri için sırasıyla; %224, %282 ve %357 olarak gerçekleşmiştir. Kireç ile yapılan iyileştirmede artan kür süresiyle birlikte dayanımda artış yaşanmıştır. Kireç ve uçucu kül ilaveli karışımlarda 2 ve 7 günlük kür süreleri için en yüksek dayanıma, %6 kireç ve %9 uçucu kül içeren karışımlarda rastlanmış, dayanım sırasıyla %236 ve %340,5 oranında artış göstermiştir. Yalnızca kireç eklenen karışıma göre, kireç ve uçucu kül katkılı zemin 2 gün küresinde %12, 7 gün küresinde ise %58,5 daha iyi performans sergilemiştir.
- Yalnızca kireç içeren karışıma benzer olarak, kireç ve uçucu kül içerikli karışımlarda, artan kür süresiyle doğru orantılı olarak dayanımda artış gözlemlenmiş, 28 günlük kürün ardından yapılan testlerde en iyi dayanıma %6 kireç ve %18 uçucu kül içeren karışımda rastlanmış, dayanım doğal zemine kıyasla %659 oranında yükselmiştir.

- Kireç ve uçucu kül katkılı kompozitlerde 56 günlük kürün ardından, en iyi serbest basınç dayanımına %6 kireç ve %15 uçucu kül içeren karışımlarda rastlanmıştır, %15 oranında uçucu kül ilavesine kadar karışımların dayanımları artış göstermiştir. Artan oranlarda uçucu kül katkısının ise dayanımı düşürdüğü tespit edilmiştir. Bu durum kireç ve uçucu kül kullanılarak yapılan iyileştirmede optimum katkı maddesi oranının %6 kireç ve %15 uçucu kül olduğuna işaret etmektedir. $S_{79}L_6FA_{15}RP_0$ içerikli karışım yalnızca kireç ile yapılan iyileştirmeye göre 56 günlük dayanımda %150,8 daha iyi performans göstermiştir. Doğal zeminin dayanımıyla kıyaslandığında ise serbest basınç mukavemeti %1046,7 oranında artmıştır. Bu sonuçlara göre zeminin yalnızca kireç ile iyileştirilmesine kıyasla, kireç ve uçucu kül eklenerek iyileştirilmesinin, daha etkili olduğu bir kez daha kanıtlanmıştır.
- Kireç, uçucu kül ve atık lastik ile hazırlanan karışımlarda, $S_{84.5}L_6FA_9RP_{0.5}$ ve $S_{81.5}L_6FA_{12}RP_{0.5}$ içerikli kompozitler en yüksek dayanım değerlerine ulaşmışlardır. Bu kompozitler kireç ve uçucu kül kullanılarak yapılan iyileştirmeye kıyasla daha iyi performans göstermişlerdir. 56 günlük kür sonrasında, kireç ve uçucu kül içerikli karışımlara kıyasla sırasıyla %22,7 ve %5,99 oranında dayanım artışı gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca atık lastik katkısı, pik öncesi gerçekleşen şekil değiştirme miktarını, iki ayrı kompozit için sırasıyla %11,37 ve %19,16 oranında arttırmış, malzemeyi daha sünek hale getirmiştir. Bu sonuçlara göre atık lastik katkısının, belirli oranlarda karışımlara eklenmesiyle dayanımı arttırabileceği ve malzemedeki gevrekliği azaltabileceği ispatlanmıştır.
- Yapılan mikroyapı test sonuçlarına göre artan uçucu kül miktarıyla bağlantılı olarak, karışımların içeriğindeki boşluklar azalmış, malzeme daha kompakt bir yapıya kavuşmuştur. Ayrıca karışım içeriğindeki uçucu kül oranı arttırıldığında, hidrasyon ürünleri olan C-S-H ve C-S-A-H miktarı artış göstermiştir. Yapılan XRD ve SEM analizleri, serbest basınç deneyi sonuçlarıyla tutarlılık göstermektedir.
- Serbest basınç deneyi sonuçlarına göre atık lastik katkılı kompozitler, Çizelge 4.11' de aktarıldığı üzere farklı inşaat mühendisliği uygulamalarında (sıkıştırılmış toprak, yollarda alt temel ve temel olarak) kullanılabilir. Ayrıca bu

kompozitler sahip oldukları düşük yoğunluk ve şişme potansiyeli ile dayanma duvarı arkası dolgusu olarak da kullanıma uygundurlar.

5.2. Öneriler

Atık lastik katkıli kompozitlerin ulaşım yapılarında kullanılabilirliğinin ayrıntılı olarak incelenmesi önerilmektedir. Bu kapsamda karışımlar üzerinde CBR ve STS deneylerinin gerçekleştirilmesi, şişme basınçlarının tespit edilmesi, permeabilite katsayılarının bulunması ve donma-çözünme dayanımlarının test edilmesi gerekmektedir. Ayrıca atık lastik katkısıyla birlikte malzemenin kohezyon ve içsel sürtünme açısındaki değişimlerin araştırılması faydalı olacaktır.

Bazı kompozitlerde artan kür süresiyle birlikte, serbest basınç dayanımında düşüşe neden olan mekanizmanın tam olarak kavranabilmesi için daha ayrıntılı testlerin gerçekleştirilmesi, özellikle kapsamlı mikro analizlerin numuneler üzerinde uygulanması gerekmektedir.

Kireç ve uçucu kül ile iyileştirilen zeminlere, alternatif katkı malzemesi olarak atık lastiğin eklenmesinin faydalı olabileceği, atık lastik katkısı sayesinde sadece zeminin geoteknik özelliklerinin iyileşmeyeceği, aynı zamanda atık bir malzeme olan atık lastiğin inşaat projelerinde kullanılarak yeniden ekonomiye kazandırılacağı unutulmamalıdır. Bu sayede depolanma sürecinde, insan sağlığına ve çevreye zarar veren bu atık malzemeler elimine edilebileceklerdir.

6. KAYNAKLAR

- Airey, G.D., Collop, A.C., Mujibur, M. M., 2004, Mechanical Properties of Crumb Rubber Modified Asphalt Mixtures, 3rd Euroasphalt and Eurobitume Congress, Vienna.
- Akbulut, S., Arasan, S., & Kalkan, E., 2007, Modification of clayey soils using scrap tire rubber and synthetic fibers. *Applied Clay Science*, 38(1-2), 23-32)
- Al-Subari, L., Ekinci, A., Aydın, E., 2021, The utilization of waste rubber tire powder to improve the mechanical properties of cement-clay composites, *Construction and Building Materials*, 300, 124306.
- ASTM C-618, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, American Society for Testing and Materials, USA.
- ASTM D422, Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, ASTM International, USA.
- ASTM D698, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, American Society for Testing and Materials, USA.
- ASTM D854, Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, American Society for Testing and Materials, USA.
- ASTM D2435, Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading, ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
- ASTM D4546, “Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Cohesive Soils” ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
- ASTM D5333, Standard Test Method for Measurement of Collapse potential of Soils, American Society for Testing and Materials, USA.
- Athanasopoulou, A., 2014, Addition of lime and fly ash to improve highway subgrade soils. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(4), 773-775.
- Beeghly, J. H., 2003, Influence of Chemical Curing Technique on the Properties of Fly Ash Aggregates Prepared Without Conventional Binders, 2003 International Ash Utilization Symposium, University Of Kentucky.
- Bekhiti, M., Trouzine, H., & Rabehi, M., 2019, Influence of waste tire rubber fibers on swelling behavior, unconfined compressive strength and ductility of cement stabilized bentonite clay soil. *Construction and Building Materials*, 208, 304-313
- Bergado, D.T. and Anderson, L. R., 1996, Soft Ground Improvement in Low Land and Other Environments, ASCE Press Systems, NY, USA.

- Budinski, K. G., 2010, *Engineering Materials: Properties and Selection*, 9th Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA.
- Cabalar, A. F., Karabash, Z., & Mustafa, W. S., 2014, Stabilising a clay using tyre buffings and lime. *Road materials and pavement design*, 15(4), 872-891.
- Chen, F. H., 1975, *Foundations on Expansive Soils, Developments in Geotechnical Engineering 12*, Elsevier Scientific, New York.
- Chen, F. H., 1988. *Foundation Expansive Soils*, 2nd ed. New York, Elsevier Scientific Pub. Co., 280p.
- Chu, T. Y., Davidson, D. T., Goecker, W. L., & Moh, Z. C., 1955, Soil stabilization with lime-flyash mixtures: Preliminary studies with silty and clayey soils. *Highway Research Board Bulletin*, (108).
- Çetin, A.Y., 2011, Yüksek Plastisiteli Kil Zeminlerin Alternatif Malzemeler ile Yüzeysel Zemin Stabilizasyonu, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Dakshanamurthy, V., Raman, V., 1973. A simple method of identifying expansive soil, *Soils and Foundations*, 13 (1), 97-104.
- Das, B. M., 2007, *Principles of Foundation Engineering*, 6th Edition, Thomson Learning.
- Davidson, D. T., Mateos, M., Katti, R. K., 1959, Activation of the Lime-Flyash Reaction by Trace Chemicals. *Highway Research Board Bulletin*, (231).
- Eades, J. L. and Grim, R. E., 1966, A quick test to determine lime requirements for lime stabilization, *Highway Research Record*, 139.
- Erol, B., ve Şenol, A., 2008, Metal Cürufunun Yol Altlarında Temel Malzemesi Olarak Kullanımı, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onikinci Ulusal Kongresi 16-17 Ekim 2008, Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Eryılmaz, H. ve Demirarslan, K. O., 2019, Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin (ÖTL) Sıvılaştırılarak Geri Dönüşümünün Araştırılması, Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi, 2(1), 50-56.
- Fusheng, Z., Songyu, L., Yanjun, D., Kerui, C., 2008, Behavior of Expansive soils stabilized with fly ash. *Journal of Natural Hazard*, 47, 509-523.
- Genç, S., 2009, Şişen Zeminler ve Bentonit – Kaolin Karışımlarının Şişme Özellikleri, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Ghabaee, S., 2015, Kireç ile Stabilize Edilmiş Bentonitin Kür Süresinin Mukavemet Üzerindeki Etkisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

- Habibi, A. A., Fallah Tafti, M., Narani, S., & Abbaspour, M., 2021, Effects of waste tire textile fibres on geotechnical properties of compacted lime-stabilized low plastic clays. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 15(9), 1118-1134.
- Han, J., 2015, Principles and practice of ground improvement. John Wiley & Sons.
- Hambirao, G. S., ve Rakaraddi, P. G., 2014, Soil stabilization using waste shredded rubber tyre chips. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 11(1), 20-27.
- Harrison, D. M., 2000, The Grouting Handbook: a Step-by-Step Guide to Heavy Equipment Grouting, Gulf Pub. Co., Houston, Texas, USA
- Holtz, W.G. and Gibbs, H.J., 1956, Engineering Properties of Expansive Clays, ASCE Transaction, Vol.121, pp.213-240.
- Houston, S. L., Houston, W. N., and Spadola, D. J., 1998, Prediction of field Collapse Of Soils Due To Wetting, *Journal Of Geotechnical Engineering*, ASCE, 114 (1), 40-58.
- Indiramma, P., Sudharani, C., & Needhidasan, S., 2020, Utilization of fly ash and lime to stabilize the expansive soil and to sustain pollution free environment–An experimental study. *Materials Today: Proceedings*, 22, 694-700.
- Ingles, O. G., Metcalf, J.B., 1972, Soil Stabilization, Butterworths, Sydney.
- Jafari, M., ve Esna-ashari, M., 2012, Effect of waste tire cord reinforcement on unconfined compressive strength of lime stabilized clayey soil under freeze–thaw condition. *Cold Regions Science and Technology*, 82, 21-29.
- Ji-ru, Z., ve Xing, C., 2002, Stabilization of expansive soil by lime and fly ash. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 17(4), 73-77.
- Kalkan, E., 2013, Preparation of scrap tire rubber fiber–silica fume mixtures for modification of clayey soils. *Applied Clay Science*, 80, 117-125.
- Karami, H., Pooni, J., Robert, D., Costa, S., Li, J., & Setunge, S., 2021, Use of secondary additives in fly ash based soil stabilization for soft subgrades. *Transportation Geotechnics*, 29, 100585.
- Keskin, S. N., S. Uzundurukan, T. S., Göksan, A., Korkmaz, M.Ç., 2006, Zeminlerin Şişme Davranışının Anfis Analizi ile Tahmin Edilmesi, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onbirinci Ulusal Kongresi 7-8 Eylül 2006, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Kim, Y. T., ve Kang, H. S., 2013, Effects of rubber and bottom ash inclusion on geotechnical characteristics of composite geomaterial. *Marine Georesources & Geotechnology*, 31(1), 71-85.

- Kosmatka, S.H., B. Kerkhoff, and W.C. Panarese, 2002, Design and Control of Concrete Mixtures. EB001.14. Skokie, IL: Portland Cement Association.
- Köylü, B., (2003), Killerde Şişme Potansiyelini Belirleyen Öğeler ve Yenikent / Ankara Yerleşim Alanı Killerinin Şişme Potansiyelinin Belirlenmesi Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi Ankara.
- Kumar, A., Walia, B. S., & Bajaj, A., 2007, Influence of fly ash, lime, and polyester fibers on compaction and strength properties of expansive soil. *Journal of materials in civil engineering*, 19(3), 242-248.
- Lasder Lastik Sanayicileri Derneği, 2021, Erişim adresi: <http://www.lasder.org.tr>
- Mateos, M., & Davidson, D. T., 1962, Lime and fly ash proportions in soil, lime and fly ash mixtures, and some aspects of soil lime stabilization. *Highway Research Board Bulletin*, (335).
- Mohammed, A. and Vipulanandan, C., 2015, Testing and modeling the short-term behavior of lime and fly ash treated sulfate contaminated CL soil, *Geotechnical and Geological Engineering*, 33(4), 1099-1114.
- Mishra, E. N. K., 2012, Strength characteristics of clayey sub-grade soil stabilized with fly ash and lime for road works. *Indian Geotechnical Journal*, 42, 206-211.
- Nalbantoğlu, Z., 2004, Effectiveness of class C fly ash as an expansive soil stabilizer. *Construction and Building Materials*, 18(6), 377-381.
- Nelson, J. D. and Miller, D. J., 1992, Expansive Soils Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering, Wiley, New York.
- Oikonomou, N. and Mavridou, S., 2009, The Use of Waste Tyre Rubber in Civil Engineering Works, Sustainability of Construction Materials, 213-238.
- Orhan, M., 2020, Geoteknik Mühendisliği ve Temel İnşaatı, Gazi Kitapevi, Ankara.
- Önalp, A., 2012, Geoteknik Bilgisi, 3.baskı, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Özaydın, K., 2016, Zemin Mekaniği, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Parisatto, M., Dalconi, M. C., Valentini, L., Artioli, G., Rack, A., Tucoulou, R., ... & Ferrari, G., 2015, Examining microstructural evolution of Portland cements by in-situ synchrotron micro-tomography. *Journal of Materials Science*, 50, 1805-1817.
- Ravichandran, P. T., Prasad, A. S., Krishnan, K. D., & Rajkumar, P. K., 2016, Effect of addition of waste tyre crumb rubber on weak soil stabilisation. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(5), 1-5.
- Reuter, M., Xiao, Y., Boin U., 2004, Recycling and environmental issues of metalurgical slags and salt fluxes. VII. International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts, 349-356 p.

- Rogers, C.D.F., 1995, Types and distribution of collapsible soils, In: E., Derbyshire, T., Dijkstra, and I. Smalley (eds.), *Genesis and Properties of Collapsible Soils*, NATO ASI Series, Kluwer Academic Publisher, Netherlands, 1-17.
- Seed H. B., Woodward R. J., Lungreen R., 1962. Predicting of swelling potential of compacted clay, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division ASCE*, 88 (3), 53-87.
- Sharma, N. S., Swain, S. K., Sahoo, U. C., 2012, Stabilization of a clayey soil with ash and lime: a micro level investigation, *Geotechnical and Geological Engineering*, 30, 1197-1205.
- Shen, W., Zhou, M., & Zhao, Q., 2007, Study on lime–fly ash–phosphogypsum binder. *Construction and Building Materials*, 21(7), 1480-1485.
- Singh, S., Dhiman, U., & Sharma, R., 2017, Soil stabilization using scrap rubber tyre. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 4(05), 2952-2956.
- Skempton, A. W., 1953, The Colloidal Activity of Clays, Paper presented at Proceeding of the 3th international Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Switzerland.
- Suresh, G. V. and Karthiyekan, J., 2016, Influence of Chemical Curing Technique on the Properties of Fly Ash Aggregates Prepared Without Conventional Binders, *Journal of Structural Engineering*, 43, 381-389.
- Şenol, A., Bın-Shafique, M.S., Edil, T.B., Benson, C.H., 2003, Use of Class C Fly Ash For Stabilization of Soft Subgrade, *ARI The Bulletin of The Istanbul Technical University*, Vol:53, Pg:89-95, Istanbul Technical University, Istanbul.
- TMMOB Maden Mühendisleri Odası, 2020, Kömür ve Enerji Raporu.
- TS 1900-1, İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri- Bölüm 1: Fiziksel Özelliklerin Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Türkiye.
- Tunç, A., 2002, Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları, Atlas Yayın Dağıtım, İstanbul.
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., Yeğınobalı, A., 2009, Türkiye’deki uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Ar-Ge Enstitüsü, Rapor No: Y03.03, Ankara.
- URL-1: www.fhwa.dot.gov, alındığı tarih: 05.06.2021.
- URL-2: www.thbb.org, alındığı tarih: 05.06.2021.
- URL-3: link.springer.com/referenceworkentry/10.1007%2F978-1-4419-0851-3_121, alındığı tarih: 05.06.2021.

URL-4: www.capovelo.com, alındığı tarih: 05.06.2021.

URL-5: www.decoval.fr, alındı tarih: 05.06.2021.

Uzuner, B. A., 2013, Temel Mühendisliğine Giriş, Derya Kitapevi, Trabzon.

Ülker, Ş., 2005, Karayolu altyapısında zeminlerin kireçle iyileştirilmesi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.

Van Der Merwe, D.H., 1964, The prediction of heave from the plasticity index and percentage clay fraction of soils, *Civil Engineers in South Africa*, 6, 103– 107.

Yadav, J. S., ve Tiwari, S. K., 2017a, Effect of waste rubber fibres on the geotechnical properties of clay stabilized with cement. *Applied Clay Science*, 149, 97-110.

Yadav, J. S., ve Tiwari, S. K., 2017b, A study on the potential utilization of crumb rubber in cement treated soft clay. *Journal of Building Engineering*, 9, 177-191.

Zha, F., Liu, S., Du, Y., Cui, K., 2008, Behavior of expansive soils stabilized with fly ash. *Natural hazards*, 47, 509-523.

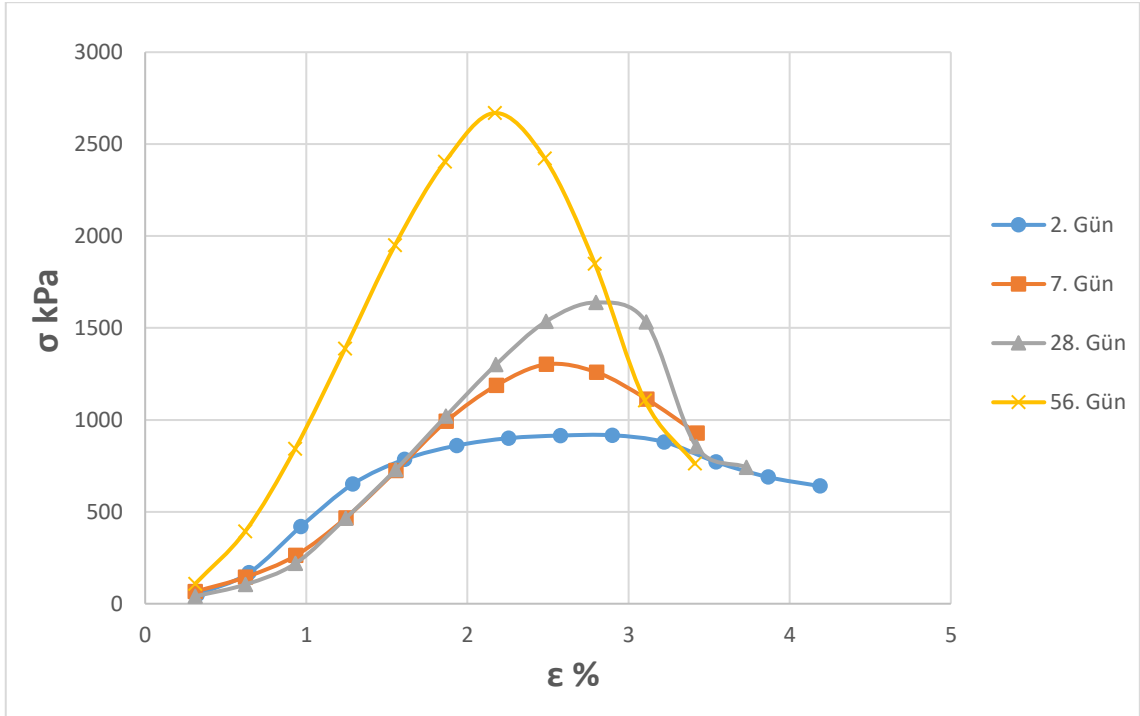
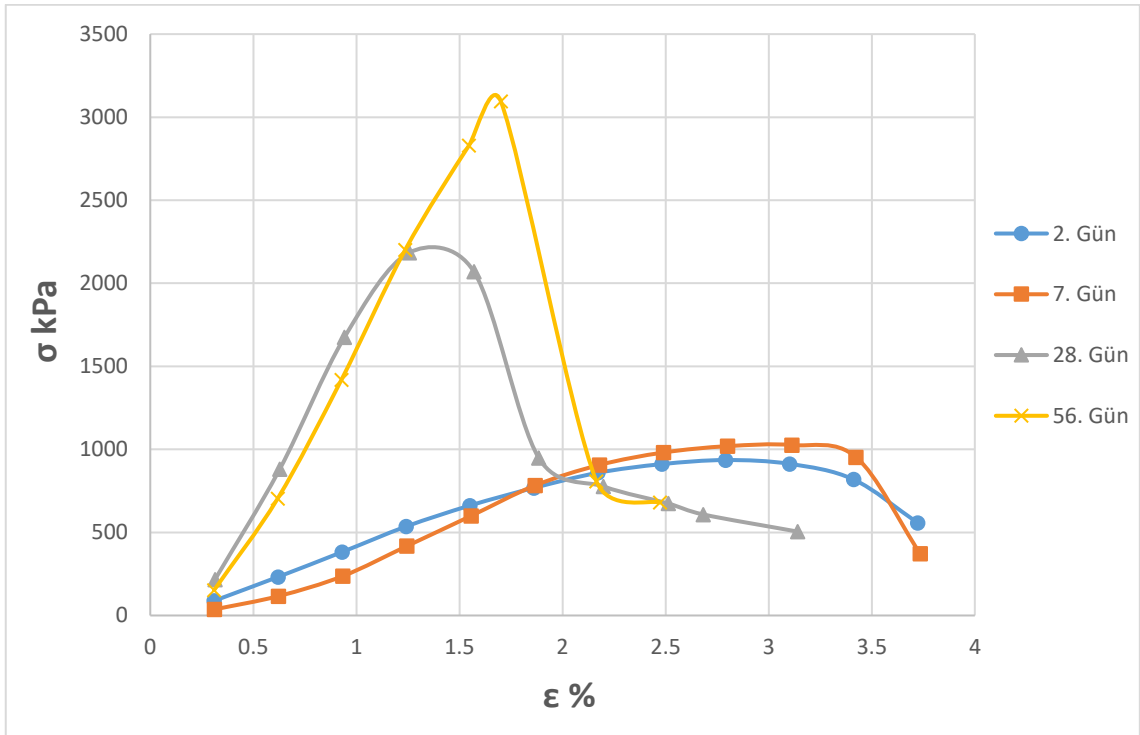
Zhou, S. Q., Zhou, D. W., Zhang, Y. F., Wang, W. J., 2019, Study on physical-mechanical properties and microstructure of expansive soil stabilized with fly ash and lime, *Advances in Civil Engineering*, 2019, 1-15.

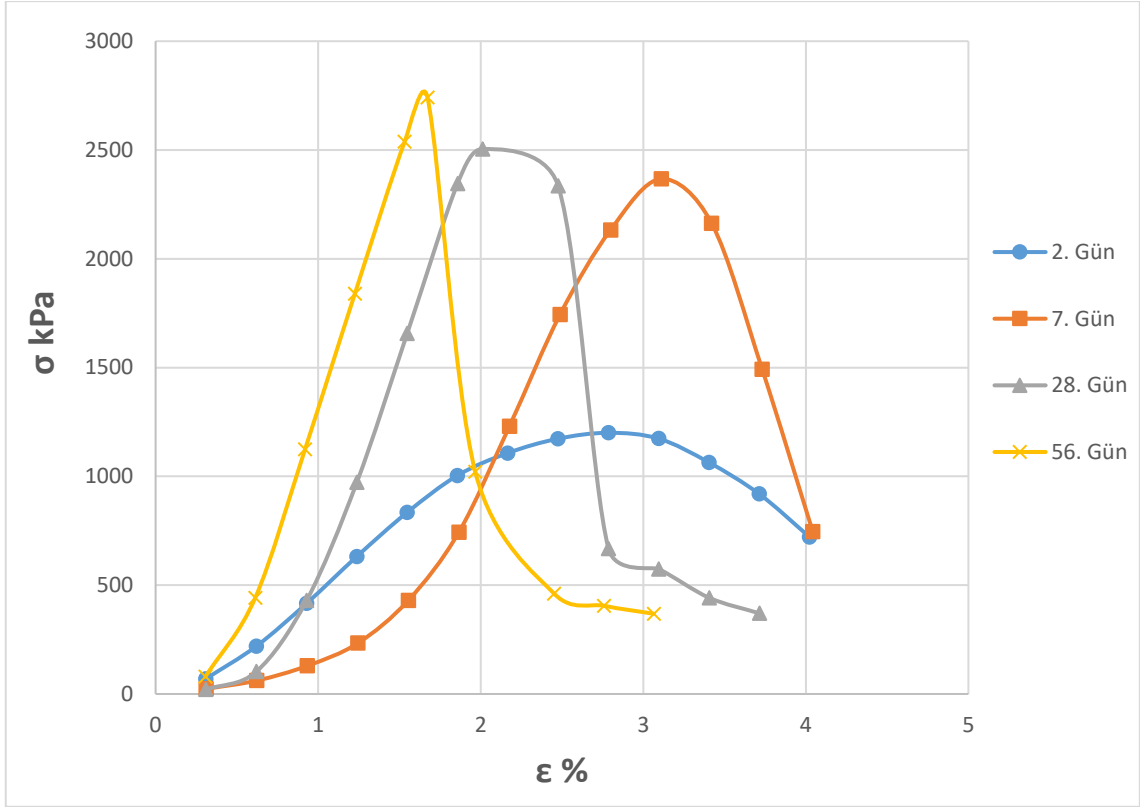
Zorlu, K., 2003, Adana Organize Sanayi Bölgesindeki Kalifflerin Jeomekanik Özelliklerinin ve İç Yapı Çökme Mekanizmasının İncelenmesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Hacettepe Üniversitesi Doktora Tezi, Ankara.

Zumrawi, M. M., & Hamza, O. S., 2014, Improving the characteristics of expansive subgrade soils using lime and fly ash. *International Journal of Science and Research*, 3(12), 1124-1129.

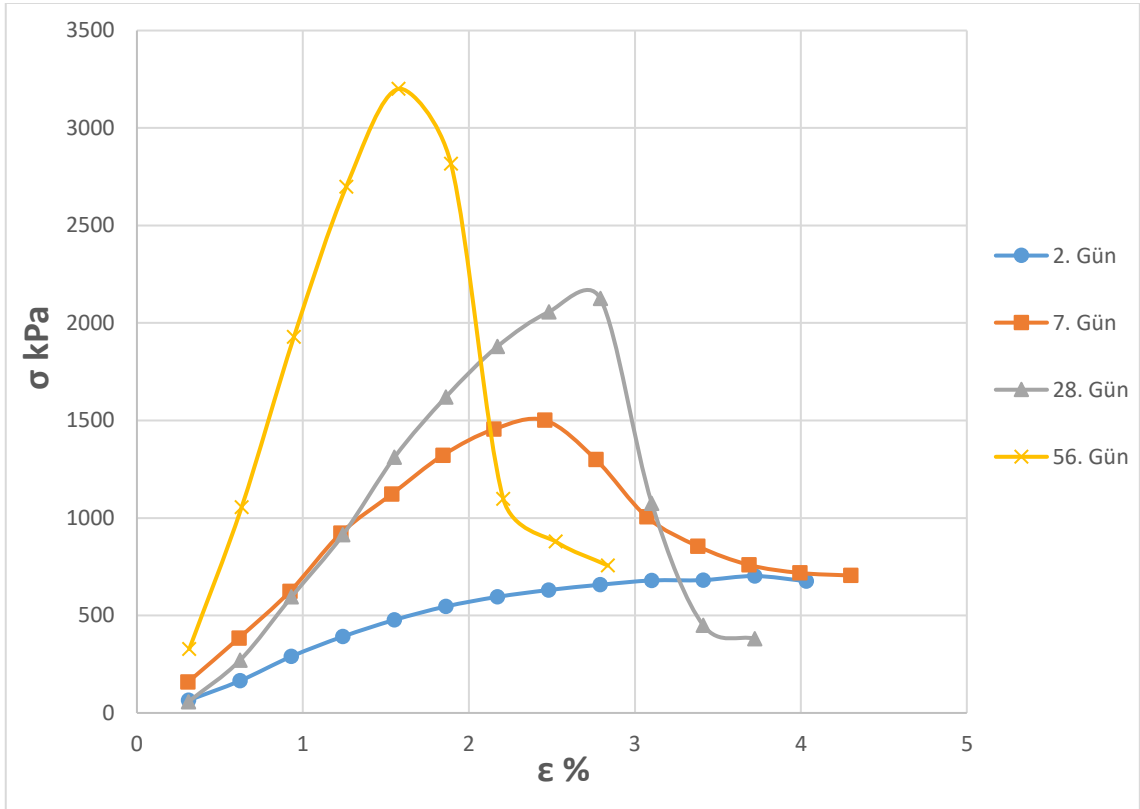
EKLER

EK-1 Kireç ve Uçucu Kül Katkılı Zeminlerin Serbest Basınç Grafikleri

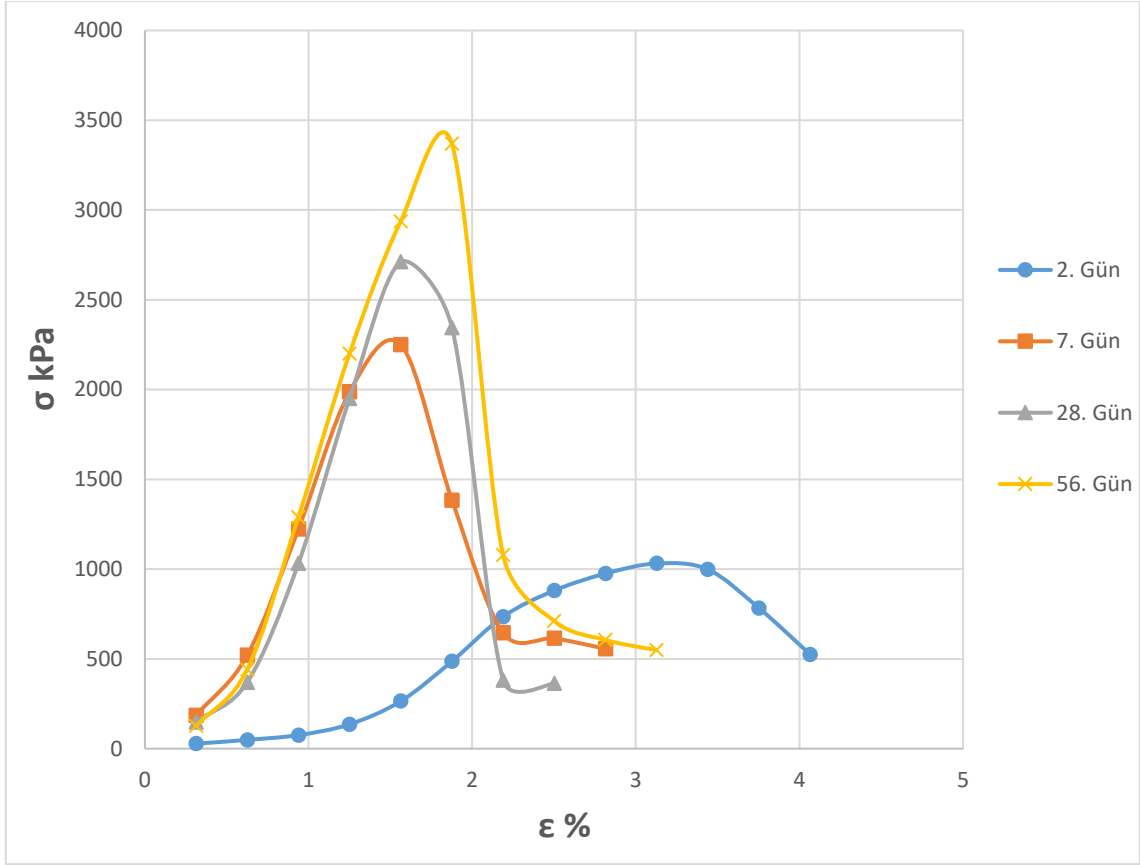
Şekil Ek 1.1. $S_{91}L_6FA_3RP_0$ karışımının 2, 7, 28 ve 56 gün kür uygulanmış serbest basınç dayanımlarıŞekil Ek 1.2. $S_{88}L_6FA_6RP_0$ karışımının 2, 7, 28 ve 56 gün kür uygulanmış serbest basınç dayanımları



Şekil Ek 1.3. $S_{85}L_6FA_9RP_0$ karışımının 2, 7, 28 ve 56 gün kür uygulanmış serbest basınç dayanımları

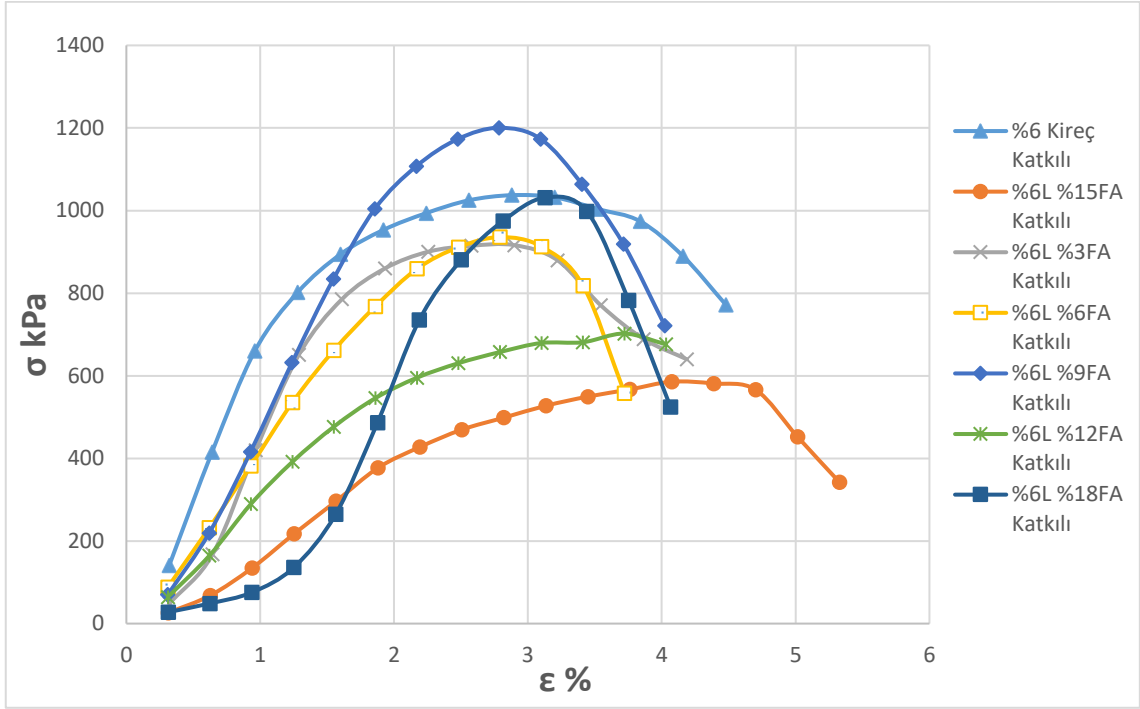


Şekil Ek 1.4. $S_{82}L_6FA_{12}RP_0$ karışımının 2, 7, 28 ve 56 gün kür uygulanmış serbest basınç dayanımları

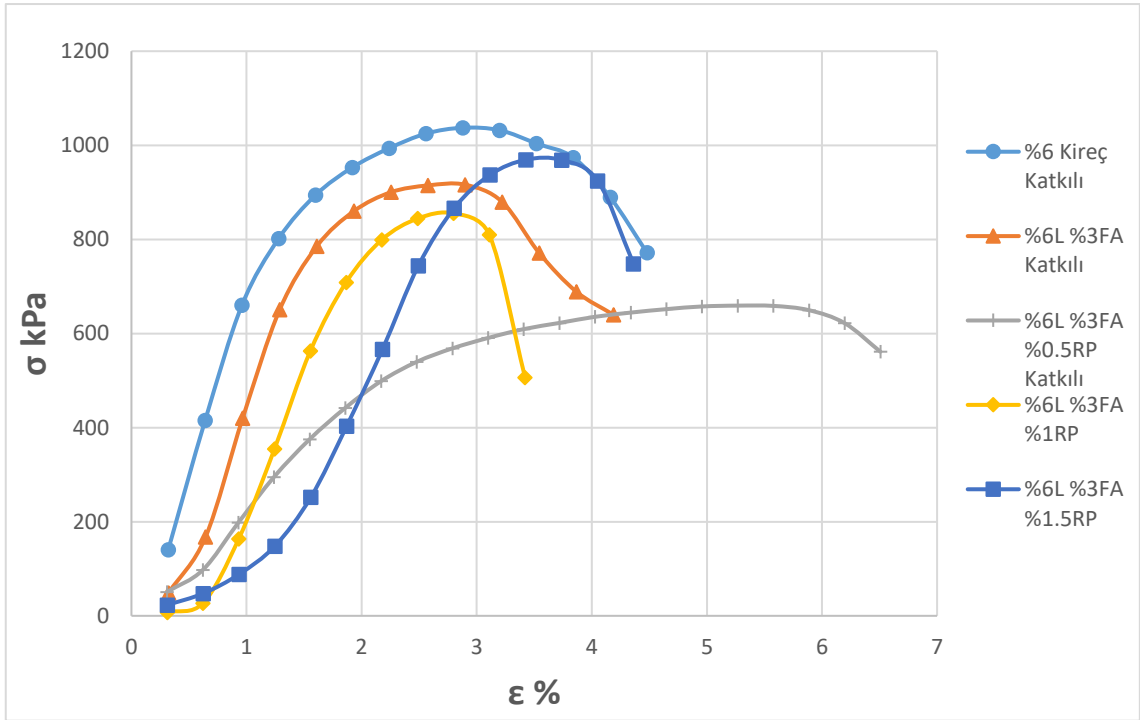


Şekil Ek 1.5. $S_{82}L_6FA_{18}RP_0$ karışımının 2, 7, 28 ve 56 gün kür uygulanmış serbest basınç dayanımları

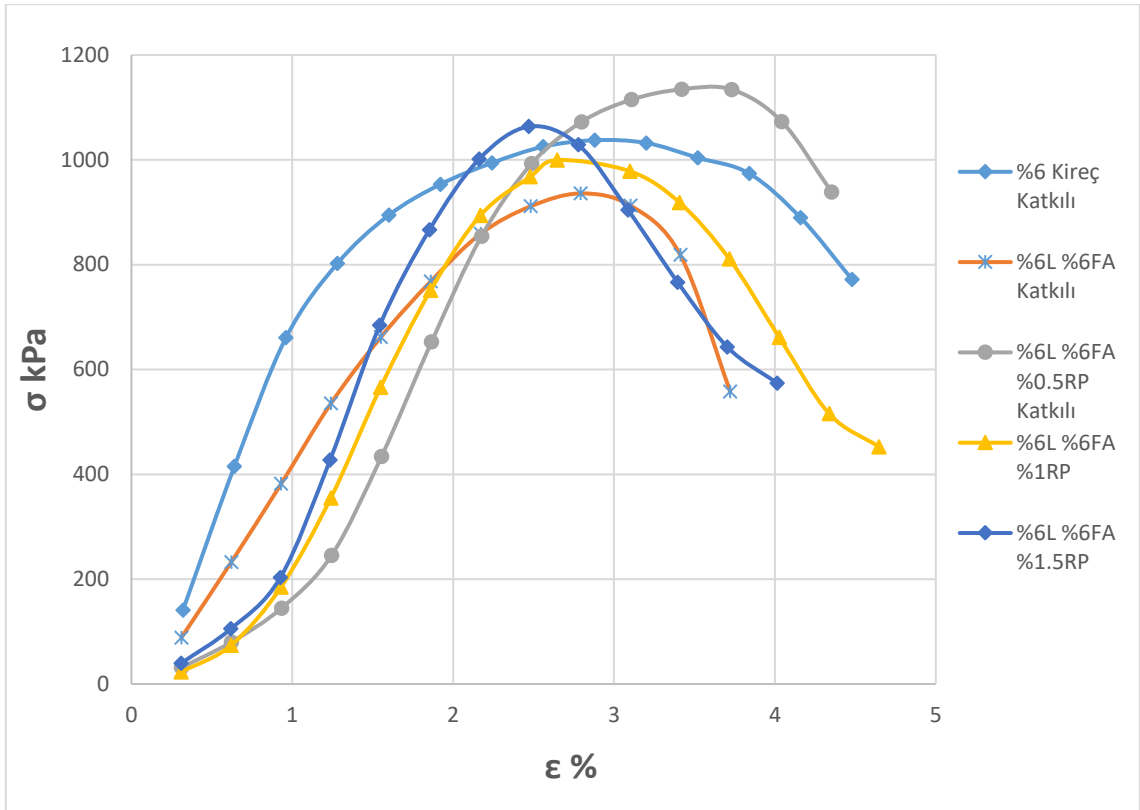
EK-2 2 Günlük Kür Süresi Sonunda Kompozitlerin Karşılaştırmalı Serbest Basınç Deneyi Sonuçları



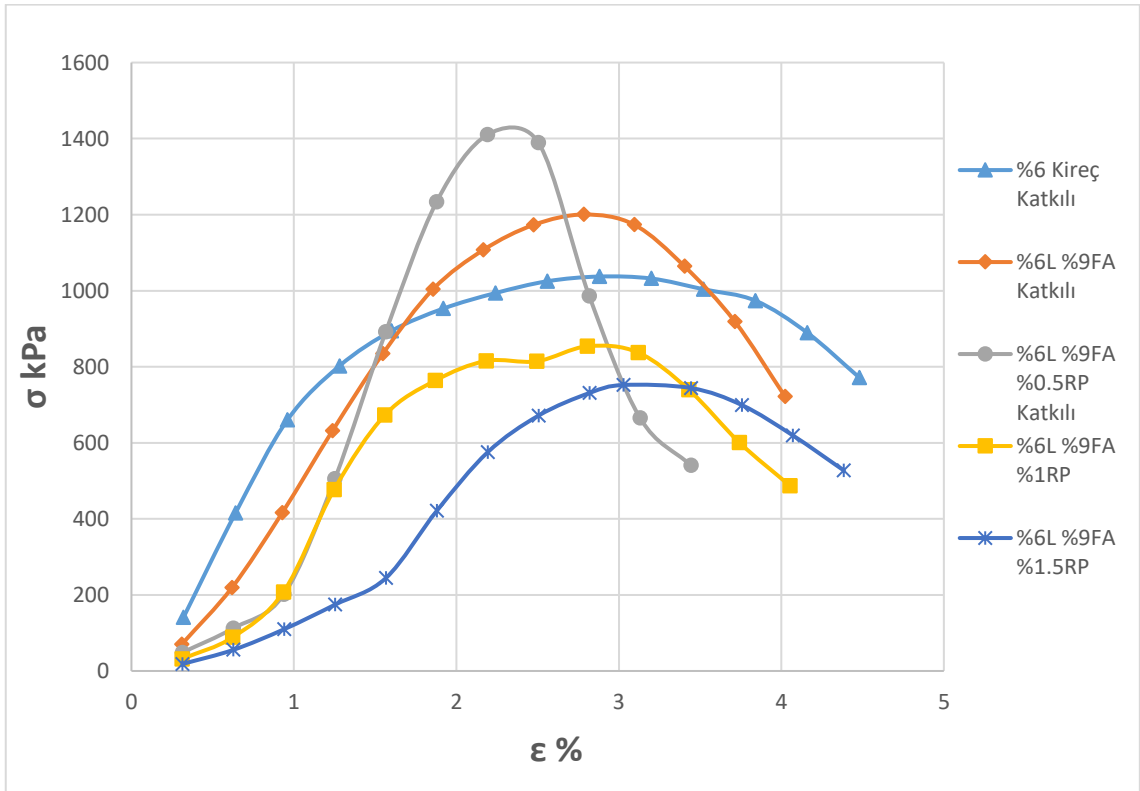
Şekil Ek 2.1. %6 Kireç ve Uçucu Kül Katkılı Karışımlar 2.Gün



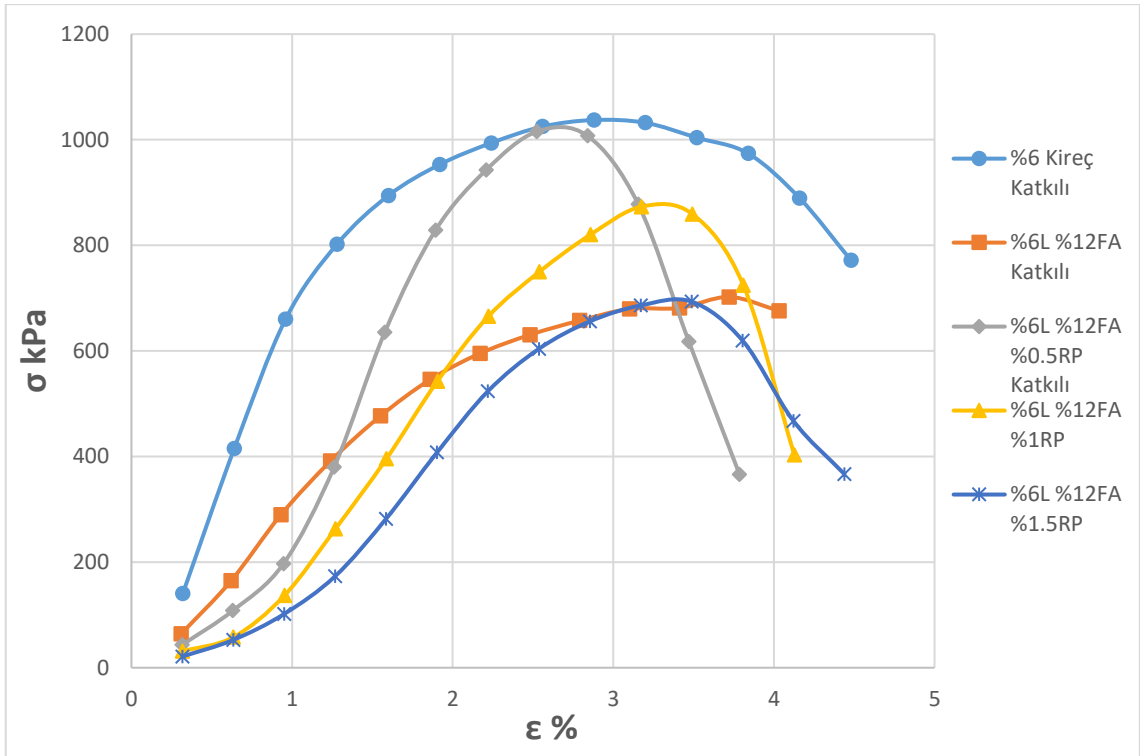
Şekil Ek 2.2. %6 Kireç %3 Uçucu Kül ve Lastik Katkılı Karışımlar 2.Gün



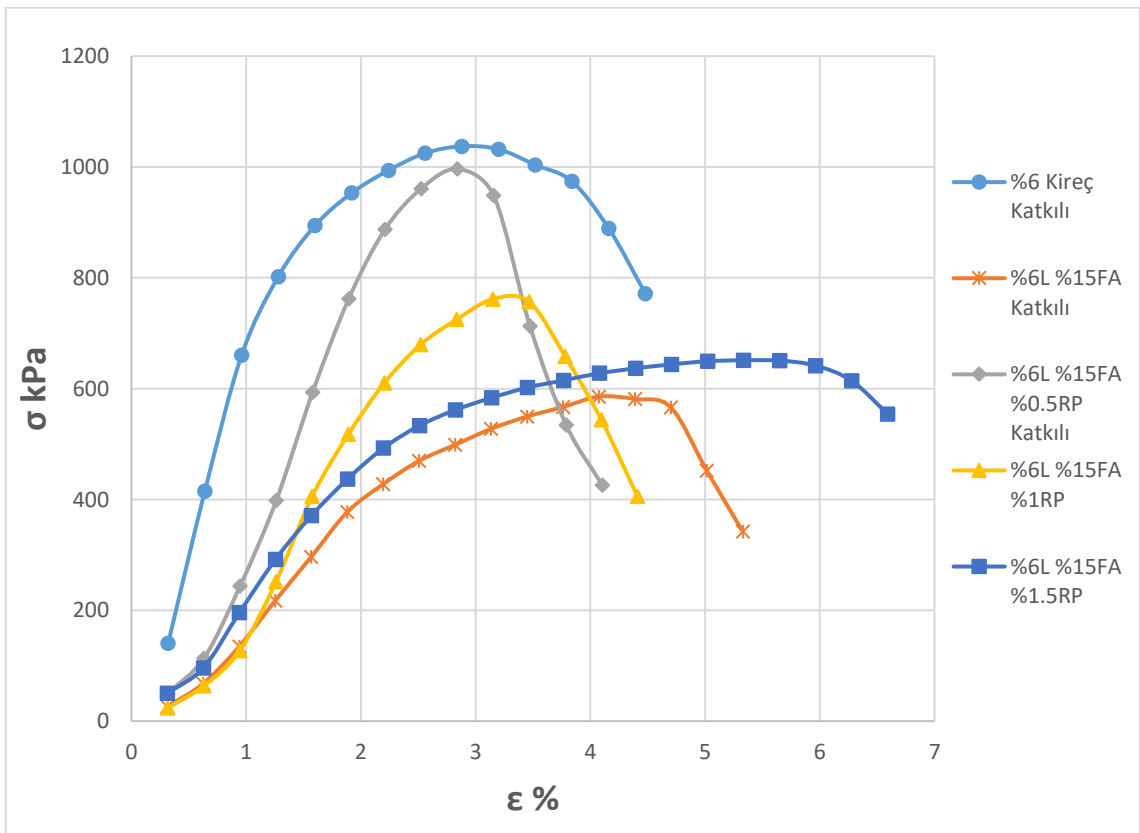
Şekil Ek 2.3. %6 Kireç %6 Uçucu Kül ve Lastik Katkılı Karışımlar 2.Gün



Şekil Ek 2.4. %6 Kireç %9 Uçucu Kül ve Lastik Katkılı Karışımlar 2.Gün

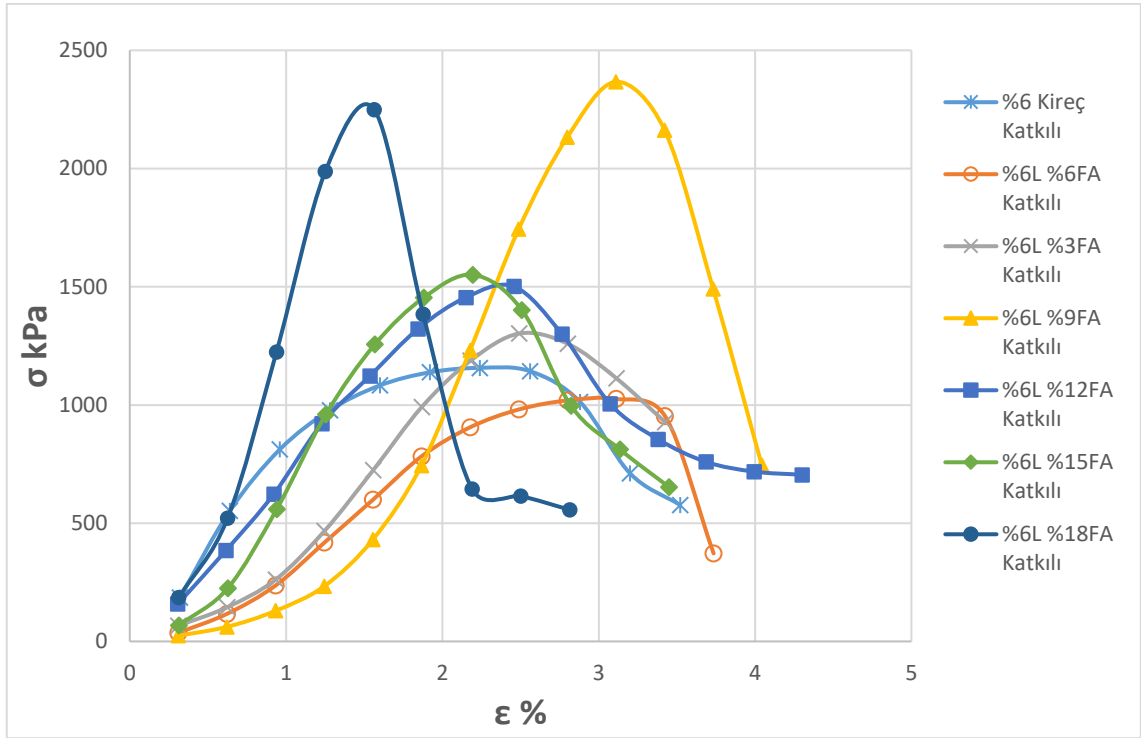


Şekil Ek 2.5. %6 Kireç %12 Uçucu Kül ve Lastik Katkılı Karışımlar 2.Gün

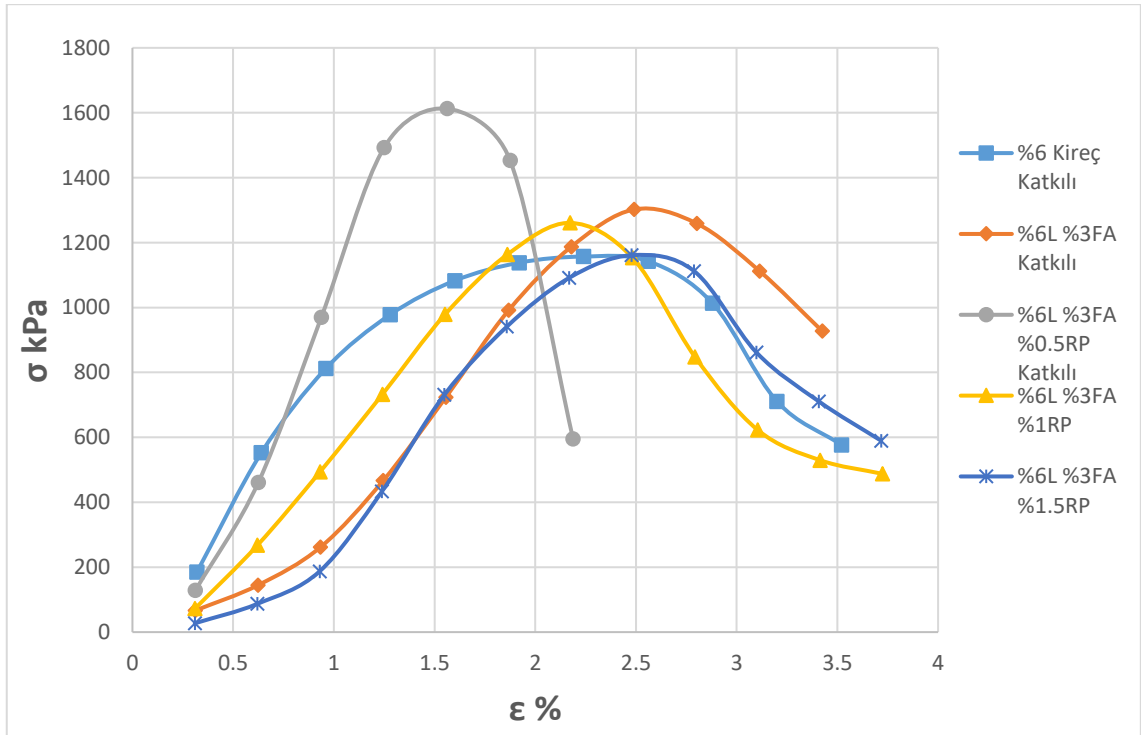


Şekil Ek 2.6. %6 Kireç %15 Uçucu Kül ve Lastik Katkılı Karışımlar 2.Gün

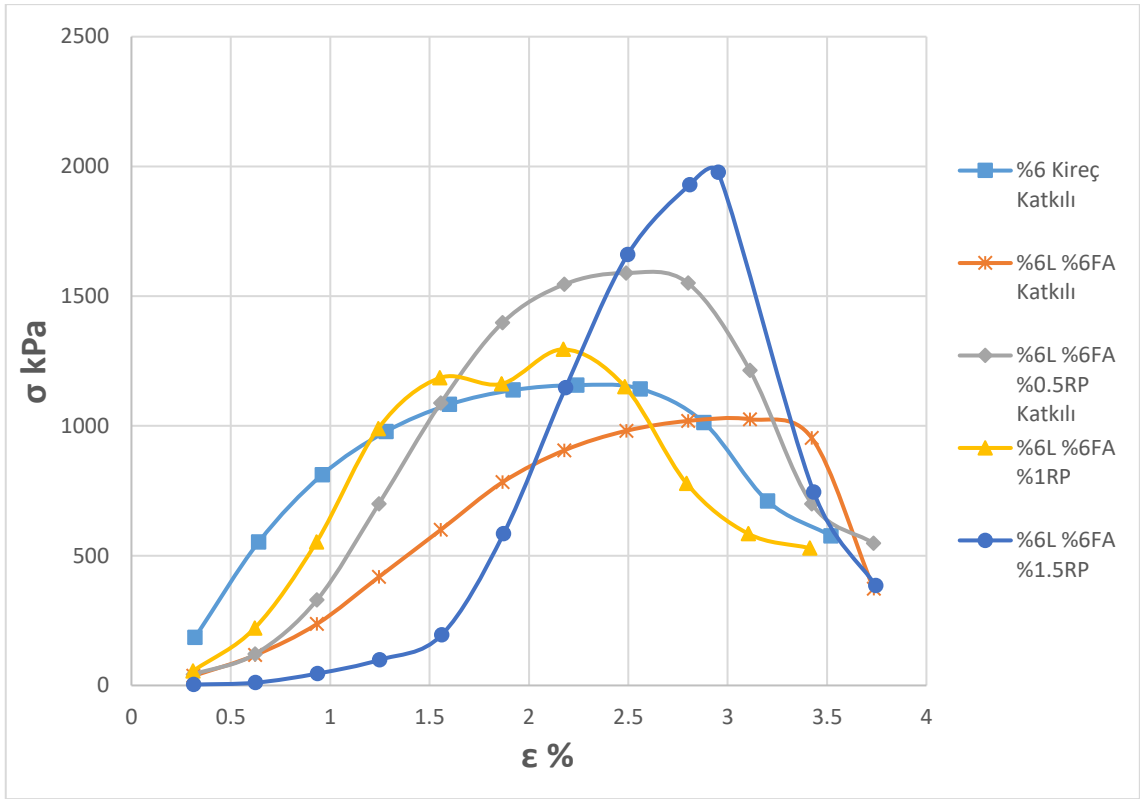
EK-3 7 Günlük Kür Süresi Sonunda Kompozitlerin Karşılaştırmalı Serbest Basıncı Deneyi Sonuçları



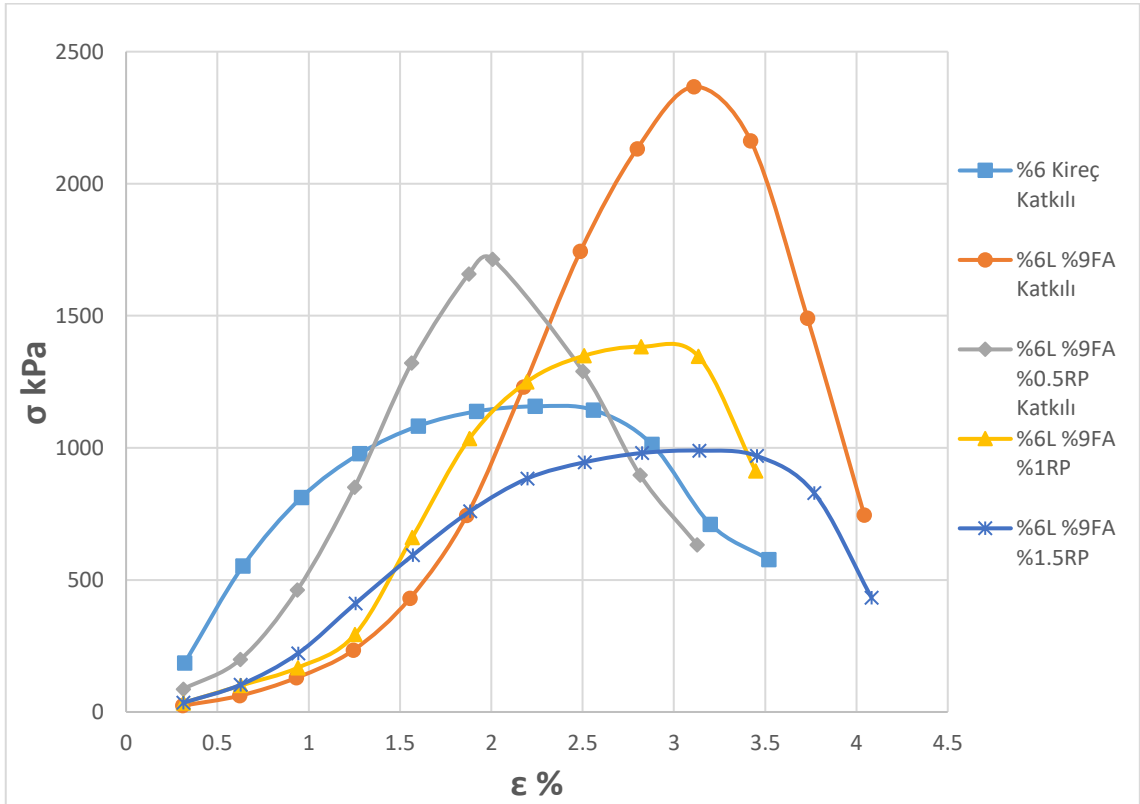
Şekil Ek 3.1. %6 Kireç ve Uçucu Kül Katkılı Karışımlar 7.Gün



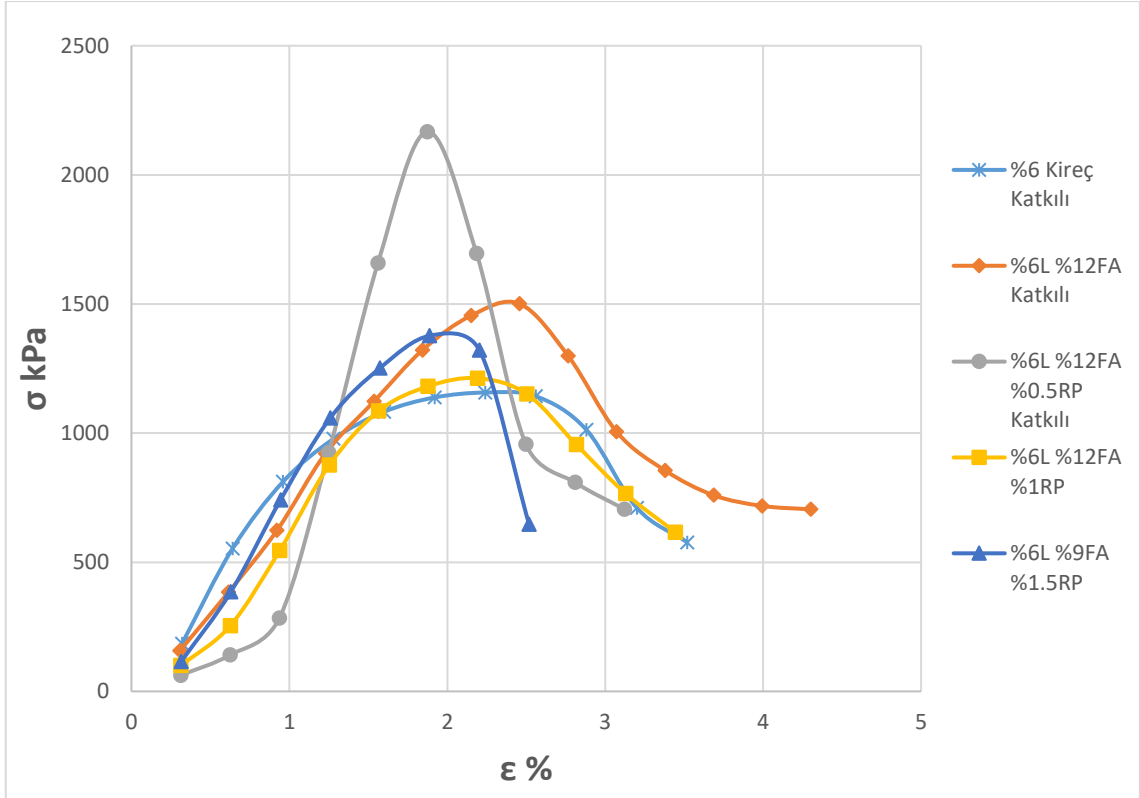
Şekil Ek 3.2. %6 Kireç %3 Uçucu Kül ve Lastik Katkılı Karışımlar 7.Gün



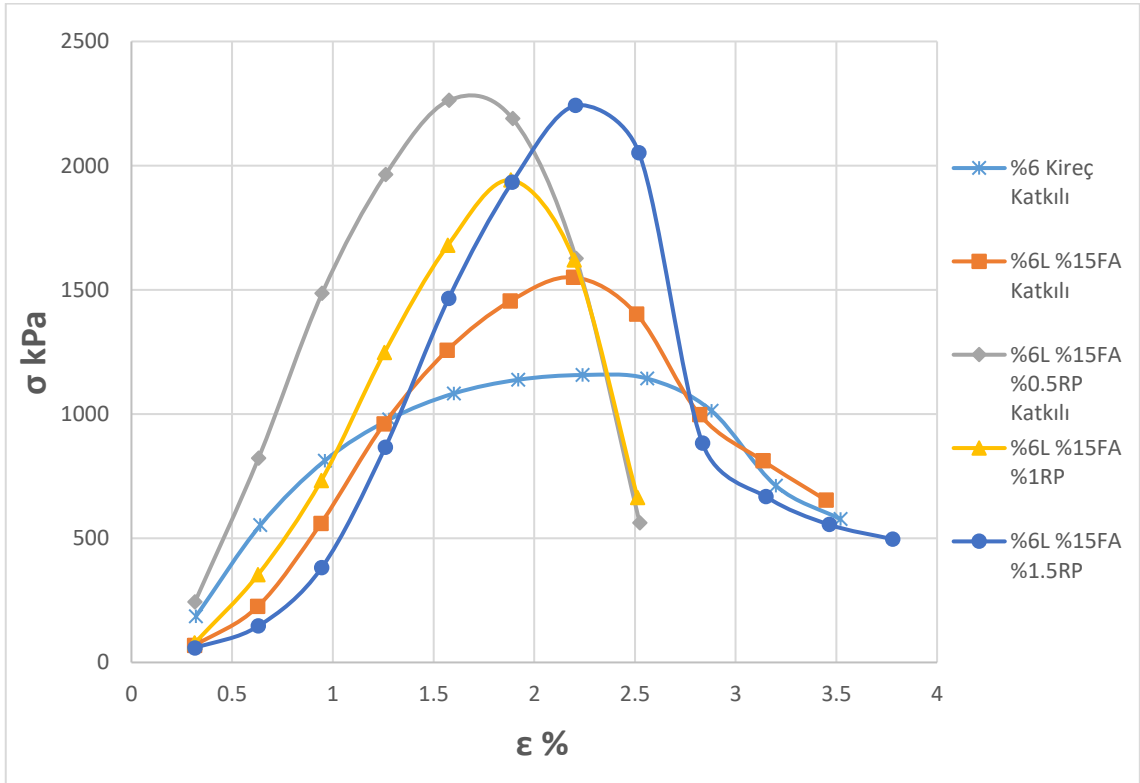
Şekil Ek 3.3. %6 Kireç %6 Uçucu Kül ve Lastik Katkılı Karışımlar 7.Gün



Şekil Ek 3.4. %6 Kireç %9 Uçucu Kül ve Lastik Katkılı Karışımlar 7.Gün

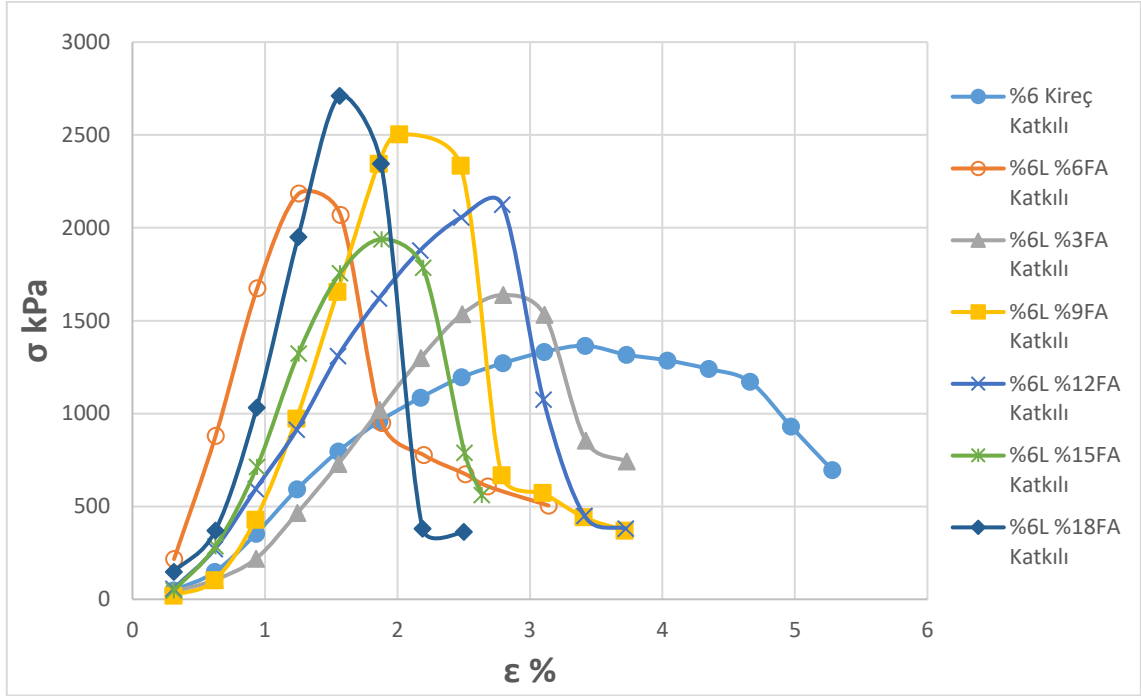


Şekil Ek 3.5. %6 Kireç %12 Uçucu Kül ve Lastik Katkılı Karışımlar 7.Gün

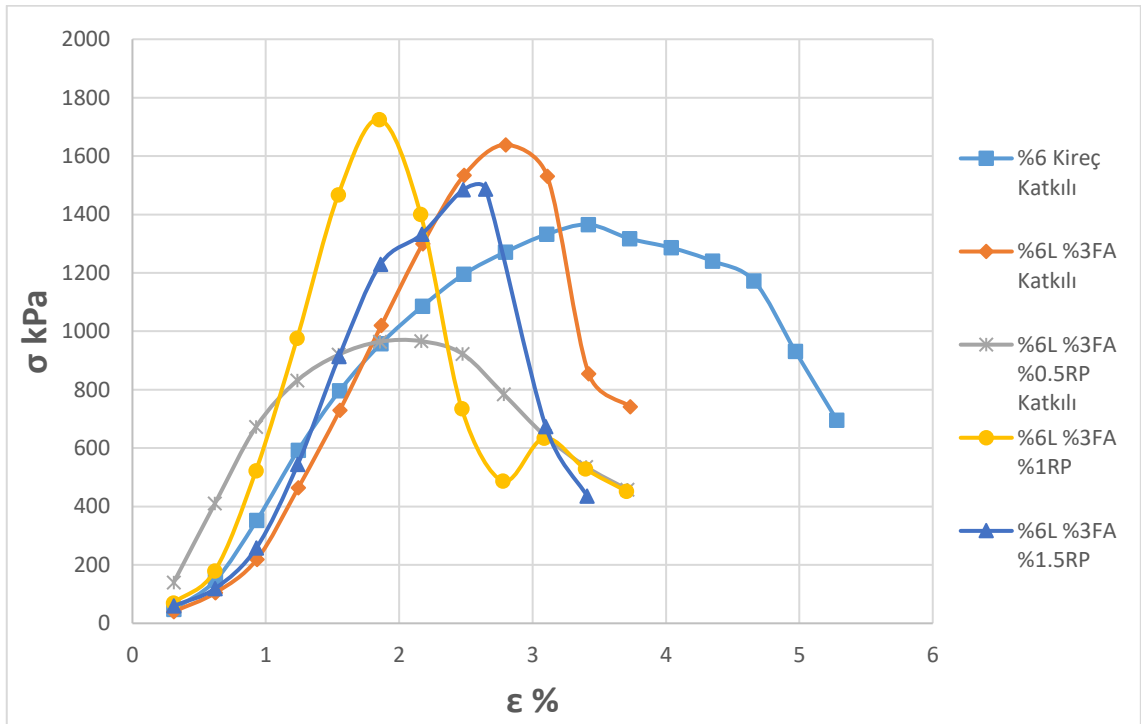


Şekil Ek 3.6. %6 Kireç %15 Uçucu Kül ve Lastik Katkılı Karışımlar 7.Gün

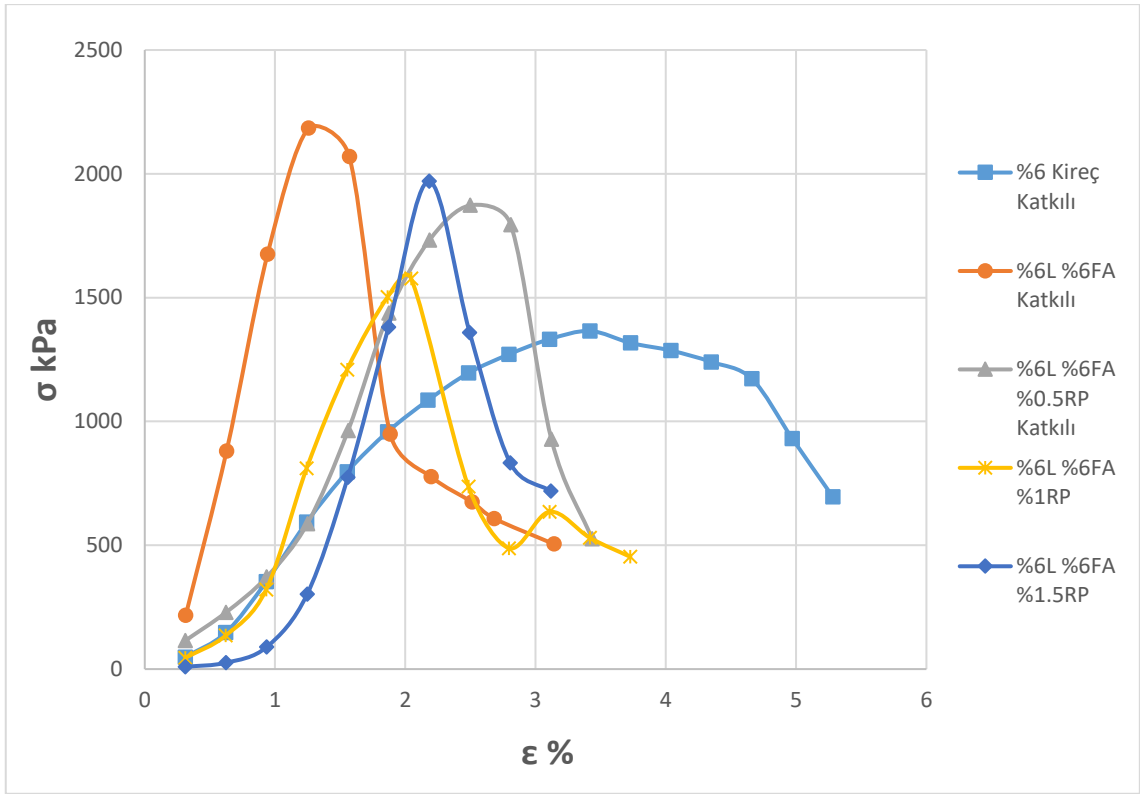
EK-4 28 Günlük Kür Süresi Sonunda Kompozitlerin Karşılaştırmalı Serbest Basınç Deneyi Sonuçları



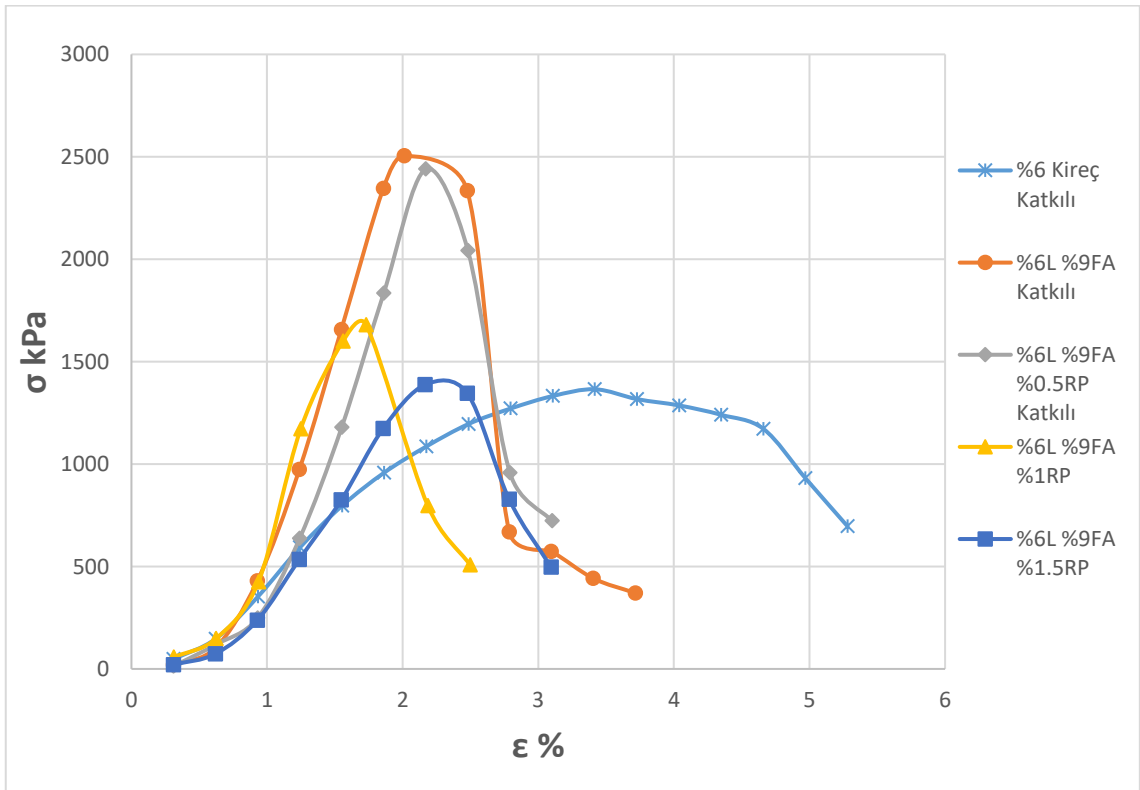
Şekil Ek 4.1. %6 Kireç ve Uçucu Kül Katkılı Karışımlar 28.Gün



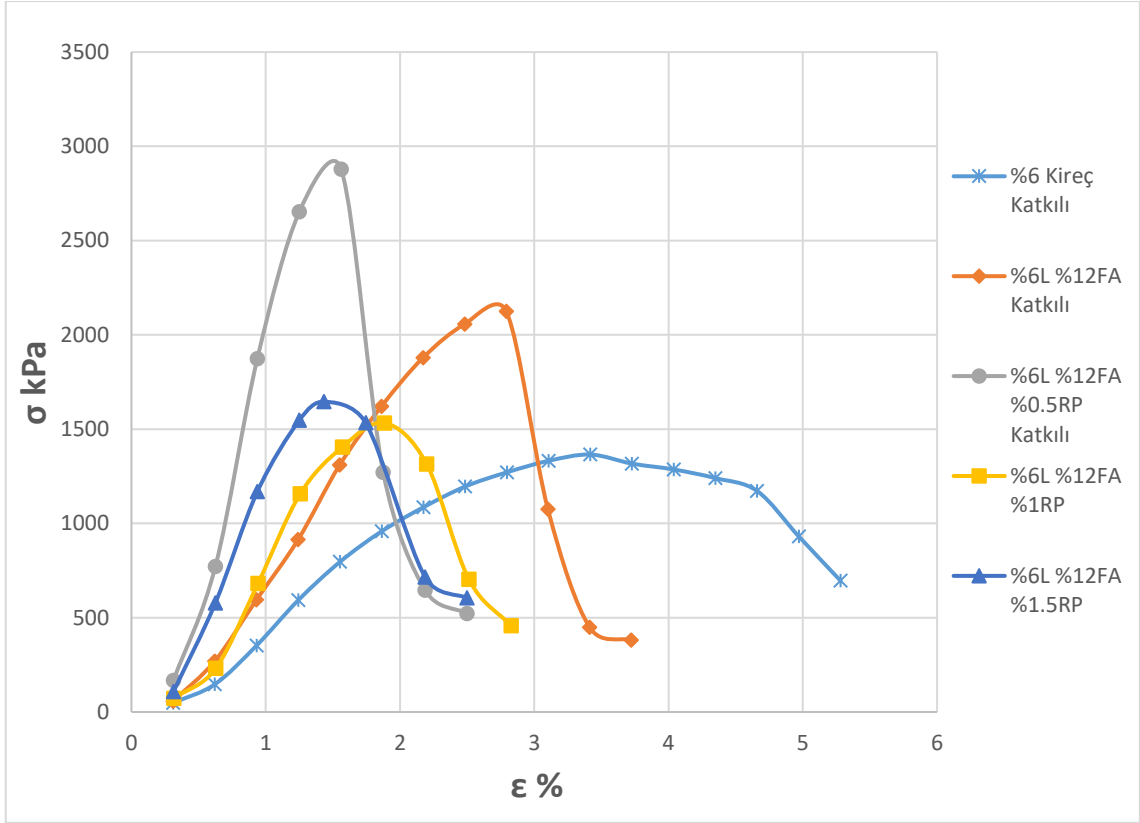
Şekil Ek 4.2. %6 Kireç %3 Uçucu Kül ve Lastik Katkılı Karışımlar 28.Gün



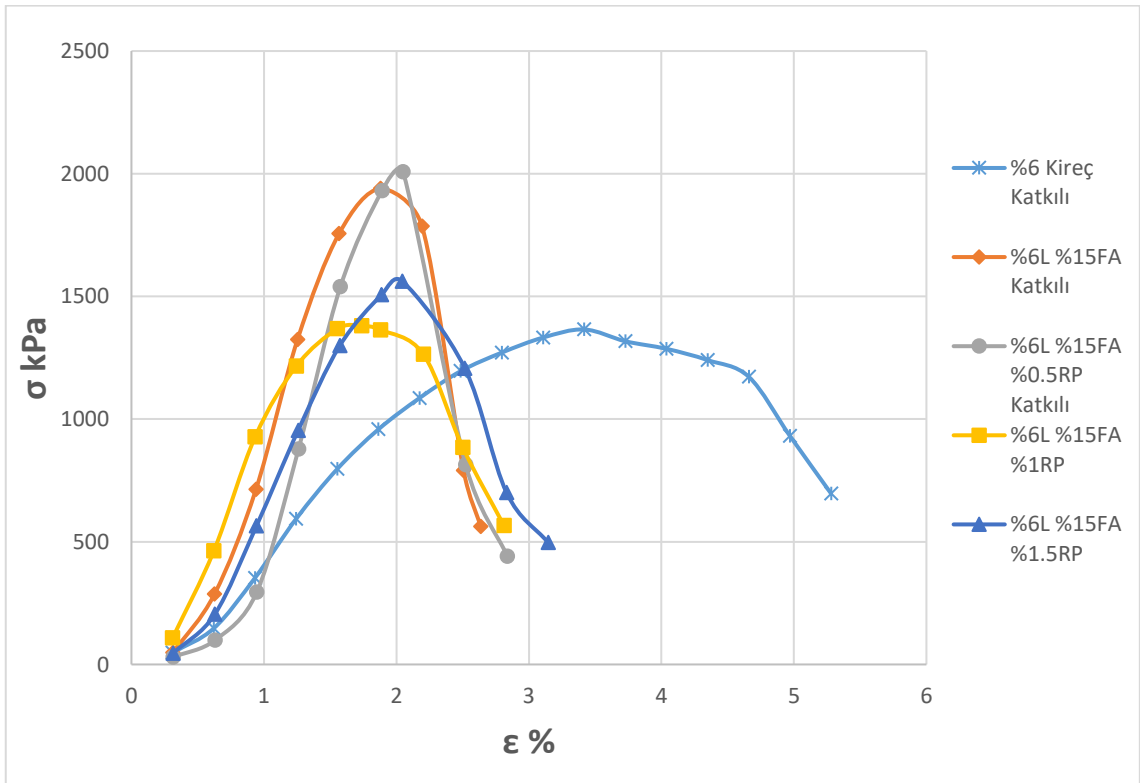
Şekil Ek 4.3. %6 Kireç %6 Uçucu Kül ve Lastik Katkılı Karışımlar 28.Gün



Şekil Ek 4.4. %6 Kireç %9 Uçucu Kül ve Lastik Katkılı Karışımlar 28.Gün

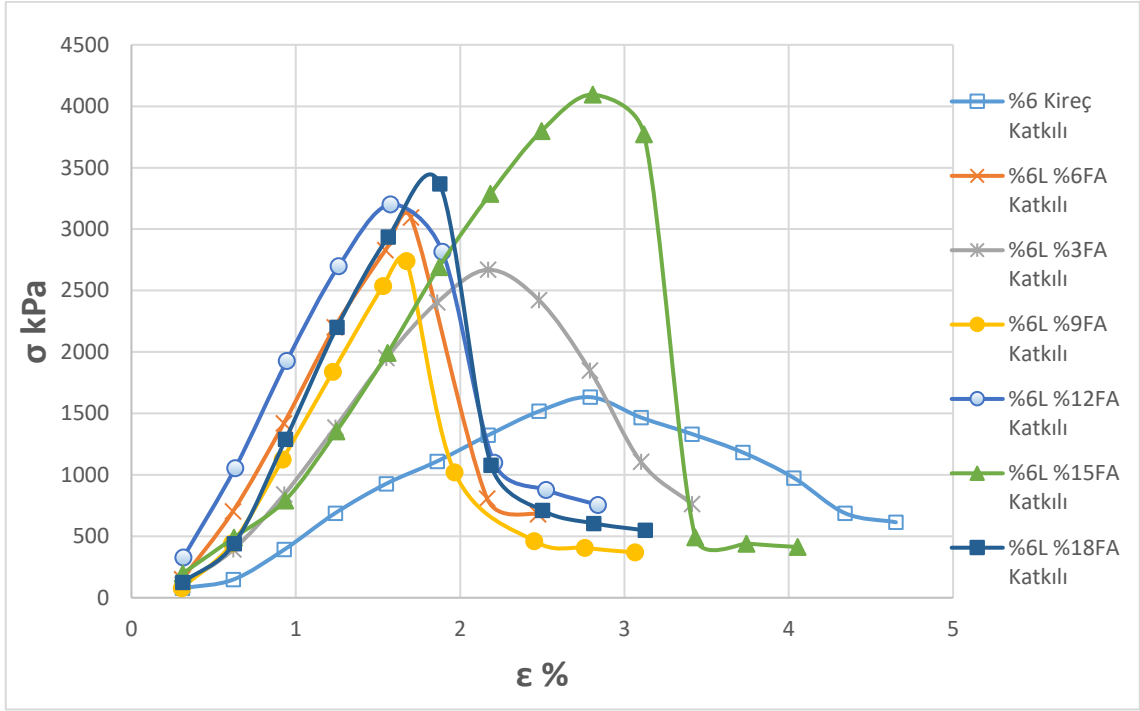


Şekil Ek 4.5. %6 Kireç %12 Uçucu Kül ve Lastik Katkılı Karışımlar 28.Gün

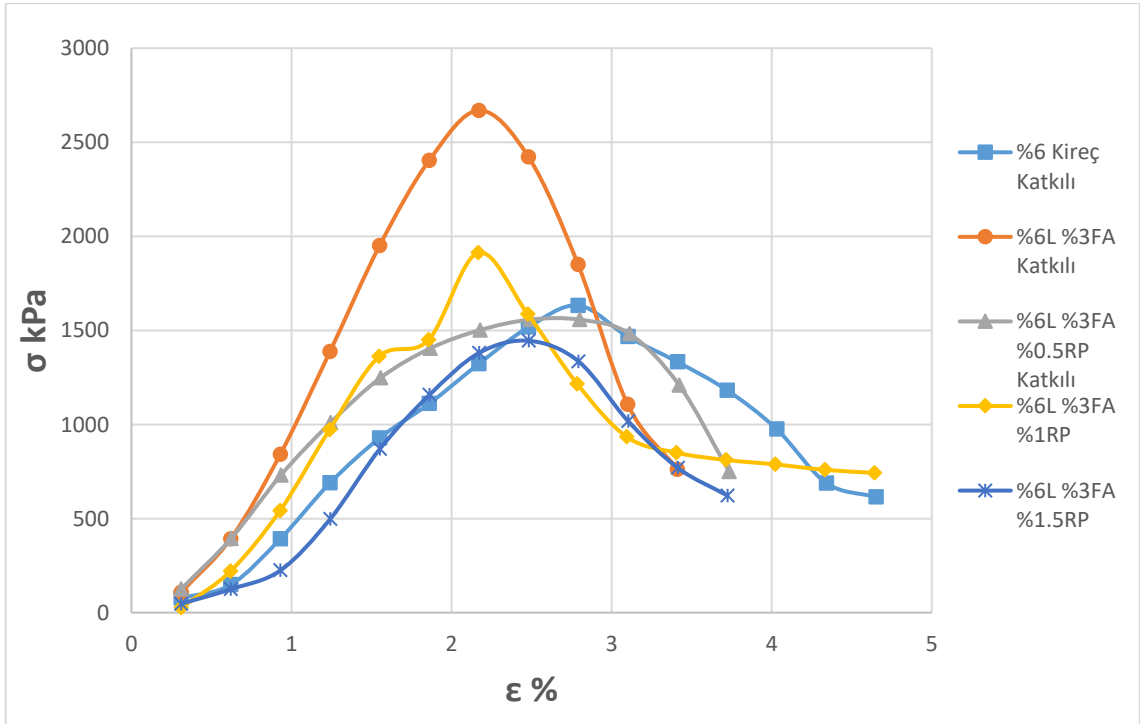


Şekil Ek 4.6. %6 Kireç %15 Uçucu Kül ve Lastik Katkılı Karışımlar 28.Gün

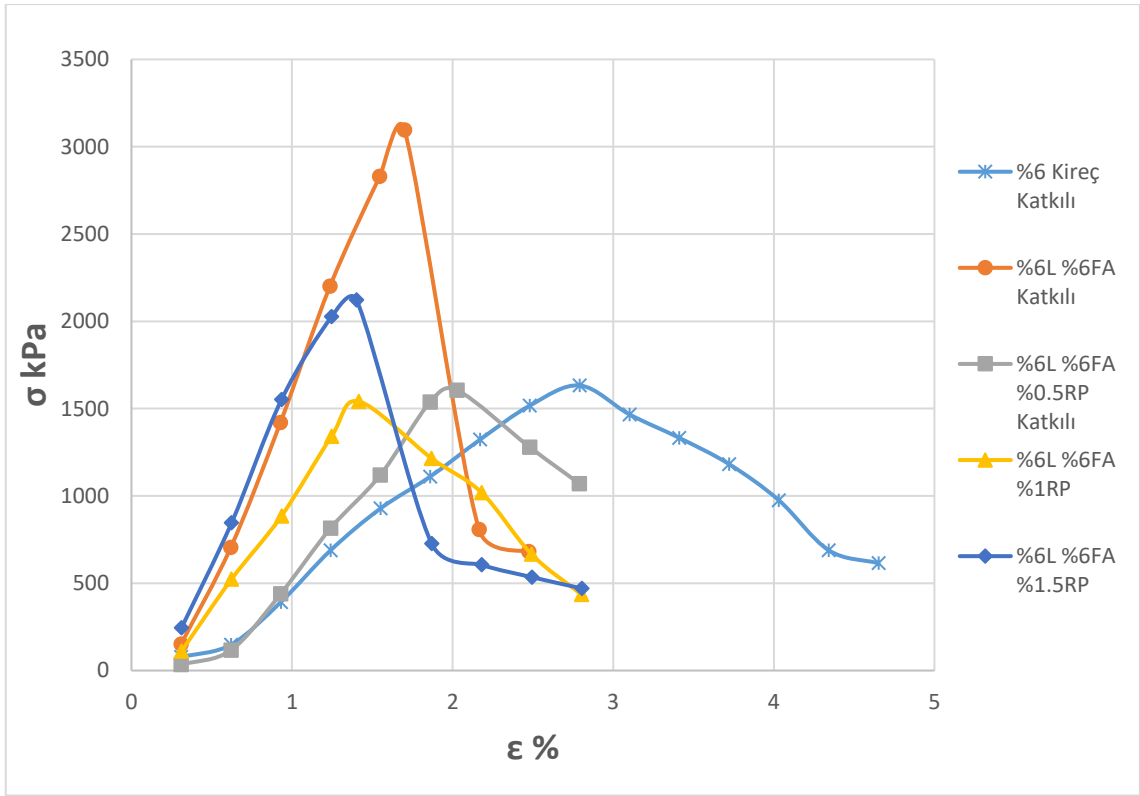
EK-5 56 Günlük Kür Süresi Sonunda Kompozitlerin Karşılaştırmalı Serbest Basınç Deneyi Sonuçları



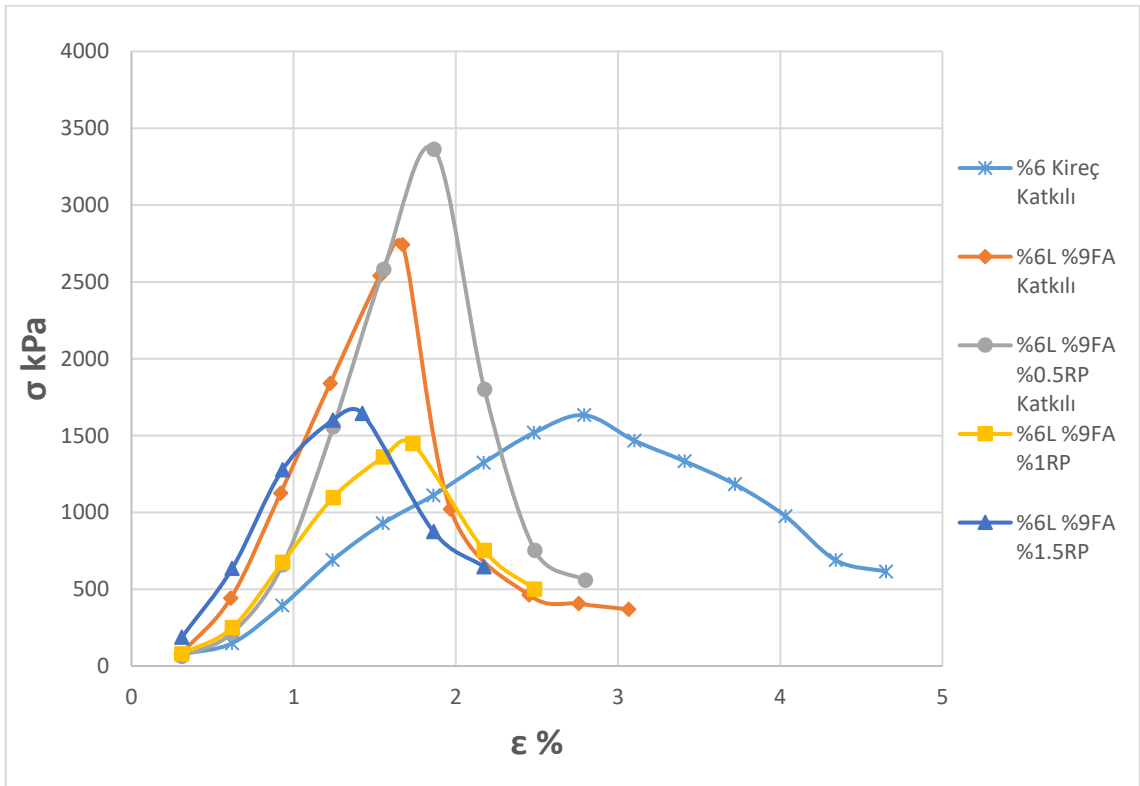
Şekil Ek 5.1. %6 Kireç ve Uçucu Kül Katkılı Karışımlar 56.Gün



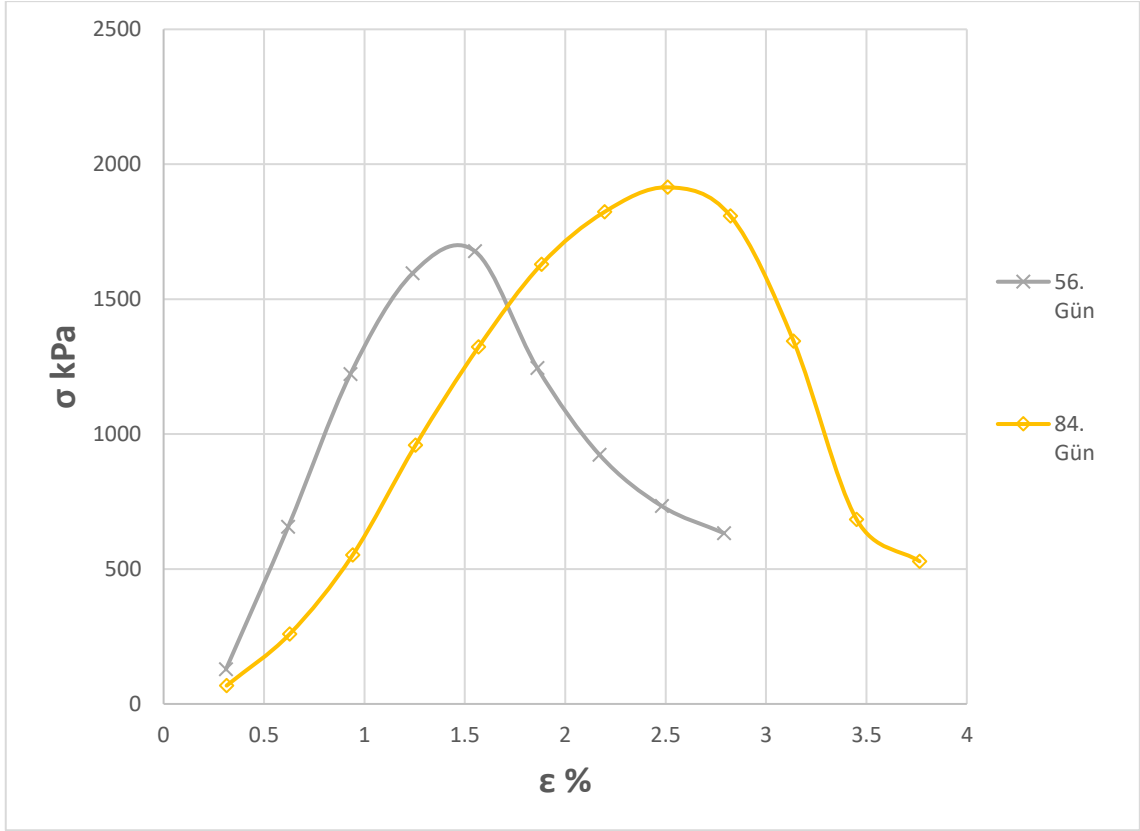
Şekil Ek 5.2. %6 Kireç %3 Uçucu Kül ve Lastik Katkılı Karışımlar 56.Gün



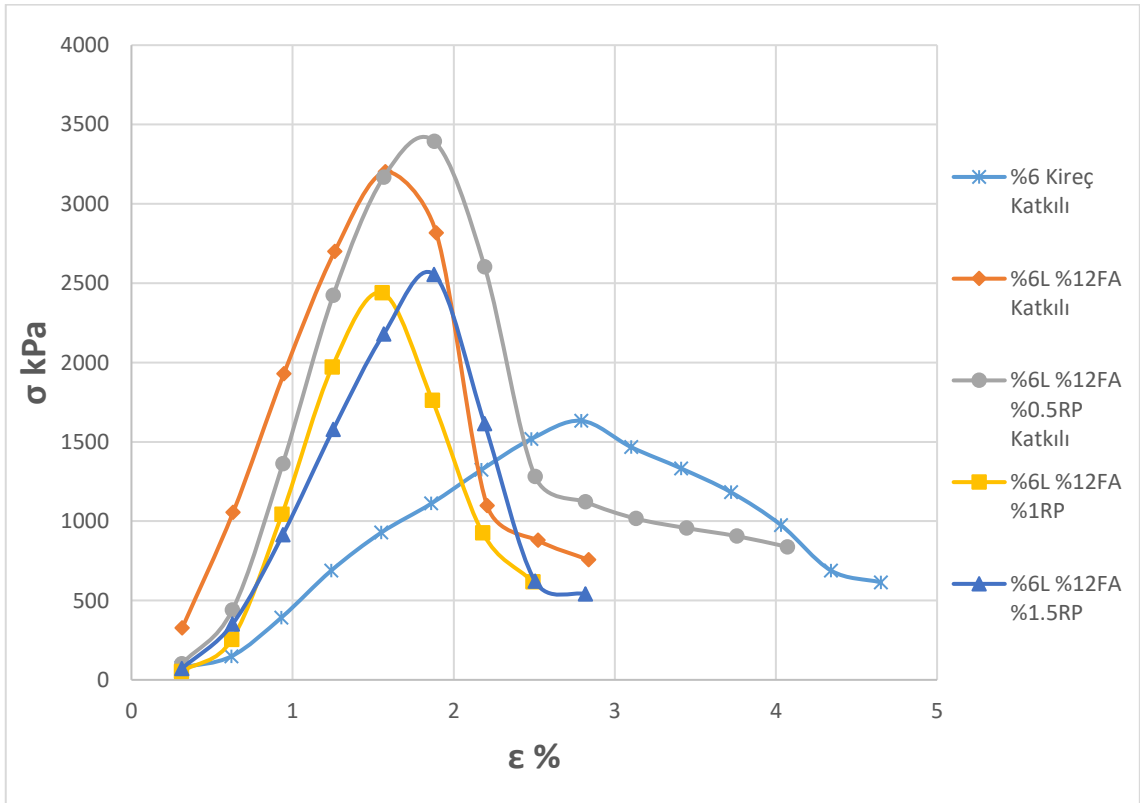
Şekil Ek 5.3. %6 Kireç %6 Uçucu Kül ve Lastik Katkılı Karışımlar 56.Gün



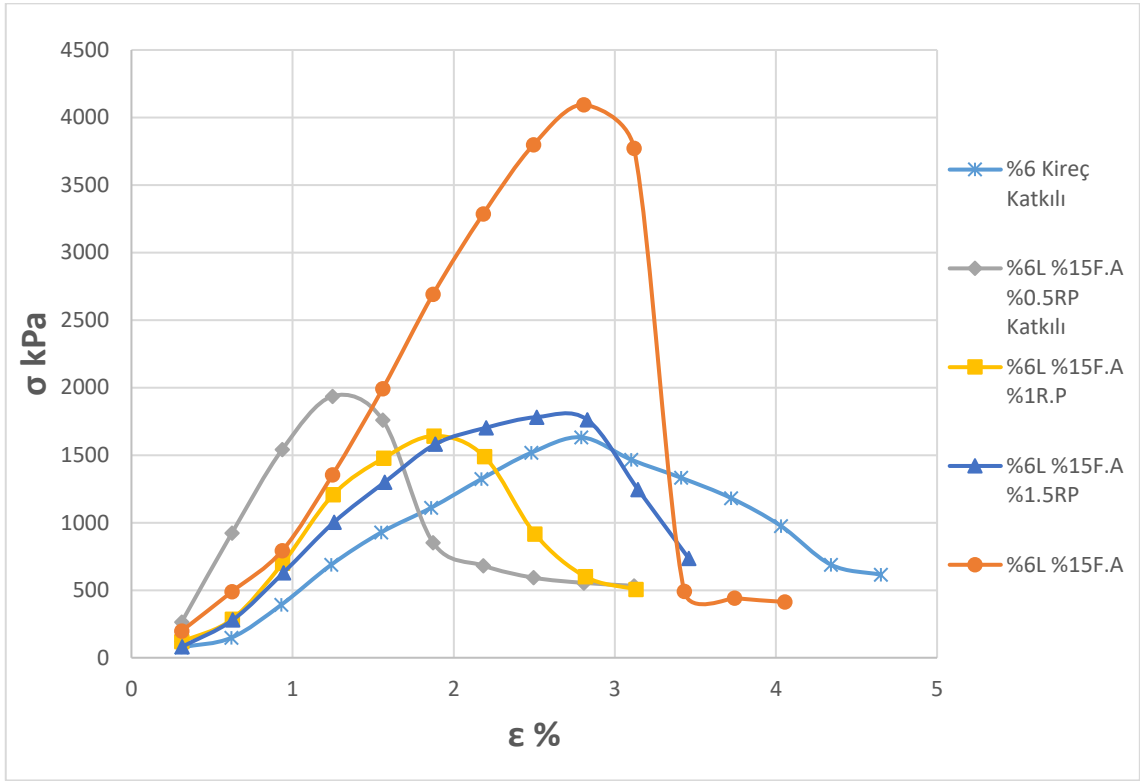
Şekil Ek 5.4. %6 Kireç %9 Uçucu Kül ve Lastik Katkılı Karışımlar 56.Gün



Şekil Ek 5.5. %6 Kireç %9 Uçucu Kül ve %0.25 Lastik Katkılı Karışımlar 56 ve 84. gün



Şekil Ek 5.6. %6 Kireç %12 Uçucu Kül ve Lastik Katkılı Karışımlar 56.Gün



Şekil Ek 5.7. %6 Kireç %15 Uçucu Kül ve Lastik Katkılı Karışımlar 56.Gün